

ПЯТЫЕ ВИНОГРАДОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

Доклады международной научной
конференции памяти
выдающегося русского ученого
Юрия Борисовича Виноградова

ГИДРОЛОГИЯ В ЭПОХУ ПЕРЕМЕН

СБОРНИК



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



Санкт-Петербург

2023



Санкт-Петербургский государственный
университет

Сборник докладов международной научной
конференции памяти выдающегося русского
ученого Юрия Борисовича Виноградова

ПЯТЫЕ ВИНОГРАДОВСКИЕ ЧТЕНИЯ
ГИДРОЛОГИЯ В ЭПОХУ ПЕРЕМЕН

Санкт-Петербург, 5–14 октября 2023 г.

Под редакцией О. М. Макарьевой, П. А. Никитиной

Санкт-Петербург
2023

УДК 556
ББК 26.22
С28

- C23 Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова «Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен» [Электронный ресурс]; Санкт-Петербург, 2023 год / под ред. О. М. Макарьевой, П. А. Никитиной.— СПб.: Изд-во ВВМ, 2023.— 689 с.

ISBN 978-5-9651-0730-8

Международная научная конференция «Пятые Виноградовские Чтения. Гидрология в эпоху перемен» памяти выдающегося русского ученого-гидролога Юрия Борисовича Виноградова проводится в Санкт-Петербургском государственном университете в 2023 году в пятый раз (2013, 2015, 2018, 2020). Она стала регулярной научной платформой для свободной дискуссии по проблемам развития гидрологии и поискам путей их преодоления, синтеза современных подходов в области изучения гидрологических процессов и их применения для решения фундаментальных и практических задач.

УДК 556
ББК 26.22

Book of proceedings of the international scientific conference in memory of the outstanding Russian scientist Yuri Vinogradov “Fifth Vinogradov Conference. Hydrology in the era of change” [Electronic resource]; St. Petersburg, 2023 / ed. O. M. Makarieva, P. A. Nikitina. — St. Petersburg: VVM Publishing House, 2023. — 689 p.

International scientific conference “Fifth Vinogradov Conference. Hydrology in the era of change” in memory of the outstanding Russian scientist-hydrologist Yuri Borisovich Vinogradov is held at St. Petersburg State University in 2023 for the fifth time (2013, 2015, 2018, 2020). It has become a regular scientific platform for free discussion on the problems of the development of hydrology and the search for ways to overcome them, synthesis of modern approaches in the field of studying hydrological processes and their application to solve fundamental and practical problems.

ISBN 978-5-9651-0730-8

© Макарьева О. М., Никитина П. А., 2023

Saint Petersburg State
University

Proceedings of international scientific conference in
memory of outstanding Russian
scientist Yury Vinogradov

V VINOGRADOV CONFERENCE
HYDROLOGY IN THE ERA OF CHANGE

Saint Petersburg, 5-14 October 2023

Edited by Olga Makarieva and Polina Nikitina

Saint-Petersburg
2023

**Международная конференция памяти выдающегося русского
ученого Юрия Борисовича Виноградова
ПЯТЫЕ ВИНОГРАДОВСКИЕ ЧТЕНИЯ
«ГИДРОЛОГИЯ В ЭПОХУ ПЕРЕМЕН»**

	Кафедра гидрологии суши Институт наук о Земле
Организаторы	Санкт-Петербургский государственный университет научная Группа модели Гидрограф
Председатель Программного комитета	д.т.н., профессор М.В. Болгов, Институт водных проблем РАН
Председатель Организационного комитета	к.т.н. О. М. Макарьева, Санкт-Петербургский государственный университет, Северо-Восточный государственный университет Санкт-Петербургский государственный университет научная Группа модели Гидрограф
	ФГБУ Государственный гидрологический институт
Спонсоры	ООО «Русловые процессы» ООО НПО «Гидротехпроект» Правительство Магаданской области Администрация Тенькинского муниципального округа Магаданской области ООО «Плането Инфо» АО «Полюс Магадан»

**International conference in memory of outstanding
Russian hydrologist Yury Vinogradov
V VINOGRADOV CONFERENCE
HYDROLOGY IN THE ERA OF CHANGE**

Organized by	Department of Land Hydrology
	Institute of Earth Sciences
	St. Petersburg State University
	Hydrograph Model Research Group
Chair of Scientific Committee	Mikhail Bolgov, Water Problems Institute RAS
Chair of Organizing Committee	Olga Makarieva, St. Petersburg State University, North-Eastern State University
	Saint Petersburg State University
	Hydrograph Model Research Group
	Federal State Budgetary Institution State Hydrological Institute
Partners	Channel Processes LLC
	NPO Gidrotekhproekt LLC
	Administration of the Tenka municipal district of the Magadan Region
	Government of the Magadan Region
	Planeta Info LLC
	Polyus Magadan JSC

Юрий Борисович Виноградов – обращение к молодым гидрологам

Vade mecum*

Послушай-ка. Если ты гидролог или собираешься стать им, то дай рассказать тебе правду об этой науке. О гидрологии. Конечно эта правда будет такой, какой она представляется мне. Но поверь, вряд ли в отношении раскрытия научных секретов у меня есть серьезные конкуренты. Но сначала хочу задать тебе несколько вопросов.

Какова судьба воды, упавшей с Неба на Землю? И если ты ответишь на этот вопрос, то ты – мастер удивительного.

Но ты знаешь, что воде присуще течение. Поэтому ответ - какими путями течет вода. И если ты готов ответить и на этот вопрос, то ты, уж наверняка, - мастер удивительного.

И вот еще. Что было бы, не будь на Земле воды? Что происходит на Земле при участии воды? Что происходит с водой за время ее пребывания на Земле? И если ты опять знаешь ответы, то воистину ты – мастер удивительного.

А если случилось так, что ты затруднился с ответами, или ответил неуверенно, или в чем-то погрешил против истины и почувствовал это, то пойдти со мной. И поверь, я тоже немного мастер удивительного.

Я напомню тебе о красоте этого Мира и его уязвимости. Об исключительной роли воды на Земле и проблемах, связанных с этой исключительностью. О том, как важно и замечательно чувствовать и понимать все о воде.

Я поведаю тебе о людях, которые давали ответы на заданные тебе вопросы. И о людях, которые думали, что знают ответы. И о людях, которые отвечали, не зная ответов.

И еще я надеюсь, что ты поймешь главное – только преданность делу и одержимость им смогут привести тебя к настоящему знанию. И только тогда ты сможешь стать подлинным мастером удивительного.

"Но довольно. Позволь мне приступить к делу. Позволь мне начать и позволь мне закончить".**

* Иди со мной

** Марио Пьюзо. Пусть умирают дураки.



ВИНОГРАДОВСКИЕ
ЧТЕНИЯ

Юрий Борисович Виноградов (1932–2012) – наш учитель и наставник

Доктор технических наук, профессор, ведущий ученый России в области гидрологии. Автор более 100 научных работ, в том числе нескольких основополагающих монографий по математическому моделированию гидрологических процессов и катастрофическим гидрологическим явлениям. Ю. Б. Виноградова разработал ряд новых моделирующих систем, описывающих процессы формирования речного стока (детерминированная модель «Гидрограф»), образования и движения селевых потоков, прорывов моренных озер, процессов эрозии и загрязнения на водосборе.



Всю жизнь самоабвенно был предан науке, исключительно тонко чувствовал и любил природу, и естественно, гидрологические процессы и явления, которые он изучал почти по всей территории бывшего Советского Союза от Балтийского моря до Камчатки. Хотя не все члены нашей группы успели лично при его жизни познакомиться с ЮБ, тем не менее Юрий Борисович является для нас примером Великого Человека, нашим идеалом гидролога, к которому мы стараемся приблизиться хоть чуть-чуть. В память о Юрии Борисовиче Виноградове мы проводим Международные конференции «Виноградовские чтения».



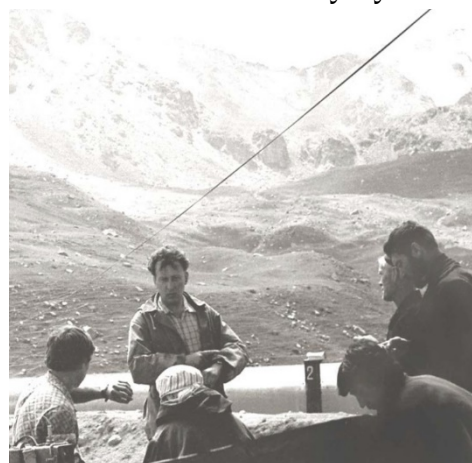
Юрий Борисович Виноградов родился 7 декабря 1932 г. Юные годы его прошли в Ташкенте. Окончив с золотой медалью среднюю школу, он поступил на гидрологическое отделение географического факультета Ташкентского университета. Уже в студенческие годы, а может быть и раньше, стали проявляться лидерские способности будущего руководителя. Своя компания исследователей, совершавшая походы в горы, путешествия по окрестностям, где, несомненно, были неординарные приключения.

В 1972 г. защитил докторскую диссертацию. Юрий Борисович известен как знаток и ценитель художественной литературы и тонкостей языка. И это не могло не отразиться на стиле его научных статей и монографий – четком и ясном, на изысканном подборе эпитафий.

Талант Ю. Б. Виноградова как руководителя позволял ему убедить исполнителей в целесообразности проводимых работ, увлечь сотрудников новой идеей, кратко и логично изложить новую мысль и дать ей корректное обоснование, создать модель рассматриваемого процесса и совершенствовать ее, направить усилия коллектива на решение поставленных вопросов и добиваться значимых результатов.



С 1972 по 1977 гг. на Чемолганском



полигоне под его руководством и при его непосредственном участии, был проведен первый в мире селевой эксперимент. Юрию Борисовичу удавалось пробуждать в людях лучшее, что в них было – творческую активность – качество настоящего лидера! С 1976 г. он организатор периодического издания сборников «Селевые потоки». В 1977 г. выходит его монография «Гляциальные прорывные паводки

и селевые потоки». Селевой эксперимент он опишет в своей научно - популярной книге «Этюды о селевых потоках», вышедшей в 1980 г.

С 2000 г. Юрий Борисович работал в Санкт-Петербургском государственном университете, читал курсы «Математическое моделирование», «Горная гидрология», «Современные проблемы гидрологии». Под его научным руководством было подготовлено 12 кандидатов наук. В годы работы в Университете были написаны (совместно с Виноградовой Т.А.) учебные пособия: «Современные проблемы гидрологии» в 2008 г. и «Математическое моделирование в гидрологии» в 2010 г., по его же наработкам была закончена в 2014 г «Прикладная гидрология». В этих работах заложены фундаментальные основы и определены проблемы становления гидрологии нового поколения.

Последняя книга Юрия Борисовича, над которой он работал, в буквальном смысле, до последнего дня своей жизни, вышла в свет 2015 г. Это книга «О нашем мировоззрении». Здесь были подняты вопросы о происхождении и развитии Мира, Жизни и Человека.

Юрий Борисович ушел из жизни 30 сентября 2012 г., не закончив очень многое из задуманного им в гидрологии. В 2013 году были проведены Первые Виноградовские Чтения. За 10 лет Виноградовские чтения стали одной из основных точек притяжения российских и



зарубежных гидрологов и специалистов, занимающихся смежными с гидрологией направлениями.

В 2023 году заглавной темой конференции стала – «Гидрология в эпоху перемен»!



Пятые Виноградовские Чтения

В пятых Виноградовских Чтениях приняло участие более 100 человек, 90 из них участвовали в конференции очно! В Санкт-Петербург приехали коллеги из Беларуси, Узбекистана, Ирана и Индии, также онлайн приняли участие коллеги из Армении и Японии.

Барнаул, Владивосток, Минск, Москва, Екатеринбург, Ереван, Иркутск, Казань, Красноярск, Курск, Нижний Новгород, Пермь, Пятигорск, Санкт-Петербург, Симферополь, Сочи, Тамбов, Томск, Тюмень, Челябинск, Южно-Сахалинск, Якутск – это города России, из которых к нам приезжали участники.

87 молодых ученых выступали на конференции, представляя свои исследования.

13 пленарных докладов было проведено за время конференции, 108 устных докладов было заслушано и 25 стендовых докладов представлено!

Виноградовские чтения – это не только научное, но культурное, а также спортивное мероприятие! В 2023 году в программу конференции вошли такие события, как: Полевая школа в Магаданской области, Школа гидрологического моделирования, посещение оперы «Кармен» в Михайловском театре, посещение могилы Юрия Борисовича Виноградова, Футбольный турнир, дружеский банкет и танцы на теплоходе, экскурсии на болотную станцию Ламин–Суо и гидрологическую экспериментальную базу «ГТИ».

Далее, расскажем вам как прошла конференция словами участников прошедших событий!

Полевая научная школа «Гидрология горной криолитозоны», 18–28 июня 2023 г.

В рамках Пярых Виноградовских Чтений в июне 2023 г. в Магаданской области была проведена первая полевая научная школа «Гидрология горной криолитозоны». В ней приняло участие пять молодых ученых из разных ВУЗов г.



Москвы и Санкт-Петербурга.

Все прошло по плану. Ребята проехали 427 км от г. Магадан до пос. Кулу по красивейшей горной Тенькинской трассе, побывали на экскурсии в ведущей золотодобывающей компании «Полюс Магадан», увидели, как в суровых условиях криолитозоны развивается сельское хозяйство.

Сильные эмоции были получены конечно во время научных работ. Три дня мы провели в пределах бассейна реки Анмангында, где формируется гигантская наледь, для того чтобы на летний период установить оборудование для наблюдения за гидрологическим режимом горных рек, климатическими и геохронологическими условиями.



Выход на наледь – один из главных моментов, который запомнится надолго. Лед в разных частях наледи совершенно уникальный, ребята не переставали ему удивляться. Жители пос. Усть-Омчут были в этот день вместе с нами и были

поражены красотой тех мест, которые находятся так близко к ним, но из-за работы и других обстоятельств – так далеко.

При поддержке администрации Тенькинского муниципального округа были организованы питание и транспорт, спортивные и развлекательные мероприятия.



Правительство Магаданской области оказало помощь в г. Магадан с проживанием, проведением обзорной экскурсии по городу и трансфером до аэропорта.

Компания «Полюс Магадан» провела экскурсию по золоторудному месторождению – Наталкинский ГОК.

Предприниматель А. В. Полторацкий, который занимается развитием сельского хозяйства в регионе, провел

экскурсию по КФК «Новое Куду».









Школа гидрологического моделирования,

5–7 октября 2023 г.

В рамках конференции с 5 по 7 октября 2023 года в Государственном Гидрологическом Институте проходила Школа гидрологического моделирования. Школа состояла из трех основных блоков.

В первый день к.г.н. Виктория Юдина (МГУ) рассказывала о моделировании и прогнозах селевых потоков. Был продемонстрирован фильм «Слово о селевом потоке». Этот фильм знакомит зрителя с самыми масштабными экспериментами по физическому моделированию селевых потоков, проведенными Юрием Борисовичем Виноградовым на Чемолганском полигоне. В заключении первого дня Школы было проведено моделирование селевого паводка с использованием современных программ.



Второй день был посвящен методам машинного обучения и моделирования. Лекции читали иранские специалисты Оmid Рахмати и Айдинг Корнеджади. (Научно-образовательный центр сельского хозяйства и природных ресурсов Курдистана, AREEO).

В третий день участники Школы познакомились с моделью Гидрограф проблемами моделирования, которые обсуждал в своих книгах Юрий Борисович Виноградов. Знакомство с моделью проходило на примере бассейна р. Анмангында. Занятия вели к.т.н. Наталия Нестерова (СПбГУ) и к.т.н. Ольга Макарьева (СПбГУ, СВГУ).





Очень важно, что традиция продолжается, и в Школе принимают участие новые поколения!

В конце заключительного дня все участники школы получили диплом об участии в школе и памятные футболки с логотипом конференции «Виноградские чтения»!



Традиционно Школа включает в себя и совместную культурную программу. Участники Школы посетили Михайловский театр.



1 день конференции

Конференцию открывала Ольга Михайловна Макарьева, ученица Юрия Борисовича Виноградова и бессменный организатор Виноградовских Чтений. После выступал коллега и друг Юрия Борисовича – Михаил Васильевич Болгов. Далее с пленарным докладом выступал директор Государственного Гидрологического Института, который рассказал о достижениях мировой гидрологии за период с 2020 по 2023 годы. Результатами исследований на стационаре в Магаданской области в рамках пленарных докладов поделилась Землянкова Анастасия Александровна (СПБГУ, СВГУ)



Так же в первый день конференции с пленарным докладом выступал коллега из Ирана Omid Rahmati, с темой доклада «Flood Susceptibility Modeling Using Support Vector Machine Algorithm».



В первый день конференции проводились секции: Новые методы прогнозирования; Риски опасных явлений; Гидрология полярных регионов – поддержка важнейшего направления глобальной политики и международного сотрудничества.

Почтили память Юрия Борисовича Виноградова

В обеденный перерыв группа участников конференции почтила память Юрия Борисовича Виноградова на его могиле на Смоленском кладбище.



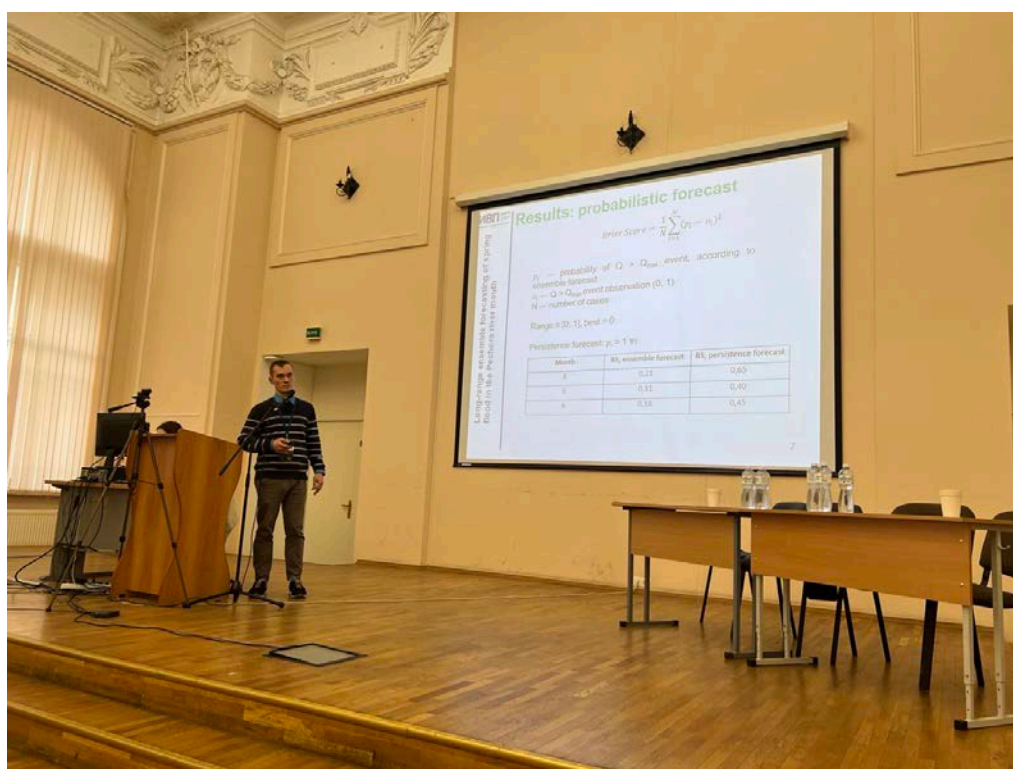
2 день конференции



Во второй день конференции была проведена большая дискуссионная секция «Гидрология и грядущие изменения климата – возможны ли «ответственные» прогнозы?». Ее открыл пленарным докладом «Климатические изменения стока: есть ли методы выявления и учета?» Михаил Васильевич Болгов (ИВП РАН), далее Михаил Леонидович Марков (ГТИ) докладывал «О регулирующей роли подземного питания рек в формировании речного стока при изменении климата». Заключительным в пленарной секции стал доклад Натальи Леонидовны Фроловой (МГУ) «Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата». После пленарных докладов прошла активная дискуссия.



После обеденного перерыва были проведены следующие секции: Водные ресурсы и водные объекты – экологическое состояние и устойчивое развитие экономики страны; Новые методы гидрологических расчетов и прогнозов.



Футбольный турнир

В рамках конференции, в завершении второго дня состоялся футбольный турнир! Участники из разных организаций объединились в три команды, чтобы показать свои силы на поле и боролись за право стать победителем. Первое место заняла команда Северо-Восток с участниками из СВГУ, СПбГУ, МГУ, ИВП РАН и ПГНИУ. На Шестых Чтениях организаторы планируют развернуть целую спартакиаду!





Некоторые участники даже порвали кроссовки – такая была острая игра!



3 день конференции

Третий день конференции традиционно начался с пленарных докладов. Николай Николаевич Филатов (КарНЦ РАН) выступал с докладом «Актуальные проблемы моделирования и экспериментальных исследований экосистем озер».



Виктория Антоновна Юдина (МГУ) представляла доклад «Моделирование селевых потоков и прорывных паводков на примере долины реки Хозгуни (Таджикистан)».

Александр Тимофеевич Зиновьев (ИВЭП СО РАН) представил доклад на тему «Водные и экологические исследования в ИВЭП СО РАН: основные направления и

наиболее значимые результаты».

После перерыва начались секции: Риски опасных гидрологических явлений: проблемы оценки и управления; Водные ресурсы и водные объекты – экологическое состояние и устойчивое развитие экономики страны; Новые методы гидрологических расчетов и прогнозов.



На секции «Риски опасных гидрологических явлений: проблемы оценки и управления» представляли свои доклады коллеги из Ирана Farnoush Mohammadi с докладом «Flood Vulnerability Mapping in Watershed Scale» и Monisha Isaac из Индии с докладом «Climate Change and hydrological threat to Flood plain fisheries of Yamuna River».

В завершении третьего дня состоялась, ставшая уже традиционной общая фотография участников Виноградовских Чтений.



4 день конференции

Сергей Николаевич Кирпотин (ТГУ) из Томского Государственного Университета открыл четвертый день конференции пленарным докладом на тему «Комплексные эколого-биогеохимические исследования водно-болотных угодий Сибири как природного коллайдера на основе мега-трансектного подхода: итоги и перспективы».

Далее выступал ученый из Ирана Aiding Kornejady с докладом «Towards bridging digital twins, game engines, and natural hazard modeling & understanding».

Следом за ним выступали самые юные участники конференции – Дети из Тенькинского центра дополнительного образования детей, Магаданская область. Пленарный доклад на тему «Маленькими шагами к большой науке?» тронул большое количество участников конференции.

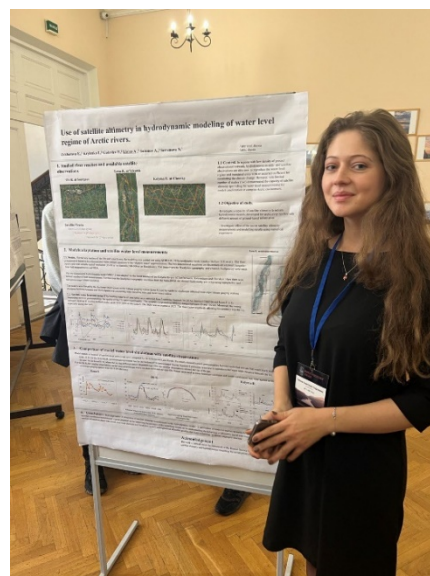


После перерыва начались секции: Гидрология полярных регионов – поддержка важнейшего направления глобальной политики и международного сотрудничества; Новые методы гидрологических расчетов и прогнозов. В рамках первой секции в режиме онлайн свой доклад «Understanding the December 2021 Extreme Precipitation Event in Interior Alaska Using the Arctic Region Reanalysis System» представил коллега из Японии Kazyoushi Suzuki.



Стендовая секция

После обеденного перерыва состоялась долгожданная стендовая секция! Самым обсуждаемым стендом стал доклад «Автоматизация измерения скоростей течения при мониторинге водных объектов» Артема Алексеевича Кацеры (МГУ, ИВП РАН).





Дружеский банкет и танцы

После стендовой секции участников конференции ожидал теплоход, где отмечали закрытие конференции награждениями за лучшие доклады, платья и прически, забитые голы..., танцами и пламенными речами!

Вообще организаторы конференции (и как нам кажется – большинство гидрологов) придерживаются мнения, что конференция без танцев – деньги и время на ветер.

Все начиналось чинно, но потом гидрологи разошлись! На банкет случайно попал один молодой геолог... после он признался, что не видел ничего подобного...





Экскурсия

13 октября, после конференции, состоялась экскурсия на Гидрологическую экспериментальную базу и Болотную станцию Ламин-Суо Государственного гидрологического института.



Присутствующие были ошеломлены масштабом гидрологических моделей и детальностью их проработки.

Далее мы посетили болотную станцию ГГИ Ламин-Суо.





После экскурсии был организован совместный обед!



Спонсоры

Мы благодарим всех, благодаря кому смогли состояться Пятые Виноградовские Чтения!



Группа модели
Гидрограф



Санкт-Петербургский
государственный
университет



Государственный
гидрологический
институт



ООО "Русловые процессы"
ООО «Русловые
процессы»



ООО НПО
«Гидротехпроект»



Планета-ИНФО



Администрация
Тенькинского
муниципального округа
Магаданской области



Правительство
Магаданской области



Полюс Золото

До новых встреч на Виноградовских Чтениях!

Содержание

Моделирование среднесуточного расхода малых и средних рек России с помощью методов глубокого машинного обучения, Д. В. Абрамов	1
От отрицательной турбулентной вязкости к отрицательному гидравлическому сопротивлению? А. М. Алабян	6
Численное моделирование замерзания воды в ледниковой трещине, М. М. Андреев, М. М. Степанова	12
Оценка изменения стока рек Восточной Сибири под влиянием изменения климата, Д. А. Андреева	18
Структура водопользования в городах России, Н. Д. Ахмерова, О. Н. Ерина*	23
Оценка доли ледникового стока в питании высокогорных рек Алтая с использованием изотопного метода, Д.В. Банцев, А. А. Овсепян, А.В. Козачек, К. Б. Чихачев	27
Разработка макета измерительной установки в LabVIEW для регистрации увеличения расходов воды и передачи информации по компьютерной сети, Ю. В. Безруких	31
Многолетняя изменчивость максимального стока рек бассейна Баренцева моря, В. А. Бирюкова, Л. С. Банщикова	38
Климатические изменения стока: есть ли методы выявления и учета? М.В. Болгов	44
Каталог ледниковых озер Киргизии, Таджикистана и Узбекистана, С. А. Бондарев, Д. А. Петраков	53
Обзор современных тенденций развития сетей гидрологических наблюдений, С.В. Бузмаков, А. В. Южно, А.А. Осташов, А. С. Лубенцов	58
Гидрологические характеристики большого молодого Богучанского водохранилища по данным полевых исследований 2021–2023 гг., А. Н. Василенко, В. Ю. Григорьев, И. А. Репина	64
Современное состояние исследований тепловых процессов в реках и термического режима рек в России и мире, А. Н. Василенко, Д.В. Магрицкий, Н. Л. Фролова	70
Межгодовые изменения качества вод р. Волга на различных участках, З. В. Волкова, Д.В. Ломова, Е.Р. Кременецкая	75
Организация сети гидрологических наблюдений на водосборах горных и предгорных рек, Е. В. Гайдукова, А. В. Плеханова, Н.А. Решин, И.О. Винокуров	80
Динамика озер в высокогорье горного массива Таван-Богдо- Ола (Алтай), Д. А. Ганюшкин	86
Активизация седей в верховьях бассейна р. Яна в июле 2022 года, Ю.В. Генсиоровский, В.А. Лобкина, Л. Е. Музыченко, А. А. Музыченко, М. В. Михалев	92
Анализ и прогноз высших заторных уровней воды на реке Печора в створе с Усть-Цильма, Н. И. Горошкова, А.В. Стриженок, Д. А. Семенова	97
Результаты исследования внутриводоемных процессов Ивановского водохранилища в различные годы и сезоны, М. Г. Гречушникова, И. Л. Григорьева*, Д. В. Ломова, Е. Р. Кременецкая, А. Б. Комиссаров, Л. П. Федорова, В. А. Ломов, Е. А. Чекмарева, Н. Ю. Панкова, П. Н. Терский	102
Приледниковые озёра в контексте проблемы несуществующих объектов, С. А. Грига, Г. В. Пряхина	108

Точность и однородность суточных сумм осадков на территории России по данным ERA5 , В. Ю. Григорьев, Н. Л. Фролова, М. Б. Киреева, В. М. Степаненко	112
Системное нормирование воздействий на водный объект: экологический статус водоема и его изменение при естественном и антропогенном воздействии , В. В. Дмитриев, В. Ю. Третьяков, Е.А. Примак, С.А. Седова, Е.А. Васькова, Е.С. Дудоркин, Н.А., Панютин, Э.В. Акулич	117
Гидрологические аномалии и закономерности донских половодий текущего столетия , В. А. Дмитриева, А. И. Сушков	123
О регуливающей роли подземного питания рек в формировании речного стока при изменении климата , С.А. Журавин, Е. В. Гуревич, М. Л. Марков	129
Моделирование стока с верхового болота с использованием сценариев изменения климата до 2060 года (на примере болота Ламмин-Суо) , А. Д. Журавлева, Т. В. Скороспехова, Л. С. Курочкина, Е.Н. Грек	135
Использование спутниковой альтиметрии в задачах гидродинамического моделирования уровня режима арктических рек , Е. А. Захарова, И. Н. Крыленко, П. П. Головлев, А.А. Лисина, А. А. Сазонов, Н. К. Семенова	141
Результаты исследований на научном стационаре Магаданской области , А. А. Землянскова, О. М. Макарьева, А.Н. Шихов, А.А. Остапов, Н. В. Нестерова	145
Комплексирование геофизических методов при изучении наледей , А. А. Землянскова, В. В. Оленченко, О.М. Макарьева, А.С. Калганов, А.А. Остапов, Н.В. Нестерова	152
Факторы, влияющие на динамику наледей в меняющемся климате, на примере Анмангындинской наледи , А. А. Землянскова, О. М. Макарьева, А.Н. Шихов	157
Моделирование уровня бессточного озера Чаны (Западная Сибирь) , А. Т. Зиновьев, О. В. Кондакова, А. В. Дьяченко, А.Н. Семчуков	161
Моделирование ледникового стока в условиях недостатка данных , Д. С. Зырянова, Г. В. Пряхина	166
Проблемы и опыт изучения опасных гидрологических событий в дельтах рек западного средиземноморья , М. В. Исупова, М. В. Михайлова, Е. Н. Долгополова	172
Первые результаты гидроэкологических исследований высокогорного озера Урасар (Республика Армения) , Л.Г Казарян, Л.Р. Гамбарян, И. В. Федорова, Г. Б. Федоров	178
Гидрологические последствия изменения климата в бассейне Ангары в 21 веке , А. С. Калугин, В. А. Гинзбург, И. Н. Крыленко, О.Н. Липка, О. В. Максимова, А.В.Мальнев, Ю. Г. Мотовилов, Н. О. Попова, А. П. Ревокатова	183
Моделирование стока Волги в период развития раннехвалынской трансгрессии Каспийского моря , А. С. Калугин, П. А. Морозова, Н. О. Попова	188
Закономерности распространения и морфометрические характеристики четковидных расширений русел в бассейне р. Бузудук , А. А. Камышев, А. М. Тарбеева	193
Автоматизация измерения скоростей течения при мониторинге водных объектов , А.А.Кацура, А.М.Алабян, В.М.Морейдо	199
Интеллектуальный анализ гидрологических данных: Влияние осенне-зимне-весенних температур и осадков на максимумы весенних половодий горных рек , Ю.Б. Кирста, И. А. Трошкова	205

Численное исследование условий осаждения взвеси в дельте Дона при нагонах, А. В. Клещенко, И.В. Шевердяев	211
Оценка факторов формирования притока весеннего половодья к водохранилищу Ириклинской ГЭС на р. Урал, Д. Е. Клименко	217
Подходы к определению модулей стока общего азота и фосфора с Российской части водосбора бассейна Балтийского моря, С.М. Клубов, В. Ю. Третьяков, В. В. Дмитриев, А.Р. Никулина	223
Проблемы устойчивого водопользования в бассейне реки Дон, Е. В. Колесникова, Т. С. Антоненко	229
Расчет и прогноз ледникового питания в речных бассейнах, В. Г. Коновалов	233
Влияние изменения климата и деградации оледенения на речной сток в высокогорной части бассейна р. Терек, Е. Д. Корнилова, И. Н. Крыленко, Е.П. Рец, Ю. Г. Мотовилов, И. А. Корнева, Т. Н. Постникова (Дымова), О.О. Рыбак	239
Загрязнение водных объектов в бассейне Дона сточными и возвратными водами и диффузным стоком с водосборов, Н.И. Коронкевич, Г. М. Черногаева, С. В. Долгов, Е. А. Барабанова, Е.А. Кашутина	245
Деление расхода воды по рукавам при разветвлении русла в лабораторных условиях, Е. М. Кривошеина, И. В. Вахрушев, Н.А. Саноцкая	249
Опыт расчёта притока талой воды к озеру Лоу (оазис Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида), М. Р. Кузнецова, Г. В. Пряхина	253
Внезапные ливневые паводки на Черноморском побережье Западного Кавказа и Крыма, Л.В. Куксина, В.Н. Голосов, П. А. Белякова, Е. Ю. Жданова, М. М. Иванов, А. С. Цыпленков, А. Л. Гуринов	257
Определение параметров излучин чётковидных русел на примере реки Кардаил (север Волгоградской области), А. А. Куракова, А. М. Тарбеева, В. В. Сурков	263
Подземные воды надмерзлотных субаэральных таликов и формирование речного стока в бассейне р. Шестаковка, Центральная Якутия, Л. С. Лебедева, В.В. Шамов	268
Сток воды с каменных глетчеров северного Тянь-Шаня, Республика Казахстан, Л. С. Лебедева, В. В. Гончаренко, В.М. Лыткин	273
Измерения расходов воды и учет водного стока в приливной устьевой области Северной Двины, С. В. Лебедева, Л.С. Одоев, Е.Д. Панченко, А.М. Алабян, Н.А. Демиденко, М. Льюменс, Л.А. Турыкин	279
Динамика стока Колымы в XXI веке под влиянием меняющегося климата, А.А. Лисина, А. А. Сазонов, И. Н. Крыленко, А. С. Калугин, Н. Л. Фролова	285
Применение трёхмерной модели для изучения распределения термодинамических и биохимических параметров во внутренних водоемах, В. А. Ломов, Д.С. Гладских, Е.В. Мортиков, Е. Е. Андросова, А. Ф. Селезнев, А. В. Законнова, В. И. Лазарева	291
Гидрологические риски небольших регионов в неустойчивых климатических условиях (на примере Беларуси), П.С. Лопух, А. А. Волчек, Ю.А. Гледко, О.О. Ровдо	296
Изменчивость гигантских наледей Северо-Востока в исторический период и современном климате, О. М. Макарьева, А.Н. Шихов, А. А. Землянскова, Н. В. Нестерова, А.А. Остапов, В. Р. Алексеев	303
Разработка методики краткосрочного прогноза гидрографов стока на основе метеорологической модели WRF и гидрологической модели Гидрограф на	308

примере рек Магаданской области, О. М. Макарьева, А. А. Землянскова, Н. В. Нестерова	
Движение меандра реки в условиях подвижки земной коры, О. Я. Масликова, И.И. Грищук	312
Исследование особенностей обводнения верхней части дельты Волги на основе двумерной гидродинамической модели, Д. А. Мигунов, П.Н. Терский, О.В. Горелиц	317
Подход к изучению деформаций русел полугорных рек (на примере рек бассейнов Кубани и Черного моря), Н. М. Михайлова, Л.А. Турыкин, Д.В. Ботавин	322
Долгосрочный ансамблевый прогноз стока весенне-летнего половодья в устье Печоры, В.М. Морейдо, К. И. Головнин	328
Современное состояние государственной гидрологической сети наблюдений в Арктической зоне РФ, О.В. Муждаба, А. В. Штанников, М. В. Третьяков	334
Особенности формирования и развития таликов на примере оазиса Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида), А. В. Немчинова, С. В. Попов, А.С. Боронина, Л.С. Лебедева, А.С. Бирюков	340
Исследование влияния добычи россыпного золота на формирование стока рек Магаданской области. Предварительные результаты, П. А. Никитина, О. М. Макарьева, А.Н. Шихов, А. А. Землянскова	349
Применение изотопного метода в горной гидрологии на примере озера Таможенное, Южно-Чуйский хребет, А. А. Овсепян, Д.В. Банцев	352
Пространственная изменчивость характеристик ледяного покрова Рыбинского водохранилища зимой 2022 года, О. В. Овчинникова, Н. Л. Фролова, А.А. Виногооров, Н. А. Петров	356
Маленькими шагами к большой науке, А.А. Осмоловская, А. В. Пименов, В. К. Герасимов, А. А. Роскова, С. А. Беляев	362
Гидродинамический режим гиперприливного эстуария малой реки Сёмжи: возможности 1D и 2D моделирования, Е. Д. Панченко, Т. А. Федорова	368
Шум потока как индикатор речного стока, А.Д. Пнюшков, С.В. Бузмаков, А. В. Юхно	373
Источники и механизмы поступления взвешенных наносов в дельту р. Лены, К.Н. Прокопьева, А. М. Тарбеева, С.Р. Чалов	379
Современные изменения стока рек Средней Сибири, Д.А. Прысов, А. В. Мусохранова	385
Содержание хлорофилла а в вегетационный сезон в Можайском водохранилище в 2012–2022 гг., Е. Д. Птицына, О. Н. Ерина	391
Оценка характеристик затопления в бассейне реки Томи при изменениях климатических факторов, А. Д. Разаренова, И. Н. Крыленко	396
Математическое моделирование прорывных паводков, образующихся при прорывах моренных озёр, В. А. Распутина, Г. В. Пряхина	402
Влияние городской инфраструктуры левобережья г. Томска на речную гидравлику р. Томь по результатам моделирования, Р. В. Романовский	409
Изменения крупнейших приледниковых озер Шпицбергена на рубеже XX и XXI вв., К. В. Ромашова, Р. А. Чернов	415
Современное гидролого-экологическое состояние озер залива Гренфьорд, К. В. Ромашова, И. И. Василевич, В.А. Брызгало, М. В. Третьяков	421
Статус и границы устьевых областей арктических рек, Е. В. Румянцева, О.В. Муждаба, М. В. Третьяков	427

Динамика подземного стока рек бассейна Северной Двины, А. А. Сазонов, В. Ю. Григорьев, О. М. Пахомова, Н. Л. Фролова	432
Использование модели HBV для оценки максимальных расходов воды, В. С. Салпанова	438
Разработка физико-статистической модели для прогноза половодья с использованием данных пространственно распределенных моделей атмосферных осадков (на примере реки Чумыш), С. Ю. Самойлова, О.В. Ловцкая, А.В. Кудишин	444
К вопросу об управлении рекреационными ресурсами прибрежных зон рек, озер и водохранилищ, А. Ю. Санин	450
Оценка трендов и силы корреляционной связи количества атмосферных осадков и объема стока рек на Окско-Донской низменной равнине, А. В. Семенова, М. Е. Буковский	455
Система среднесрочного прогнозирования стока рек России, Н. К. Семенова, Ю. А. Симонов, А. В. Христофоров	461
Анализ гидрологических условий как основа для выполнения прогноза развития русловых деформаций на примере реки Амур, О. А. Серова*, М.С. Хамитов, Н. С. Бакановичус, А. А. Лялина, А. А. Максимова, Д. Д. Тесленко, А. В. Пучкарюс	466
Особенности построения системы регламентации отведения взвешенных веществ в поверхностные водные объекты на основе учета стохастического характера их динамики, Т. Н. Синцова, А.П. Лепихин	472
Определение интенсивности изменения климата для более эффективных адаптационных действий в бассейне Аральского моря, В. И. Соколов, Б. Б. Алиханов	478
Параметризация химического стока городской реки Сетуни, Д. И. Соколов, М.А. Терешина, О. Н. Ерина	485
Оценка выноса основных загрязняющих веществ через замыкающий створ реки Сетунь, С. С. Соловьева, Л. Е. Ефимова, М.А. Терешина, О. Н. Ерина, Д. И. Соколов	491
Динамика снегозапасов в лесу и поле при современном климате, А.В. Сосновский, Н. И. Осокин	496
Оценка соблюдения нормативов допустимого воздействия на водные объекты бассейнов крупных рек севера европейской части России, А. А. Строков	501
Структура водосборов озер Беларуси как фактор их гидрохимического режима, Н. Ю. Суховило	507
Особенности калибровки пространственно-распределенной модели стока ЕСОМАГ для реки с преимущественно дождевым питанием, З. А. Сучилина, Б.И. Гарцман	513
Трансформация засушливых условий на территории Беларуси в период изменения климата, И. В. Тарасевич, Ю.А. Гледко, И. С. Данилович	518
Оценка скорости подледникового таяния Антарктиды на основе одномерной мультифазной модели, А. А. Тарасов, М. М. Степанова	524
Гидрологические наблюдения на четкообразных степных реках севера Волгоградской области, А. М. Тарбеева, И. В. Крыленко, В. В. Сурков, Н.М. Михайлова	530
Расчет многолетних характеристик речного притока к эстуариям рек Большая-Быстрая и Авъеваям для разработки стратегии защиты инфраструктуры	535

поселков Октябрьский и Корф на Камчатке, Терский П.Н., Жбаков К.К., Землянов И. В., Горелиц О.В., Мигунов Д. А., Панасенкова И. И., Фатхи М.О., Фомин В. В.	
Эмиссия метана из Зейского водохранилища в маловодных и многоводных условиях по данным натурных исследований 2021–2022 гг., П.Н. Терский, С. Л. Горин, С. А. Агафонова, И. А. Репина	541
Оценка уязвимости карстовых подземных вод к загрязнению: сравнительный анализ результатов применения различных методик на примере массива Ай-Петри (Горный Крым), С. В. Токарев	547
Установление границ подземно-карстовых водосборов в верховьях р. Бельбек (Горный Крым) методом трассерных экспериментов, С. В. Токарев, Г.Н. Амеличев, А.И. Середа, Е.В. Брага	553
Моделирование речной сети на основе цифровой модели рельефа (на примере Черноморского побережья Кавказа), В. Ф. Толкачева, Б.И. Гарцман	558
Результаты изучения состава и свойств грунтов селевых отложений в зоне многолетнемерзлых пород, Н. Н. Ухова, Ю.В.Генсиоровский	564
Методика георадиолокационного исследования ледяного покрова различного строения на затороопасных участках северных рек, М. П. Фёдоров, Л. Л. Федорова	570
Гидроэкологическое состояние озер национального парка «Русский Север» весной 2023 г., И. В. Фёдорова, Л. В. Кузнецова, М. Р. Кузнецова, А. В. Шорникова, А.Е. Оразалин, У. В. Гусельникова, С.С. Свирепов, А. А. Землянскова, П.С. Зеленковский	575
Использование данных реанализа для восстановления характеристик стока таежных рек в бассейне Енисея, Е. В. Федотова, И. В. Данилова, Т. А. Буренина	581
Международное управление водными ресурсами, Н. Л. Фролова	586
Оценка изменений гидрологического режима, потоков макрокомпонентов и органических веществ в системе болото-река в таежной зоне Западной Сибири под влиянием осушения и пирогенного фактора, Ю. А. Харанжевская	592
Аэрозоли и твердые частицы как приоритетные загрязнители водных объектов городских природных комплексов, А. П. Хаустов, М.М. Редина, А. С. Нартов, А.Ю. Тронец	597
Использование тяжелых изотопов кислорода и водорода в качестве естественных трассеров для определения доли талого стока в бассейне горной реки, В. А. Хомякова, Е.П. Рец, Е. Д. Корнилова, А.В. Козачек, А.А. Екайкин	603
Математическое моделирование кислородного обмена между атмосферой и озером во время развития термобара, Б. О. Цыденов	609
О надежности оценок лавинной опасности, П. А. Черноус	614
Гидрохимический портрет экстремального дождевого паводка на малых водосборах южного Сихотэ-Алиня, Дальний Восток России, Шамов В.В., Луценко Т. Н., Болдескул А.Г., Гарцман Б.И., Лупаков С.Ю., Губарева Т. С., Кожевникова Н. К., Юрченко С. Г.	620
Условия образования непромерзающих озеровидных расширений в четковидных руслах малых рек криолитозоны, Республика Саха (Якутия), В.В. Шамов, А. М. Тарбеева, Л. С. Лебедева, В. С. Ефремов	626
Паводки и осадки на реках Северо-Западного Кавказа в 1970–2022 годах, растут или падают? И.В. Шевердяев, С.В. Веневский	632

Геоморфологические признаки изменения водности рек Приморья в позднем голоцене, Е. А. Шекман	638
MNDWI и интенсивность затопления как геоэкологические показатели изменения окружающей среды аллювиальных маршей Аль-Ховиза юго-восточного Ирака, В. А. Широкова, Х. Х. Аль-Нуссаири, В. И. Нилиповский	642
Современные особенности формирования маловодий в бассейнах Дона и Урала, И. О. Ширшова	650
Загрязнение Чудско-Псковского озера биогенными веществами (по данным за 2003–2020 гг.), К.А. Шихирина, О.В. Задонская	656
Спутниковое картографирование негативного воздействия золотодобывающих предприятий на природную среду криолитозоны (на примере Магаданской области), А.Н. Шихов, П. Г. Илюшина, О. М. Макарьева, А. А. Землянскова	662
Расчет снегонакопления в бассейне р. Камы на основе глобальных моделей численного прогноза погоды и реанализа, А.Н. Шихов, Е. В. Пищальникова, Н.А. Калинин	668
Последствия потенциального прорывного паводка и селевого потока в долине р. Хозгуни (Памир) по результатам сценарного моделирования, В. А. Юдина, С.С. Черноморец, В. М. Кидяева, К. С. Висхаджиева, И. В. Крыленко, Е.А. Савренюк, А.Г. Гуломайдаров, И.И. Зикиллобеков, У.Р.Пирмамадов, Ю.Х. Раимбеков	673
Моделирование прорыва озера Бирджал-Чиран-2006–5 в 2006 году на северо-восточном склоне г. Эльбрус, В. А. Юдина, В. М. Кидяева, С.С. Черноморец, И. В. Крыленко	678
Оценка возможности прогнозирования характеристик заторов льда на основе методов машинного обучения (на примере реки Сухоны), Цуй Юйсюань, Н. Л. Фролова, Н. К. Семенова	682
Динамика стока реки Охта в районе г. Мурино, А.А. Ярмалоян, Е. С. Урусова	686

Content

Modelling the average daily flow of small and medium-sized rivers of Russia using deep machine learning methods , D. V. Abramov	1
From the negative turbulent viscosity toward the negative hydraulic resistance? A.M. Alabyan	6
Numerical simulation of water freezing in a glacial crack , M.M. Andreev, M.M. Stepanova	12
Assessment of river flow change under the influence of climate change in Eastern Siberia , D.O. Andreeva	18
Structure of water use in Russian cities , N. Akhmatova, O. Erina	23
Estimation of glacier meltwater share in runoff of high- mountainous rivers in the Altai mountains using the isotope method , D.V. Bantcev, A.A. Ovsepyan, A.V. Kozachek, K.B. Chikhachev	27
Development of a layout of a measuring unit in LabVIEW for recording an increase in water consumption and transmitting information over a computer network , J.V. Bezrukikh	31
Long-term variability of the maximum drain of rivers in the Barents Sea basin , V.A. Biryukova, L.S. Banshchikova	38
Climatic changes in runoff: are there methods of identification and accounting? M.V. Bolgov	44
Catalog of glacial lakes Kyrgyzstan, Tajikistan and Uzbekistan , S.A. Bondarev, D.A. Petrakov	53
Review of current trends in hydrological observation networks development , S.V. Buzmakov, A.V. Iukhno, A.A. Ostashov, A.S. Lubentsov	58
Hydrological characteristics of the large young Boguchanskoye reservoir according to the data of field studies 2021-2023 , A.N. Vasilenko, V.Yu. Grigorev, I.A. Repina	64
The current state of studies of thermal processes in rivers and thermal regime of rivers in Russia and all over the world , A.N. Vasilenko, D.V. Magritskiy, N.L. Frolova	70
Long-term variations of the water quality characteristics of the Volga River , Z.V. Volkova, D.V. Lomova, E.R. Kremenetskaya	75
Organization of a network of hydrological observations at the watersheds of mountain and foothill rivers , E.V. Gaidukova, A.V. Plekhanova, N.A. Reshin, I.O. Vinokurov	80
Dynamics of lakes in the highlands of the Tavan-Bogdo mountain range (Altai) , D.A. Ganyushkin	86
Activation of mudflows in the upper reaches of the Yana River basin in July 2022 , Yu.V. Gensiorovskiy, V.A. Lobkina, L.E. Muzychenko, A.A. Muzychenko, M.V. Mikhalev	92

Analysis and forecast of the highest jam water levels at the Pechora River – village Ust-Tsilma , N.I. Goroshkova, A.V. Strizhenok, D.A. Semenova	97
The results of the study of internal processes of the Ivankovskoye reservoir in different years and seasons , M.G. Grechushnikova, I. L. Grigoryeva *, D.V. Lomova, E.R. Kremenetskaya, A.B. Komissarov, L.P. Fiodorova, V.A. Lomov, E.A. Chekmareva, N.U. Pankova, P.N. Terskiy	102
Glacial lakes in the context of the problem of non-existent objects , S.A. Griga*, G.V. Pryakhina	108
Accuracy and homogeneity of ERA5 precipitation dataset over Russia , V. Yu. Grigorev, N. L. Frolova, M. B. Kireeva, V.M. Stepanenko	112
System regulation of impacts on a water body: the ecological status of a reservoir and its change under natural and anthropogenic impacts , V.V. Dmitriev, V.Yu. Tretyakov, E.A. Primak, S.A. Sedova, E.A. Vaskova, E.S. Dudorkin, N.A. Panyutin, E.W. Akulich	117
Hydrological anomalies and regularities of the Don floods of the current century , V.A. Dmitrieva, A.I. Sushkov	123
On the regulatory role of underground river feeding in the formation of river runoff under climate change , S.A. Zhuravin, E.V. Gurevich, M.L. Markov	129
Simulation of runoff from the ombrotrophic mire based on climate change scenarios up to 2060 (using the example of the Lammin-Suo peatland) , A.D. Zhuravleva, T.V. Scorospekhova, L.S. Kurochkina, E.N. Grek	135
Use of satellite altimetry in hydrodynamic modeling of water level regime of the Arctic rivers , E. Zakharova, I. Krylenko, P. Golovlev, A. Lisina, A. Sazonov, N. Semenova	141
Results of research at the scientific observation station of the Magadan region , A.A. Zemlianskova, O.M. Makarieva, A.N. Shikhov, A.A. Ostashov, N.V. Nesterova	145
Integration of geophysical methods in the research of aufeis , A.A. Zemlianskova, V.V. Olenchenko, O.M. Makarieva, A.S. Kalganov, A.A. Ostashov, N.V. Nesterova	152
Factors influencing the dynamics of aufeis in a changing climate, on the example of the Anmangynda aufeis , A.A. Zemlianskova, O.M. Makarieva, A.N. Shikhov	157
Modeling of water level of closed Lake Chany (Western Siberia) , A.T. Zinoviev, O.V. Kondakova, A.V. Dyachenko, A.N. Semchukov	161
Glacial runoff modeling in the absence of data , D. S. Zyryanova, G. V. Pryakhina	166
Problems and experience of studying dangerous hydrological events in the river deltas of the Western Mediterranean , M.V. Isupova, M.V. Mikhailova, E.N. Dolgopolova	172
The first results of alpine Lake Urasar hydroecological studies (Republic of Armenia) , L.H. Ghazaryan, L.R. Hambaryan, I.V. Fedorova, G.B. Fedorov	178

Hydrological impacts of climate change in the Angara basin in the 21st century, A.S. Kalugin, V.A. Ginzburg, I.N. Krylenko, O.N. Lipka, O.V. Maximova, A.V. Malnev, Y.G. Motovilov, N.O. Popova, A.P. Revokatova	183
Modeling of the Volga River flow during the development of the early Khvalyn transgression of the Caspian Sea, A.S. Kalugin, P.A. Morozova, N.O. Popova	188
Distribution and morphometry of beaded-shape channel extensions in the Buzuluk River basin, A.A. Kamyshev, A.M. Tarbeeva	193
The data of paired catchments for the hydrograph model parametrization in the Kama reservoir basin, A.A. Katsura, A.M. Alabyan, V.M. Moreido	199
Deep mining of hydrological data: The influence of autumn- winter-spring temperatures and precipitation on spring flood maximums in mountain rivers, Y.B. Kirsta, I.A. Troshkova	205
Numerical study of the conditions of sedimentation of suspended matter in the Don delta during surges, A.V. Kleshchenkov, I.V. Sheverdyayev	211
Estimation of the Factors of Formation of the Spring Flood Inflow to the Reservoir of the Iriklienskaya HPP on the Ural River, D.Y. Klimenko	217
Approaches for evaluation of the total nitrogen and phosphorus unit discharges from Russian part of the Baltic Sea catchment area, S.M. Klubov, V.Yu. Tretyakov, V.V. Dmitriev, A.R. Nikulina	223
Problems of sustainable water use in the Don River Basin, E.V. Kolesnikova, T.S. Antonenko	229
Calculation and Forecast of Glacial Feeding in River Basins, V.G. Konovalov	233
River flow in the glaciated high-mountainous basin under changing climatic conditions (a case study of the high-mountain part of the Terek River basin), E.D. Kornilova, I.N. Krylenko, E.P. Rets, Yu.G. Motovilov, I.A. Korneva, T.N. Postnikova (Dymova), O.O. Rybak	239
Pollution of water bodies in the Don River basin by sewage, return waters and diffuse runoff from catchments, N.I. Koronkevich, G.M. Chernogaeva, S.V. Dolgov, E.A. Barabanova, E.A. Kashutina	245
Division of water flow along the sleeves in a branching channel in laboratory conditions, E.M. Krivosheina, I.V. Vakhrushev, N.A. Sanotskaya	249
Experience in calculating of the meltwater inflow to Low Lake (the Larsemann Hills, East Antarctica), M.R. Kuznetsova, G.V. Pryakhina	253
Flash floods in the Black Sea Coast of the Western Caucasus and Crimea, L.V. Kuksina, V.N. Golosov, P.A. Belyakova, E.Yu. Zhdanova, M.M. Ivanov, A.S. Tsyplenkov, A.L. Gurinov	257
Meanders morphometry of the beaded-shape channel of the Kardail River (north of the Volgograd region), A.A. Kurakova, A.M. Tarbeeva, V.V. Surkov	263
Groundwater of suprapermafrost subaerial taliks and the formation of river streamflow in the Shestakovka watershed, Central Yakutia, L.S. Lebedeva, V.V. Shamov	268

Water flow from rock glaciers in the northern Tien Shan, Republic of Kazakhstan , L.S. Lebedeva, V.V. Goncharenko, V.M. Lytkin	273
Flow discharge measurements in the Northern Dvina tidal estuary , S.V. Lebedeva, L.S. Odoev, E.D. Panchenko, A.M. Alabyan, N.A. Demidenko, M. Leummens, L.A. Turikin	279
Variations of the Kolyma runoff in the XXI century under the changing climate conditions , A.A. Lisina, A.A. Sazonov, I.N. Krylenko, A.S. Kalugin, N.L. Frolova	285
Application of a three-dimensional model to study the distribution of thermodynamic and biochemical parameters in inland waters , V.A. Lomov, D.S. Gladskikh, E.V. Mortikov, E.E. Androsova, A.F. Seleznev, A.V. Zakonnova, V.I. Lazareva	291
Hydrological risks of small regions under unstable climatic conditions (by the example of Belarus) , P. Lopuch P., A. Volchak A., O. Rovdo	296
Variability of giant aufeis of the Northeast in the historical period and modern climate , O.M. Makarieva, A.N. Shikhov, A.A. Zemlianskova, N.V. Nesterova, A.A. Ostashov, V.R. Alexeev	303
Short-term forecast of streamflow based on the WRF meteorological model and the Hydrograph hydrological model by the example of mountainous rivers in the Magadan region , O.M. Makarieva, A.A. Zemlianskova, N.V. Nesterova	308
The movement of the meander of the river in the conditions of the movement of the earth's crust , O.Ya. Maslikova, I.I. Gritsuk	312
Hydraulic features of the upper Volga delta inundation and flow distribution – the study, based on two-dimensional model , D.A. Migunov, P.N. Terskii, O.V. Gorelits	317
Approach to studying the deformations of the channels of semi- mountain rivers (the case of the rivers of Kuban and Black Sea basins) , N.M. Mikhailova, L.A. Turykin, D.V. Botavin	322
Long-range ensemble forecast of floods in the Pechora River mouth , V.M. Moreydo, K.I. Golovnin	328
Current status of the state hydrological observation network in the Arctic zone of the Russian Federation , O.V. Muzhdaba, A.V. Shtannikov, M.V. Tretiakov	334
Features of the formation and development of taliks on the example of the Larsemann Hills Oasis (East Antarctica) , A.V. Nemchinova, S.V. Popov, A.S. Boronina, L.S. Lebedeva, A.S. Biryukov	340
Researching of the influence of placer gold mining on the formation of river flow in the Magadan region. Preliminary results , P.A. Nikitina, O.M. Makarieva, A. N. Shikhov, A.A. Zemlianskova	349
Application of the isotope method in mountain hydrology on the example of the lake Tamozhennoe of the South Chui ridge , A.A. Ovsepyan, D.V. Bantsev	352
Spatial variability of characteristics of the ice cover of the Rybinsky reservoir in winter 2022 , O.V. Ovchinnikova, N.L. Frolova, A.A. Vinogorov, N.A. Petrov	356

Small steps towards big science , A.A. Osmolovskaya, A.V. Pimenov, V.K. Gerasimov, A.A. Roskova, S.A. Belyaev	362
Hydrodynamic regime of the Syomzha hypertidal estuary: possibilities of 1D and 2D modelling , E.D. Panchenko, T.A. Fedorova	368
Flow noise as an indicator of river flow , A.D. Pnushkov, S.V. Buzmakov, A.V. Iukhno	373
Sources and mechanisms of suspended sediment delivery to the Lena River Delta , K.N. Prokopenko, A.M. Tarbeeva, S.R. Chalov	379
Modern changes in the flow of rivers in Central Siberia , D.A. Prysov, A.V. Musokhranova	385
Chlorophyll a content during the vegetable season in the Mozhaisk reservoir in 2012-2022 , E.D. Ptitsyna, O.N. Erina	391
Flooding characteristics assessment under climate change in the Tom River basin , A.D. Razarenova, I.N. Krylenko	396
Mathematical modelling of outburst floods formed during of moraine-dammed lakes outbursts , V.A. Rasputina, G.V. Prykhina	402
Influence of urban infrastructure of the Tomsk city on the Tom River left bank hydraulics according to the modeling results , R.V. Romanovskiy	409
Changes in the major glacial lakes of Spitzbergen (Svalbard) at the turn of the XX and XXI centuries , K.V. Romashova, R.A. Chernov	415
The modern hydro-ecological statement of Gronfjord bay lakes , K.V. Romashova, I.I. Vasilevich, V.A. Bryzgalov, M.V. Tretyakov	421
Status and boundaries of the Arctic rivers estuarine area , E.V. Rumiantseva, O.V. Muzhdaba, M.V. Tretyakov	427
Dynamics of groundwater flow in the rivers of the Northern Dvina basin , A.A. Sazonov, V.Yu. Grigoriev, O.M. Pakhomova, N.L. Frolova	432
Using the HBV model to estimate the maximum water discharges , V.S. Salpanova	438
Development of a physical-statistical model for forecasting the Chumysh River floods using data from spatially distributed precipitation models , S.Yu. Samoilova, O.V. Lovtskaya, A.V. Kudishin	444
On the issue of the management of recreational resources of coastal zones of rivers, lakes and reservoirs , A.Y. Sanin	450
Assessment of trends and correlation strength between the amount of atmospheric precipitation and the river runoff volume in the Oka-Don lowland plain , A.V. Semenova, M.E. Bukovskiy	455
Medium-range streamflow forecasting system in Russia , N.K. Semenova, Yu.A. Simonov, A.V. Khristoforov	461
Analysis of hydrological conditions as a basis for forecasting the development of channel deformations on the example of the Amur River , Olga A. Serova, Maxim S. Khamitov, Natalya S. Bakanovichus, Anna A. Lialina, Anna A. Maksimova, Daniil D. Teslenko, Alena V. Puchkaryus	466

Features of building a system for regulating the discharge of suspended solids into surface water bodies on the basis of taking into account the stochastic nature of their dynamics, T.N. Sintsova, A.P. Lepikhin	472
Determination of Climate Change Intensity for better Adaptation Actions in the Aral Sea Basin, V.I. Sokolov, B.B. Alikhanov	478
Parameterization of chemical flux of the urban Setun river, D.I. Sokolov, M.A. Tereshina, O.N. Erina	485
Estimation of the removal of the main pollutants through the mouth cross-section of the Setun River, S. Soloveva, L. Efimova, M. Tereshina, O. Erina, D. Sokolov	491
Dynamics of snow storages in forests and fields in the modern climate, A.V. Sosnovsky, N.I. Osokin	496
Assessment of compliance with norms of permissible impact on water bodies of major river basins in the north of European Russia, A.A. Stokov	501
The structure of catchments of lakes in Belarus as a factor of their hydrochemical regime, N.Yu. Sukhovilo	507
Calibration specifics of the spatially distributed runoff model ECOMAG for a river with the predominantly rain-fed regime, Z.A. Suchilina, B.I. Gartsman	513
Transformation of arid conditions on the territory of Belarus during the period of climate change, I.V. Tarasevich, Yu.A. Hledko, I.S. Danilovich	518
Estimation for the basal melt of Antarctica based on one- dimensional multiphase model, A.A. Tarasov, M.M. Stepanova	524
Hydrological observations on the beaded-shape steppe rivers in the north of the Volgograd region, A.M. Tarbeeva, I.V. Krylenko, V.V. Surkov, N.M. Mikhailova	530
Inflow calculations for the estuaries of Bolshaya-Bystraya and Aveyevayam rivers with the aim of safeguarding the infrastructure of Oktyabrsky and Korf settlements (Kamchatka, Russia), Terskii P, Zhbakov K, Zemlyanov I, Gorelits O, Migunov D, Panasenkova I, Fatkhi M, Fomin V	535
Methane emissions from the Zeya reservoir (Russia) in low-water and high-water conditions according to field surveys in 2021-2022, P. Terskii, S. Gorin, S. Agafonova, I. Repina	541
The assessment of karst groundwater vulnerability to contamination: comparative analysis of different methods application at the Ai-Petri massif (Mountainous Crimea) as example, S.V. Tokarev	547
Determination of the karst underground watersheds boundaries in the upper reaches of the Belbek river (Mountainous Crimea) by tracing experiments, S.V. Tokarev, G.N. Amelichev, A.I. Sereda, E.V. Braga	553
Modeling of the river network based on a digital relief model (by the example of the Black Sea coastline of the Caucasus), V.F. Tolkacheva, B.I. Gartsman	558
Results of the study of composition and properties of soils of mudflow deposits in the cold climate zone, N. N. Ukhova, Yu. V. Gensiorovskiy	564

Method of GPR research of ice cover of different structure at flood-prone areas of northern rivers , M.P. Fedorov, L.L. Fedorova	570
Hydroecological state of lakes of the National Park “Russian North” in spring 2023 , I.V. Fedorova., L.V. Kuznetsova, M. P. Kuznetsova, A.V. Shornikova, A.E. Orazalin, U.B. Guselnikova, C.C. Svirepov, A.A. Zemlyanskova, P. S. Zelenkovskii	575
Using Reanalysis Data to Reconstruct the Characteristics of the Runoff of Taiga Rivers in the Yenisei Basin , E.V. Fedotova, I.V. Danilova, T.A. Burenina	581
Water Resources Management in the world , T.S. Frolova	586
Assessment of forestry drainage and wildfire-related changes of the water regime, major elements and organic substances release though the bog-river system in the taiga zone of Western Siberia , Yu. A. Kharanzhevskaya	592
Aerosols and Particulate Matter as Priority Pollutants of Water Bodies of Urban Natural Complexes , A.P. Khaustov, M.M. Redina, A.S. Nartov, A.Yu. Tronets	597
Tracing glacial runoff contribution using stable water isotopes on the mountain catchment , V.A. Khomiakova, E.P. Rets, E.D. Kornilova, A.V. Kozachek, A.A. Ekaykin	603
Mathematical modeling of oxygen exchange between air and water during the thermal bar , B.O. Tsydenov	609
On the reliability of avalanche risk assessments , P.A. Chernous	614
Evaluating hydrochemical performance of a rain super-flood generation in small catchments, South Sikhote-Alin Mountains, Pacific Russia , Shamov V.V., T.N. Lutsenko, Boldeskul A.G., Gartsman B.I., Lupakov S.Yu., Gubareva T.S., Kozhevnikova N.K., Yurchenko S.G.	620
Settings of formation of non-freezing lake-like extensions in beaded streams in cryolithozone, Republic of Sakha (Yakutia) , V.V. Shamov, A.M. Tarbeeva, L.S. Lebedeva, V.S. Efremov	626
The floods and rainfall of Northwest Caucasus rivers in 1970- 2022, increase or decrease? I.V. Sheverdyayev, S.V. Venevsky	632
Geomorphological signs of changes in the water regime of the Primorye rivers in the Late Holocene , E.A. Shekman	638
MNDWI and inundation intensity as geocological indicators of environmental change in the Al-Howiza alluvial marshes of southeastern Iraq , V. A. Shirokova, H. K. Al-Nussairi, V. I. Nilipovsky	642
Modern features of low flow formation in the basins of Don and Ural , I.Y. Shirshova	650
Lake Peipus nutrients pollution in 2003-2020 , K.A. Shikhirina, O.V. Zadonskaya	656
Satellite-based mapping of the impact of gold mining enterprises on the natural environment of the permafrost zone (on the example of the Magadan region) , A.N. Shikhov, P.G. Ilyushina, O.M. Makarieva, A.A. Zemlianskova	662

Calculation of snow accumulation in the Kama River basin according to the data of global numerical weather prediction models and reanalysis , A.N. Shikhov, E.V. Pischalnikova, N.A. Kalinin	668
Consequences of a potential GLOF and debris flow in Khozguni River valley (Pamir): simulation results , V.A. Iudina, S.S. Chernomorets, V.M. Kidyaeva, K.S. Viskhadzhieva, I.V. Krylenko, E.A. Savernyuk, A.G. Gulomaydarov, I.I. Zikillobekov, U.R. Pirmamadov, Yu.Kh. Raimbekov	673
Modeling of Lake Birjal-Chiran-2006–5 outburst in 2006 on the northeastern slope of Elbrus , V.A. Iudina, V.M. Kidyaeva, S.S. Chernomorets, I.V. Krylenko	678
Possibility of ice-jams parameters prediction using machine learning methods (case study of the Sukhona river) , Cui Yuxuan, N.L. Frolova, N.K. Semenova	682
Dynamics of the flow of the Okhta River in the area of Murino , A.A. Yarmaloyan, E.S. Urusova	686

Моделирование среднесуточного расхода малых и средних рек России с помощью методов глубокого машинного обучения

Д.В. Абрамов

*Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия
Сколковский институт науки и технологий, г. Москва, Россия
dmbrmv96@gmail.com*

Аннотация. В работе произведено сравнение качества моделирования характеристики среднесуточного значения модуля стока для малых и средних водосборов на территории России с помощью методов глубокого обучения и концептуальных гидрологических моделей HBV и GR4J.

Ключевые слова: гидрологическое моделирование, нейронные сети, LSTM, концептуальные гидрологические модели.

Modelling the average daily flow of small and medium-sized rivers of Russia using deep machine learning methods

D. V. Abramov

*State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia
Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia
dmbrmv96@gmail.com*

Abstract. The work compares the quality of modelling the characteristics of the average daily runoff module for small and medium-sized catchments in Russia using deep learning methods and conceptual hydrological models HBV and GR4J.

Keywords: hydrological modelling, neural networks, LSTM, conceptual hydrological models.

Введение

Моделирование речного стока является важной научно-практической задачей, надежное решение которой является залогом устойчивого развития водохозяйственного сектора и связанных с ним производственных отраслей, своевременного предупреждения стихийных бедствий, экономических издержек и человеческих жертв.

Особо острой проблема применения классических методов моделирования является для малых и средних рек с дефицитом данных наблюдений. Закрывание пунктов наблюдений, как гидрологических, так и метеорологических затрудняет и получение необходимых данных для решения задачи моделирования стока с помощью физико-математических моделей и построение регрессионных уравнений, лежащих в основе зависимостей осадки-сток, что приводит к ошибкам при решении задач гидрологического моделирования.

Помимо этого, изменения климатического режима также вносят свой вклад в получаемые ошибки. Региональные коэффициенты уравнений, полученные на метеорологических и гидрологических данных при одних условиях, не могут описывать зависимости в динамически меняющейся системе.

Существенный прогресс в решении данной задачи может быть достигнут благодаря использованию современных баз данных метеорологических и физико-географических характеристик [8], а также современных методов глубокого машинного обучения [9]. Построение статистических обобщений на большой выборке гидрологических объектов, позволяет получить типовые зависимости для определенных групп, обладающих схожим гидрологическим режимом и реакцией на метеорологический вход, обусловленные особенностями водосбора, описываемого набором физико-географических характеристик, обуславливающих условия формирования стока [3; 4; 10].

Целью исследования является демонстрации возможности использования методов глубокого машинного обучения в задачах решения моделирования стока для малых и средних рек на территории России, и проведения сравнения с результатами моделирования, полученных с помощью концептуальных гидрологических моделей.

Материалы и методы исследования

В работе использовалась ранее созданная база гидрологических, метеорологических и физико-географических характеристик для рек на территории Российской Федерации [2]. Из базы были взяты агрегированные на водосборы величины суточных сумм осадков продукта ERA5-Land [7], максимальные и минимальные суточные температуры ERA5-Land, суточные суммы слоёв стока, рассчитанные на основе расходов, полученных с ресурса АИС-ГМВО [1] и физико-географические характеристики из HydroATLAS [5]

Для модельного эксперимента использовалась библиотека языка python NeuralHydrology [11] и архитектура глубокого машинного обучения, описанные в работе [9]: сеть долгой краткосрочной памяти, с дополнительной информацией о физико-географических параметрах водосбора (LSTM). Моделирование осуществлялось для 911 объектов.

Кроме этого была использована модель случайного леса (RFR), использующая в качестве входных данных для обучения суммы осадков и средние значения максимальных и минимальных температур за 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 и 256 предшествующих дней моделируемому расходу.

Для обучения статистических моделей ряды наблюдений были разбиты на тренировочную (2008-2016), валидационную (2017-2018) и тестовую выборки (2019-2020). Дальнейшие результаты оценки приводятся для тестовой выборки.

Полученные результаты с помощью данных моделей были сравнены с результатами концептуальных гидрологических моделей HBV и GR4J, полученных в работе OpenForecast v2 для 388 замыкающих постов на территории России.

В качестве итоговой метрики сравнения качества моделирования был выбран коэффициент Нэша-Саттклифа (NSE).

Результаты и обсуждение

Для оценки качества полученного коэффициента NSE, была выбрана градация, предложенная в работе Moriasi [6]. Диапазоны коэффициентов и соответствующая оценка качества модели приведены в Табл. 1.

В Табл. 2 приводится статистика по коэффициентам NSE за тестовый период для смоделированного стока. Из Табл. 2 видно, что модель LSTM, для тренировки которой были использованы дополнительные физико-географические параметры, имеет более высокий коэффициент NSE, чем концептуальные гидрологические модели HBV и GR4J.

Так же модель LSTM обладает меньшим количеством объектов, качество моделирования которых может быть отнесено в категорию “Неудовлетворительно” (Табл. 1).

Табл. 1 Диапазоны коэффициента NSE.

Диапазон	Качество
> 0.8	Очень хорошо
0.7-0.8	Хорошо
0.5-0.7	Удовлетворительное
< 0.5	Неудовлетворительное

Табл. 2 Обобщенная статистика по коэффициенту NSE.

Модель	Объектов в выборке	Максимум NSE	Медианный NSE	Средний NSE	NSE < 0	Плохие модели, %
LSTM физ. гео	911	0.95	0.67	0.00	104	32%
GR4J	388	0.96	0.64	-189.84	72	39%
HBV	388	0.94	0.52	-243.31	80	46%
RFR (cv)	911	0.95	0.47	-1.87	246	55%
LSTM без физ. гео	911	0.89	0.44	-0.06	172	58%
RFR	911	0.95	0.41	-3.72	279	59%

На Рис. 1 приведены результаты моделирования для каждого поста, с медианной статистикой коэффициента NSE для бассейнового округа, куда попадают посты. Цветовая шкала соответствует разбиению из Табл. 1. Гистограмма в нижнем левом углу каждого рисунка, приводит распределение постов по соответствующим диапазонам. На рисунке видно, что хуже всего модели справляются с моделированием стока в следующих бассейновых округах – Нижневолжский, Верхневолжский, Окский и Уральский.

Хочется также отметить, что модель LSTM несмотря на более сложную архитектуру, без использования дополнительной физико-географической информации (Рис. 1г), сопоставима по качеству моделирования с более простой моделью случайного леса (Рис. 1д) без кросс-валидации, и даже уступает модели случайного леса с ней (Рис. 1е).

На Рис. 2 приведены результаты сравнения результатов моделирования для каждого поста в отдельности. Для сравнения результатов моделирования с помощью концептуальных гидрологических моделей и LSTM было выбрано 235 объектов, которые попали в используемую базу данных и были использованы в работе OpenForecast.

Видно, что модель LSTM превосходит обе концептуальных модели на большинстве постов (Рис. 2а,б). При этом, эта модель уступает в тех регионах, где ведется активное регулирование стока. Модель GR4J, имеющая меньшее число параметров, лучше справляется с задачей моделирования, чем HBV, имеющая 14 параметров.

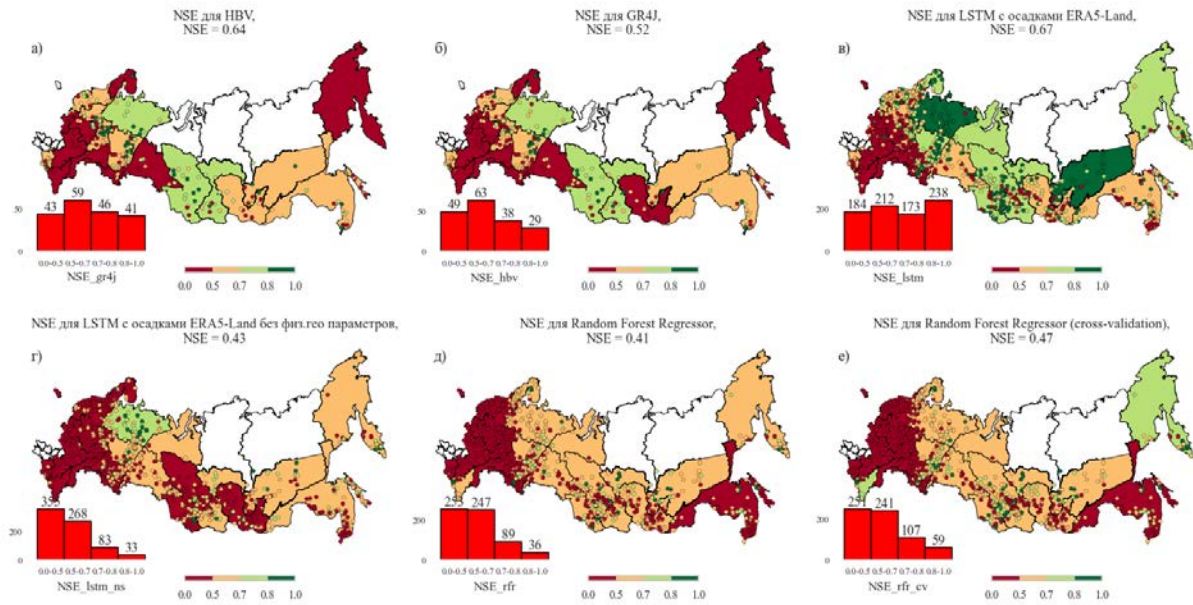


Рис. 1 Результаты моделирования с помощью различных моделей.

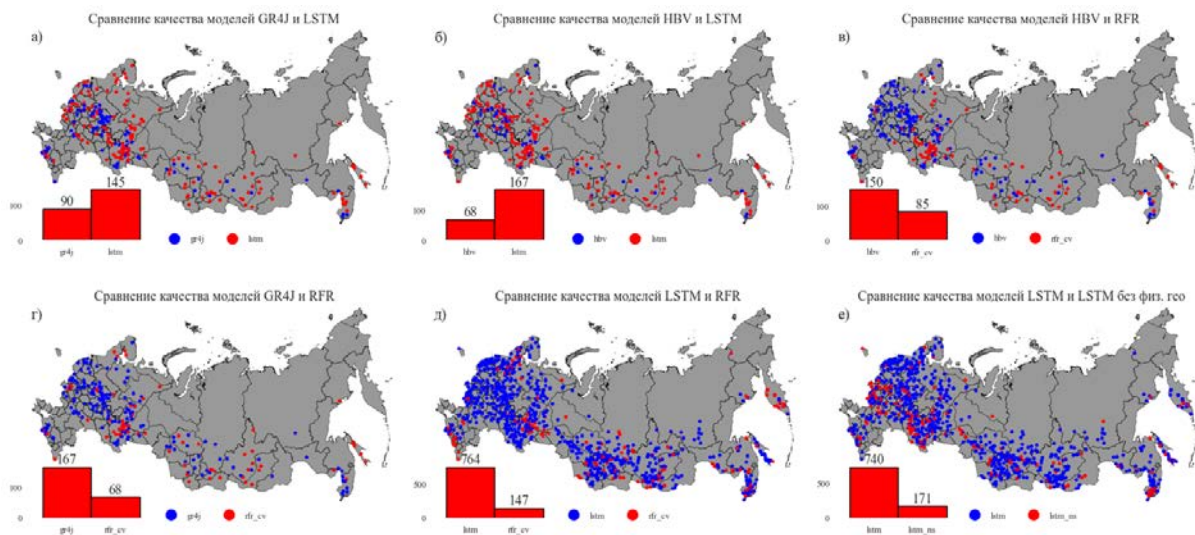


Рис. 2 Сравнение качества моделирования различных моделей.

Несмотря на относительный успех модели LSTM, её, как и другие методы математической статистики, нельзя назвать универсальным решением для задач моделирования стока. Вероятно, что модели не хватило информации, при моделировании стока с учётом используемых связей, основанных на осадках. Для совершенствования решений в дальнейшем стоит привлекать параметры, характеризующие не только входную динамически меняющуюся метеорологическую составляющую, но и характеристики учитывающее динамику изменений водного баланса на объекте исследования.

Список литературы

1. АИС ГМВО: Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. Доступна online: <https://gmvo.skniivh.ru> Дата обращения: 24 August 2023
2. Abramov Dmitrii, & Kurochkina Lyubov. (2023). Hydro-meteorological database for watersheds across the Russia (1.2). Доступна online: <https://zenodo.org/record/7945485>. Дата обращения: 24 August 2023
3. Feng, D., Beck, H., Lawson, K., and Shen, C.: The suitability of differentiable, physics-informed machine learning hydrologic models for ungauged regions and climate change impact assessment, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 27, 2357–2373, 2023. Доступна online: <https://doi.org/10.5194/hess-27-2357-2023>. Дата обращения: 24 August 2023
4. Hunt, K. M. R., Matthews, G. R., Pappenberger, F., and Prudhomme, C.: Using a long short-term memory (LSTM) neural network to boost river streamflow forecasts over the western United States, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 26, 5449–5472, 2022. Доступна online: <https://doi.org/10.5194/hess-26-5449-2022>. Дата обращения: 24 August 2023
5. Linke S. et al. Global hydro-environmental sub-basin and river reach characteristics at high spatial resolution //Scientific data. – 2019. – Т. 6. – №. 1. – С. 283. Доступна online: <https://www.hydrosheds.org/hydroatlas> Дата обращения: 24 August 2023
6. Moriasi D. N., Gitau M. W., Pai N., et al. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria — *Transactions of the ASABE*, 2015, vol. 58, No. 6, pp. 1763-1785. Доступна online: <https://web.ics.purdue.edu/~mgitau/pdf/Moriasi%20et%20al%202015.pdf>. Дата обращения: 24 August 2023
7. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., et al. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications — *Earth System Science Data*, 2021, vol. 13, No. 9, pp. 4349-4383. Доступна online: <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac>. Дата обращения: 24 August 2023
8. Kratzert F., Nearing G., Addor N., et al. Caravan-A global community dataset for large-sample hydrology — *Scientific Data*, 2023, vol. 10, No 1, p. 61. Доступна online: <https://www.nature.com/articles/s41597-023-01975-w>. Дата обращения: 24 August 2023
9. Kratzert F., Klotz, D., Shalev, G., et al. Towards learning universal, regional, and local hydrological behaviors via machine learning applied to large-sample datasets. — *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, vol. 23, No. 12, pp. 5089-5110. Доступна online: <https://doi.org/10.5194/hess-23-5089-2019>. Дата обращения: 24 August 2023
10. Kratzert F., Klotz, D., Herrnegger, M., et al. Toward improved predictions in ungauged basins: Exploiting the power of machine learning — *Water Resources Research*, 2019, vol. 55, No. 12, pp. 11344-11354. Доступна online: <https://doi.org/10.1029/2019WR026065>. Дата обращения: 24 August 2023
11. Kratzert, F., and Gauch., M., and Nearing, G., and Klotz, D. (2022). *NeuralHydrology* — A Python library for Deep Learning research in hydrology. *Journal of Open Source Software*, 7(71), 4050. Доступна online: <https://doi.org/10.21105/joss.04050> . Дата обращения: 24 August 2023

От отрицательной турбулентной вязкости к отрицательному гидравлическому сопротивлению?

А.М. Алабян

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия
andrei_alabyan@mail.ru*

Аннотация. Положительные значения турбулентной вязкости соответствуют «нормальному» протеканию процесса диссипации кинетической энергии речного потока, при котором энергия осредненного течения передается в вихревые движения, а от них в энергию молекулярных движений, превращаясь в конечном счете в тепло («каскад Колмогорова»). Интенсивность диссипации энергии речного потока в гидравлических расчетах принято характеризовать через гидравлическое сопротивление, которое при «нормальной» схеме диссипации энергии, происходящей в однонаправленных русловых потоках, всегда положительно. Однако в пульсирующих и реверсивных потоках, которые могут наблюдаться в приливных устьях, а также в бьефах долинных водохранилищ, возможна и обратная передача энергии турбулентных вихрей осредненному поступательному движению водной массы. Анализ высокоточных результатов гидрометрических измерений, выполненные в приливных устьях рек Беломорского бассейна, показал, что при общепринятой одномерной схематизации реверсивного водного потока в определенные фазы приливного цикла гидравлическое сопротивление может принимать отрицательные значения.

Ключевые слова: диссипация энергии, реверсивные и пульсирующие потоки, приливные устья, уравнение движения водного потока.

From the negative turbulent viscosity toward the negative hydraulic resistance?

A.M. Alabyan

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
Water Problems Institute, Moscow, Russia
andrei_alabyan@mail.ru*

Abstract. Positive values of the turbulent viscosity correspond to the “normal” process of energy dissipation in the mean flow, when the energy of the averaged flow passes into turbulent eddies, and from them into the energy of molecular motions and eventually into heat (“Kolmogorov’s cascade”). The rate of channel-flow energy dissipation is usually characterized in terms of the hydraulic resistance, which is also positive in the “normal” order of the energy dissipation when the water body moves evenly downstream. However, in pulsing and reversible flows taking place in tidal estuaries or long valley reservoirs the eddy energy can transfer back to the mean flow. Analyses of high-precision hydrometric measurements performed in the White Sea tidal estuaries demonstrate that under the usual presentation of 1D flow motion equation the hydraulic resistance can be negative during certain phases of the tidal cycle.

Keywords: energy dissipation, reversible and pulsing flows, tidal estuaries, flow motion equation.

Введение

В отличие от коэффициента молекулярной вязкости, коэффициент турбулентной вязкости является в некотором роде абстрактной величиной, характеризующей не столько физические свойства самой жидкости, сколько режим ее движения. Положительные значения турбулентной вязкости соответствуют «нормальному» протеканию процесса диссипации кинетической энергии речного потока, при котором энергия осредненного течения передается в вихревые движения, а от них в энергию молекулярных движений, превращаясь в конечном счете в тепло («каскад Колмогорова») [7; 11]. Интенсивность диссипации энергии речного потока в гидравлических расчетах принято характеризовать через гидравлическое сопротивление, которое при «нормальной» схеме диссипации энергии, происходящей в однонаправленных русловых потоках, всегда положительно. Однако в пульсирующих и реверсивных потоках, которые могут наблюдаться в приливных устьях, а также в бьефах долинных водохранилищ, возможна и обратная передача энергии турбулентных вихрей осредненному поступательному движению водной массы, подобно тому, как это происходит в океане («отрицательная вязкость» [4; 10]). Теоретическая возможность существования отрицательной турбулентной вязкости, связанной с обратным переходом энергии от пульсаций течения к осредненному движению, отмечалась еще в первой половине прошлого века [12], затем она неоднократно регистрировалась в различных природных средах и технических процессах [5], однако до сих пор является предметом дискуссий. Еще более проблематичной, на первый взгляд, выглядит возможность существования отрицательного гидравлического сопротивления. Однако анализ высокоточных результатов гидрометрических измерений, выполненные в приливных устьях рек Беломорского бассейна, показал, что при общепринятой одномерной схематизации реверсивного водного потока гидравлическое сопротивление в определенные фазы приливного цикла может принимать отрицательные значения, что также может быть связано с обратной передачей энергии потока по каскаду Колмогорова. К сожалению, отрицательное гидравлическое сопротивление, также как и отрицательная турбулентная вязкость, не является полезным «чудом природы» (наподобие сверхпроводимости), а всего лишь представляет собой причуду параметризации еще недостаточно изученного гидродинамического феномена.

Материалы и методы исследования

Параметризация турбулентной вязкости. Со времен Ньютона силы "жидкого трения" в водном потоке, выражаются через касательное напряжение τ , возникающее между слоями движущейся жидкости и принимаемое пропорциональным градиенту скорости u в направлении, перпендикулярном направлению движения y :

$$\tau = \rho \nu \frac{du}{dy}, \quad (1)$$

где ρ – плотность воды (1000 кг/м^3), ν – коэффициент кинематической вязкости, значения которого при ламинарном движении воды постоянны, имеют порядок величины $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ и варьируют в зависимости от температуры.

Ж. Буссинеск [13], анализируя уравнения Рейнольдса, предложил выражать турбулентные напряжения (ковариационные моменты пульсаций компонент скорости $u'_{i,j}$) через коэффициент турбулентной вязкости ν_t аналогичный по форме записи коэффициенту ламинарной вязкости в формуле (1):

$$\tau = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \rho \nu_t \frac{du}{dy}. \quad (2)$$

Значение v_T на несколько порядков превышает значение ламинарной вязкости и является скорее характеристикой режима течения, чем самой жидкости [11]. Однако v_T , в отличие от v , может принимать и отрицательные значения в случае обратной передачи энергии по каскаду Колмогорова, на что обращает внимание А.С. Монин в предисловии к переводу книги В. Старра [5], в которой впервые были детально проанализированы проявления отрицательной вязкости в различных природных средах.

Параметризация гидравлического сопротивления. Для расчетов неустановившегося движения воды (в рамках одномерной модели, когда параметры потока осреднены по его поперечному сечению) используется система уравнений Сен-Венана:

$$\frac{\alpha_0}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\alpha u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} = I - I_{mp}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(u\omega)}{\partial x} + \frac{\partial\omega}{\partial t} = 0, \quad (4)$$

где x – координата по оси, направленной по течению реки, I – «геометрический» уклон водной поверхности, который принимается положительным при понижении водной поверхности в направлении оси x , соответствующем «нормальному» течению (из реки в море), g – ускорение свободного падения, ω – площадь поперечного сечения, u – средняя скорость, t – время, α – коэффициент Кориолиса (корректив кинетической энергии), α_0 – коэффициент Буссинеска (корректив количества движения), I_{mp} – «уклон трения» (или «гидравлический уклон»), который равен геометрическому уклону при равномерном движении.

В практических расчетах неустановившегося течения обычно применяется **допущение**, что гидравлическое сопротивление будет таким же, как и в случае равномерного движения. При таком допущении уклон трения в формуле (3) может быть выражен исходя из какой-либо простейшей формулы, применяемой для расчетов равномерного течения (Шези, Шези-Маннинга, Дарси-Вейсбаха и т.п.):

$$I_{тр} = \frac{u^2}{C^2 R} = \frac{n^2 u^2}{R^{4/3}} = \frac{\lambda u^2}{8gR}, \quad (5)$$

где C – коэффициент Шези; n – коэффициент шероховатости Маннинга; λ – безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления Дарси-Вейсбаха; R – гидравлический радиус.

Для реверсивных потоков на устьевых участках приливных рек квадрат средней скорости в формулах (5) заменяется на произведение скорости на ее модуль [6], чтобы обеспечить действие силы трения в сторону, противоположную направлению течения:

$$I_{тр} = \frac{\lambda u|u|}{8gR}. \quad (6)$$

Использование коэффициента гидравлического сопротивления λ (а не гораздо более популярных в речной гидравлике коэффициентов Шези и Маннинга) для реверсивных потоков представляется более удобным, т.к. при несовпадении знаков при скорости и уклоне трения он может принимать отрицательные значения.

Полевые исследования. Объектами специальных полевых исследований, ориентированных на сбор данных для гидродинамического моделирования реверсивных и пульсирующих потоков, были устьевые участки приливных малых рек Беломорского бассейна (Рис. 1). Измерения проводились в 2015-2021 гг. преимущественно во время летней межени при «стоковых» расходах воды в диапазоне 3-8 м³/с и величине

сизигийных морских приливов от 1 м на Лае до 9 м на Сёмже. При этом величины максимальных приливных и отливных расходов поблизости от устьевых створов на один-два порядка превосходили расходы воды, поступающей с водосбора рек. Детальное описание методики и результатов представлены в работах [1; 2; 3; 8; 14].



Рис. 1 Схема расположения исследованных устьев рек Беломорского бассейна.

Для исследования режима гидравлического сопротивления было необходимо в течение полного полусуточного приливного цикла выполнить синхронные измерения уровня и расхода воды, в двух поперечных сечениях, находящихся на различном удалении от устьевого створа реки. Использование акустических доплеровских профилографов течения в комплексе с автономными барометрическими регистраторами уровня воды позволяет обеспечить необходимую для анализа точность расчетов всех членов уравнений (3) и (6) применительно, по крайней мере, к малым рекам [8; 14]. При этом уклон трения вычисляется как разность геометрического уклона и членов правой части уравнения (3), а коэффициент гидравлического сопротивления – по формуле (6), исходя из полученных значений уклона трения.

Анализ результатов

Анализ вариации гидравлическое сопротивление в ходе приливного цикла выявил отчетливую тенденцию: перед разворотом течения оно резко увеличивается, а сразу после разворота – резко уменьшается (Рис. 2); в периоды квазиустановившегося течения воды в прилив и отлив (в обоих направлениях) значения коэффициента гидравлического трения λ находится в диапазоне 0.04 – 0.07, характерном для «нормальных» рек. В некоторых случаях (на Кянде в 2016 и 2017 гг., на Тамице в 2016 г., на Сёмже в 2018 г.) были зафиксированы отрицательные значения λ . Здесь необходимо отметить, что после анализа результатов по Кянде и Тамице [1; 2] для измерений на Сёмже был специально выбран участок на крутой излучине, чтобы минимизировать ошибку определения геометрического уклона на исследуемом участке русла. Оценка возможной ошибки при расчете гидравлического сопротивления по формуле (6) на основании анализа членов уравнения (3), которая могла быть связана с погрешностью измерений, не отбраковала отрицательные значения коэффициента гидравлического трения λ [14].

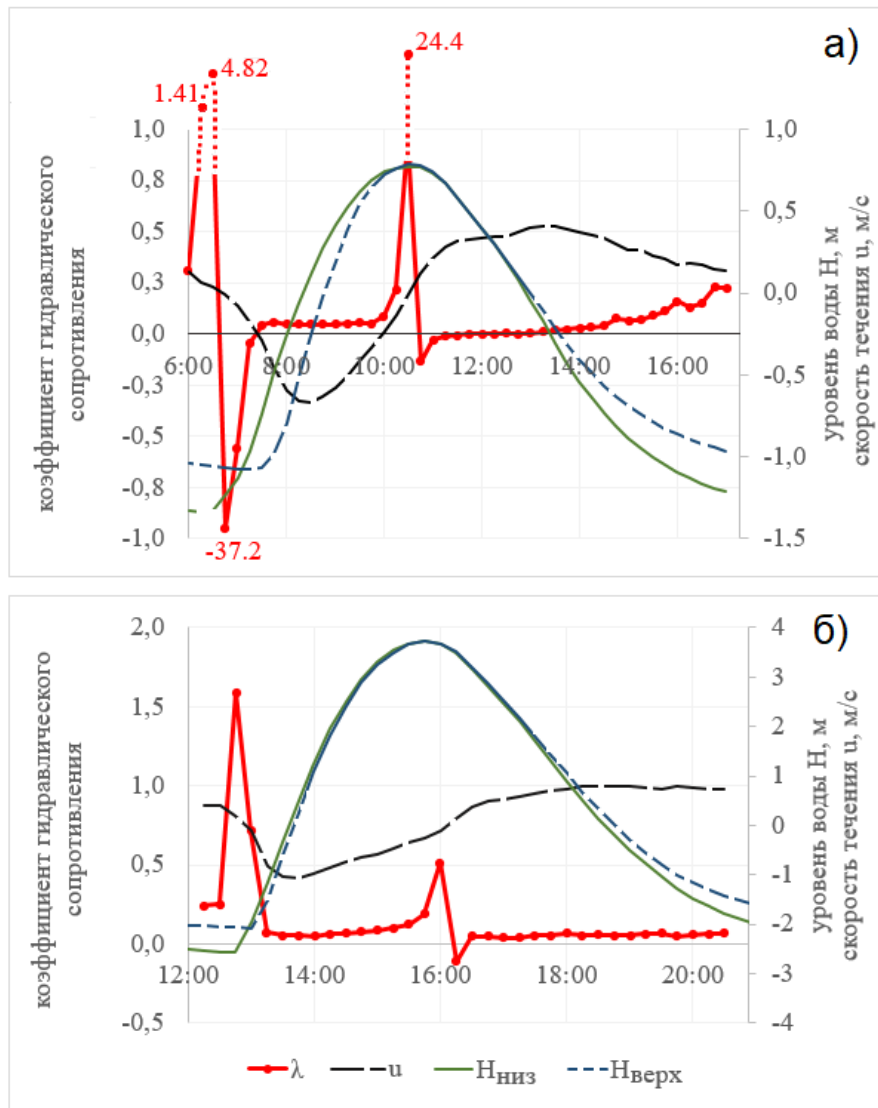


Рис. 2 Изменение гидравлического сопротивления λ , средней скорости течения u и уровня воды в верхнем ($H_{\text{верх}}$) и нижнем ($H_{\text{низ}}$) створах в ходе приливного цикла: а) на р. Кянде 04.08.2016 г.; б) на р. Сёмже 14.08.2018 г. [1; 7; 14].

Само понятие «отрицательное трение» не является уникальным применительно к гидродинамической проблематике; оно встречается в других областях, когда физика процесса не укладывается в рамки устоявшихся параметризаций, например, при расчетах трения на боковой поверхности свай в просадочных грунтах [9].

Отрицательные значения гидравлического сопротивления не противоречат представлениям о механизме диссипации энергии в турбулентных потоках и могут быть интерпретированы как проявление «отрицательной вязкости», когда энергия поступательного движения водной массы, тормозящегося приливом, передается вихревым образованиям. Визуальные наблюдения за водной поверхностью приливных рек показывают, что при развороте основного течения в малую и особенно в полную воду, водная масса не стоит на месте, а формирует систему вихревых движений. При формировании отливного течения, которое ускоряется при практически горизонтальной водной поверхности по всему приливному участку реки [2], энергия вихрей «сбрасывается» обратно в осредненное течение. Резкое увеличение значения гидравлического сопротивления перед разворотом течений (Рис. 2) и его резкое уменьшение сразу после разворота могут отражать данный процесс.

Благодарности

Автор благодарен всем участникам полевых работ на реках Беломорского бассейна, особая признательность выражается Н.А. Демиденко, С.В. Лебедевой, М. Льюмменсу, Е.Д. Панченко и А.А. Попрядухину.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01184, <https://rscf.ru/project/22-29-01184/>.

Acknowledgments

The authors thank all participants of fieldworks on the rivers of the White Sea basin, N.A. Demidenko, S.V. Lebedeva, M. Leummens, E.D. Panchenko and A.A. Popryadukhin are especially appreciated.

The research was supported by Russian Science Foundation, Project #22-29-01184, <https://rscf.ru/project/22-29-01184/>.

Список литературы

1. Алабян А.М., Панченко Е.Д. Гидравлическое сопротивление в приливных устьях и феномен отрицательного трения в речной гидравлике // Инженерные изыскания. 2017. № 3. С. 24–32.
2. Алабян А.М., Панченко Е.Д., Алексеева А.А. Особенности динамики вод в приливных устьях малых рек бассейна Белого моря // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2018. № 4. С. 39–48.
3. Алабян А.М., Панченко Е.Д., Медин А.М. Парадоксы гидродинамики реверсивных течений в приливных устьях рек // Труды III Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». Санкт-Петербург, 2019. С. 61–64.
4. Высоцкий Л.И. Существуют ли зоны с отрицательной вихревой вязкостью в продольно-однородных турбулентных потоках? // Инженерно-строительный журнал, 2013. № 2. С. 48–53.
5. Жмур В.В., Белоненко Т.В., Новоселова Н.В., Суетин Б.С., Арутюнян Д.А. Вытягивание мезомасштабных вихрей в океане в субмезомасштабные вихревые нити как способ передачи энергии по каскаду размеров. Проявление свойств отрицательной вязкости при вытягивании вихрей // Тезисы докладов Всероссийской конференции «Моря России: Вызовы отечественной науки». Севастополь, 2022. С. 47–48.
6. Михайлов В.Н. О кинематике потока в устье реки // Труды ГОИН. Вып. 98. 1970. С. 5–22.
7. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. Ч.1. М.: Наука, 1965. 640 с.
8. Панченко Е.Д. Динамика потока в приливных устьях малых рек (на примере Беломорского бассейна): дис. ... канд. геогр. наук. МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва. 2022. 153 с.
9. Рекомендации по учету сил отрицательного трения при проектировании свайных фундаментов в условиях просадочных и сильносжимаемых грунтов. М: Производственные экспериментальные мастерские ЦИНИС Госстроя СССР, 1972. 31 с.
10. Старр В. Физика явлений с отрицательной вязкостью. М.: Мир, 1971. 261 с.
11. Фидман Б.А. Турбулентность водных потоков // Л.: Гидрометеиздат, 1991. 240 с.
12. Форхгеймер Ф. Гидравлика. М.-Л.: ОНТИ, 1935. 616 с.
13. Boussinesq J. Theorie de l'ecoulement tourbillonnant et tumultueux des liquides dans les lits rectilignes a grande section // Paris. Gauthier-Villars. 1897. 88 p.
14. Panchenko E., Alabyan A. Friction factor evaluation in tidal rivers and estuaries // METHODSX. 2022. Vol. 9. P. 101669.

Численное моделирование замерзания воды в ледниковой трещине

М.М. Андреев*, М.М. Степанова

*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия
maksandreev2001@mail.ru*

Аннотация. Представлена численная модель замерзания воды в ледниковой трещине, реализованная с использованием методов выпрямления фронта и переменных направлений на неравномерной сетке. Модель позволяет смоделировать процесс замерзания в основании трещины, учесть распределение температуры льда по глубине и тепловой поток у поверхности льда, связанный с солнечным излучением и конвективным теплообменом с окружающей средой. Проведена проверка корректности модели, а также приведен пример моделирования замерзания воды в трещине.

Ключевые слова: ледниковая трещина, численное моделирование, задача Стефана, метод переменных направлений, метод выпрямления фронта.

Numerical simulation of water freezing in a glacial crack

M.M. Andreev*, M.M. Stepanova

*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia
maksandreev2001@mail.ru*

Abstract. This paper presents a numerical model of water freezing in an ice crevasse. The model was implemented using the front-fixing method coupled with the alternating direction implicit method on a non-uniform grid. It is capable of simulating the freezing process in the base of a crevasse, considering the temperature distribution of ice over depth and the heat flux near the surface caused by solar radiation and convective heat transfer between ice surface and environment. The model reliability was validated through several numerical tests. To illustrate its simulation capabilities, example calculations were performed to simulate the freezing of water in an ice crevasse.

Keywords: ice crevasse, numerical modelling, Stefan problem, alternating direction implicit method, front-fixing method.

Введение

Задачи теплопроводности, включающие в себя фазовые превращения, можно встретить в различных областях прикладной науки. Одним из важных и актуальных направлений, связанных с решением таких задач, является моделирование гляциальных процессов. Так, изучение и мониторинг состояния ледникового покрова в районах полярных станций Антарктиды является одним из ключевых факторов для поддержания безопасности инфраструктуры и авиационного сообщения, что имеет важнейшее значение для обеспечения деятельности российской антарктической экспедиции (РАЭ). В представленной работе рассматривается процесс замерзания талой воды в ледниковых трещинах (т.н. «залечивание» трещин). Залеченные трещины наблюдались в районе взлётно-посадочной полос антарктических станций Новолазаревская [1], Прогресс, полевой базы Оазис Бангера и других.

Процесс залечивания трещины математически сводится к краевой задаче Стефана с подвижными фазовыми границами. Как правило, для численного решения такой задачи рассматривают два типа методов [2]: с выделением границы фазового перехода (ловля фронта в узел пространственной сетки, метод выпрямления фронта) и методы сквозного счета (схема со сглаженными коэффициентами, энтальпийная формулировка). Для модели, представленной в данной работе, был выбран метод выпрямления фронта, так как он позволяет сформулировать задачу в статической области. Этот метод использовался для моделирования замерзания трещины в работе С. В. Попова [3] для одномерного случая, когда стенки трещины параллельны и пространство между ними заполнено водой. В настоящей работе рассматривается более общий двумерный случай, что позволяет смоделировать процесс замерзания в основании трещины, учесть распределение температуры льда по глубине и тепловой поток у поверхности льда, связанный с солнечной активностью и конвективным теплообменом с окружающей средой. Двухфазная модель строится для заполненной водой трещины под тонким поверхностным слоем талой воды на леднике. Такое явление наблюдается на плоских низменных участках в весенне-летний период. Кроме того, в рамках рассматриваемой модели предполагается, что трещина прекратила свое распространение, а течение льда отсутствует.

Постановка задачи

Рассматривается двухфазная двумерная задача Стефана. Нижняя область $\Omega_1 : \{0 \leq x \leq W, 0 \leq y < f(x, t)\}$ занята льдом, верхняя $\Omega_2 : \{0 \leq x \leq W, f(x, t) < y \leq H\}$ – водой. Граница фазового перехода описывается функцией $f(x, t) : 0 \leq x \leq W, t > 0$, которая при каждом фиксированном t является однозначной, без самопересечений. В начальный момент времени значение f задано для всех $x \in [0, W]$. Предполагается, что среда является однородной и теплоёмкость c , плотность ρ и коэффициент теплопроводности k не зависят от температуры. В таком случае, изменение функции температуры $u(x, y, t)$ описывается уравнением теплопроводности следующего вида:

$$c_m \rho_m \frac{\partial u_m}{\partial t} = k_m \left(\frac{\partial^2 u_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_m}{\partial y^2} \right), \quad t > 0, \quad x, y \in \Omega_m, \quad m = 1, 2, \quad (1)$$

где $m = 1$ соответствует области со льдом Ω_1 , $m = 2$ – области с водой Ω_2 . Кроме того, заданы начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned} u_m|_{t=0} = u_{m,0}(x, y), \quad \frac{\partial u_m}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial u_m}{\partial x} \Big|_{x=W} = 0, \\ k_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} \Big|_{y=H} = \alpha(u_2 - u_a) + Q_{sol}, \quad u_1|_{y=0} = u_{ice}, \quad u_m|_{y=f} = u_{p.t.}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $u_{m,0}$ – начальные распределения температуры для льда и воды, α – коэффициент теплообмена воды, u_a – температура воздуха, Q_{sol} – поток солнечной радиации, u_{ice} – некоторая фиксированная температура, $u_{p.t.}$ – температура фазового перехода вода-лёд. Величина потока солнечной радиации на горизонтальную поверхность зависит от положения солнца на небосводе:

$$Q_{sol} = \Lambda_{sol} \sin h, \quad (3)$$

где $\Lambda_{sol} \approx 1360 \text{ Вт/м}^2$ – солнечная постоянная, h – высота Солнца:

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \Omega, \quad (4)$$

φ – географическая широта, δ – склонение солнца, $\Omega = \omega t$ – часовой угол, ω – угловая скорость вращения Земли, t – время от полудня.

Постановку краевой задачи замыкает дополнительное условие на неразрывность теплового потока на границе раздела фаз (условие Стефана) [4], [5]:

$$L\rho \frac{\partial f}{\partial t} = \left[1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 \right] \left(k_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} \Big|_{y=f} - k_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} \Big|_{y=f} \right). \quad (5)$$

Численная модель

Выпрямление фронта было проведено по координате y , с помощью преобразования:

$$y' = \begin{cases} \frac{y}{f(x,t)}, & 0 \leq y \leq f(x,t), \\ \frac{y-f(x,t)}{H-f(x,t)} + 1, & f(x,t) \leq y \leq H. \end{cases} \quad (6)$$

Теперь переменная y' изменяется в пределах от 0 до 2, причём твёрдой фазе соответствует область $0 \leq y' < 1$, жидкой фазе: $1 < y' \leq 2$, а $y' = 1$ – координата границы фазового перехода. Также проведем масштабирование координаты x , чтобы её значения изменялись от 0 до 1: $x = x/W$. Пусть $u(x, y, t) = v(x', y', t)$, тогда после преобразования координат и обезразмеривания ($t' = t/t_0$, $v' = v/v_0$, где t_0 , v_0 – характерные масштабы времени и температуры соответственно), краевая задача (1), (2), (5) может быть переписана следующим образом (штрихи у новых переменных опущены):

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_1}{\partial t} &= \frac{\partial^2 v_1}{\partial x^2} - \left(\frac{2y}{f} \frac{\partial f}{\partial x} \right) \frac{\partial^2 v_1}{\partial x \partial y} + \\ &+ \frac{y}{f} \left(\frac{2}{f} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial f}{\partial t} - \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right) \frac{\partial v_1}{\partial y} + \left(\left(\frac{W}{f} \right)^2 + \left(\frac{y}{f} \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 \right) \frac{\partial^2 v_1}{\partial y^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$0 \leq x \leq 1, \quad 0 \leq y < 1, \quad t > 0.$$

$$\begin{aligned} \frac{c_2 \rho_2 k_1}{c_1 \rho_1 k_2} \left(\frac{\partial v_2}{\partial t} - \frac{y-2}{H-f} \frac{\partial f}{\partial t} \frac{\partial v_2}{\partial y} \right) &= \frac{\partial^2 v_2}{\partial x^2} - \left(\frac{2(y-2)}{H-f} \frac{\partial f}{\partial x} \right) \frac{\partial^2 v_2}{\partial x \partial y} + \\ &+ \frac{y-2}{H-f} \left(\frac{2}{H-f} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 - \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right) \frac{\partial v_2}{\partial y} + \left(\frac{W^2}{(H-f)^2} + \left(\frac{y-2}{H-f} \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 \right) \frac{\partial^2 v_2}{\partial y^2}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$0 \leq x \leq 1, \quad 1 < y \leq 2, \quad t > 0.$$

$$v_m \Big|_{t=0} = \frac{u_{m,0}(x, y)}{u_{p.t.}}, \quad \frac{\partial v_m}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial v_m}{\partial x} \Big|_{x=1} = 0,$$

$$\frac{k_2}{(H-f)} \frac{\partial v_2}{\partial y} \Big|_{y=2} = \alpha \left(v_2 - \frac{u_a}{u_{p.t.}} \right) + \frac{Q_{sol}}{u_{p.t.}}, \quad (9)$$

$$v_1 \Big|_{y=0} = \frac{u_{ice}}{u_{p.t.}}, \quad v_m \Big|_{y=1} = 1, \quad m = 1, 2,$$

$$\frac{L\rho}{t_0 v_0} \frac{\partial f}{\partial t} = \left[1 + \left(\frac{1}{W} \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 \right] \left(k_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} \Big|_{y=1} - \frac{k_2}{H-f} \frac{\partial v_2}{\partial y} \Big|_{y=1} \right). \quad (10)$$

Разностная схема

Параболическое уравнение в частных производных вида (7), содержит смешанную частную производную, а также частную производную первого порядка, причем коэффициенты при частных производных могут зависеть как от координат, так и от времени. Важно подобрать такую разностную схему, которая учитывала бы все эти факторы и при этом была устойчива, не ресурсоёмка и имела достаточную точность. В работе была использована неявная схема переменных направлений [6], удовлетворяющая этим требованиям. Она состоит из двух шагов, на каждом из них решается система с трехдиагональной матрицей. На равномерной сетке эта схема имеет порядок точности $O(\Delta x^2, \Delta y^2, \Delta t)$. Однако для рассматриваемой задачи целесообразно использовать неоднородную сетку, сгущающуюся к границе фазового перехода, чтобы увеличить эффективность расчетов.

Неоднородная сетка по координате y генерировалась с помощью следующей процедуры: вначале задается равномерная сетка на отрезке $[0,1]$ с фиксированным числом узлов. Затем к этим узлам применяется преобразование:

$$z(y) = 1 - e^{-sy} + e^{-s}, \quad (11)$$

где s – параметр, отвечающий за степень сгущения сетки к границе фазового перехода. На отрезке $[1, 2]$ узлы задаются симметрично узлам, полученным на отрезке $[0, 1]$. В результате имеем координатную сетку на отрезке $[0, 2]$, сгущающуюся к точке $y = 1$.

Схема на неравномерной сетке была реализована с первым порядком точности по координатам и времени.

Программная реализация

Описанная выше модель была реализована на языке программирования Python с использованием библиотеки NumPy. Следует отметить, что применение JIT-компилятора Numba [7] позволило на порядок повысить производительность расчетов.

Проверка корректности численной модели

Для проверки корректности численного решения было проведено сравнение с аналитическим решением [8] задачи Стефана в одномерном однофазном случае. Также было проведено сравнение с аналитическим решением [9] двумерной однофазной обратной задачи Стефана. В обоих случаях максимальная относительная погрешность положения границы фазового перехода составила десятые доли процента.

Кроме того, была проведена качественная проверка модели в двумерном двухфазном случае. Параметры моделирования: $H = 1$ м, $W = 1$ м, $s = 8$, число узлов – 200×200 , шаг по времени – 0.5 часа, время моделирования – 200 дней. Лёд в начальный момент времени полностью находился при температуре -5 °C, вода – при $+5$ °C. Температура воды на верхней границе и льда на нижней поддерживается постоянной. Как видно из временных срезов для разной начальной формы фазовой границы, фронт асимптотически приходит к некоторому постоянному равновесному значению, см. Рис. 1. Таким образом, было продемонстрировано, что при заданных стационарных условиях система приходит к равновесному состоянию, а конечное положение и форма границы не зависят от начальной конфигурации.

Моделирование замерзания воды в трещине

На Рис. 2 представлен результат численного эксперимента, который проводился со следующими параметрами. Глубина щели – 5 м, ширина у поверхности ~ 10 см. Толщина поверхностного слоя воды – 5 см. Начальная температура воды равна 0 °C. Начальная температура льда линейно уменьшается от 0 °C на поверхности до -20 °C на глубине 10 м. Коэффициент теплообмена α в граничном условии на поверхности воды был выбран равным 6000 Вт/м²К, u_a изменяется по синусоиде от 0 °C до 4 °C с периодом в 1 сутки. Для определения положения солнца была взята широта станции Прогресс, склонение солнца – для конца декабря. Начальное положение границы фазового

перехода задано функцией $f(x) = 10.0 - 5.0 \cdot e^{\frac{-(x-0.5)^2}{0.001}}$. Число узлов: 800 по координате x и 200 по координате y . Параметр сгущения сетки: $s = 8$. Шаг по времени – 1 сек. Время моделирования – 77 часов.

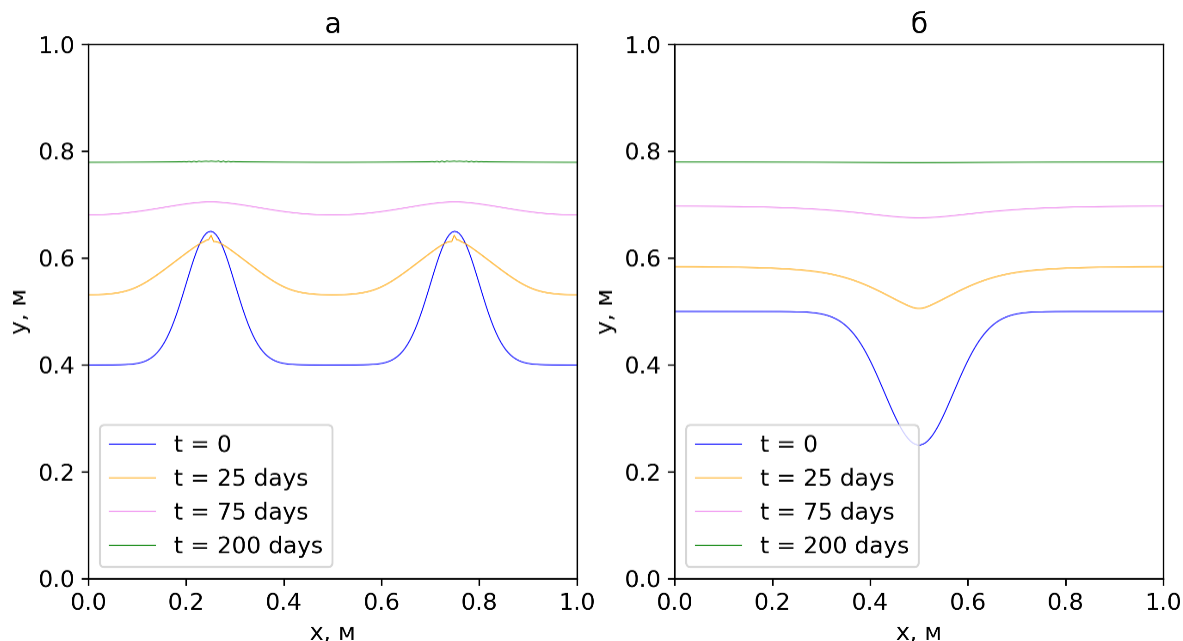


Рис. 1. Изменение положения границы фазового перехода с течением времени для двух случаев начальной конфигурации границы (а, б).

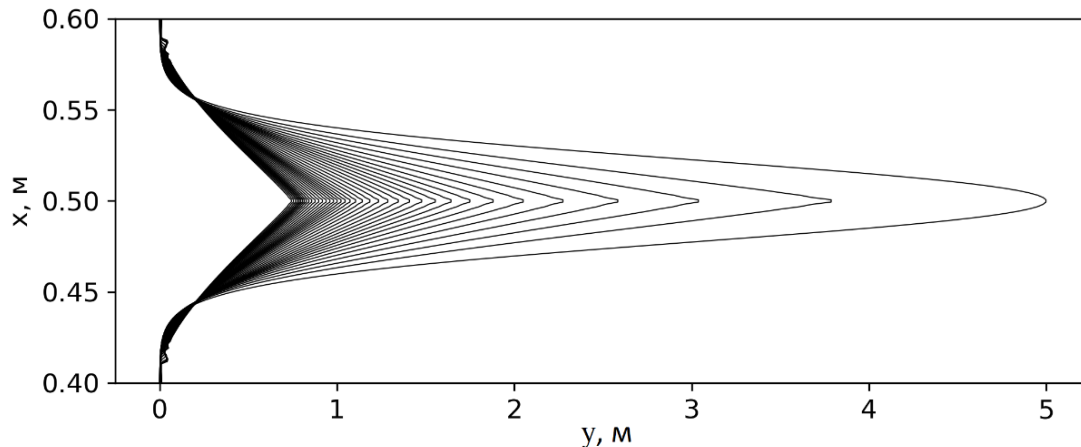


Рис. 2. Изменение границы фазового перехода с течением времени при замерзании воды в трещине. Положение границы изображено с шагом в 2 часа. График повернут на 90° .

За время моделирования глубина трещины уменьшилась более чем на 4 метра. На Рис. 2 также можно наблюдать области, где скорость замерзания изменялась из-за температурных колебаний воздуха и изменения солнечной активности.

Выводы

Представленная в настоящей работе простая двумерная модель позволяет описать процесс замерзания воды в ледниковой трещине, приняв во внимание температурное распределение льда и изменения погодных условий. Дальнейшее развитие модели предполагает учет текучести льда и исследование ее влияния на процесс залечивания трещины.

Список литературы

1. Попов С.В., Кашкевич М.П., Боронина А.С. Состояние взлетно-посадочной полосы станции Новолазаревская (Восточная Антарктида) и оценка безопасности её эксплуатации по данным исследований 2021 г. //Лёд и Снег. 2022. Т. 62. № 4. С. 621–636.
2. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. – Либроком, 2009.
3. Попов С. В. Решение одномерной задачи Стефана с двумя фазовыми границами на примере моделирования замерзания воды в ледниковой трещине //Лёд и Снег. – 2023. – Т. 63. – №. 1. – С. 130-140.
4. Quan-Sheng X., You-Lan Z. Solution of the two-dimensional Stefan problem by the singularity-separating method //Journal of Computational Mathematics. – 1985. – С. 8-18.
5. Saitoh T. Numerical method for multi-dimensional freezing problems in arbitrary domains. – 1978.
6. Craig I. J. D., Sneyd A. D. An alternating-direction implicit scheme for parabolic equations with mixed derivatives //Computers & Mathematics with Applications. – 1988. – Т. 16. – №. 4. – С. 341-350.
7. Lam S. K., Pitrou A., Seibert S. Numba: A llvm-based python jit compiler //Proceedings of the Second Workshop on the LLVM Compiler Infrastructure in HPC. – 2015. – С. 1-6.
8. Šarler B. Stefan's work on solid-liquid phase changes //Engineering Analysis with Boundary Elements. – 1995. – Т. 16. – №. 2. – С. 83-92.
9. Colton D., Reemtsen R. The numerical solution of the inverse Stefan problem in two space variables //SIAM Journal on Applied Mathematics. – 1984. – Т. 44. – №. 5. – С. 996-1013.

Оценка изменения стока рек Восточной Сибири под влиянием изменения климата

Д.О. Андреева

*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия
andasha02@mail.ru*

Аннотация. Целью данной работы явилась оценка изменения стока рек Восточной Сибири под влиянием климатических изменений. Было рассмотрено изменение среднегодовых, наименьших зимних и наибольших расходов воды половодья по 26 гидрологическим постам, расположенным в разных частях Восточной Сибири. В результате было выявлено, что в изменении среднегодовых расходов воды рек преобладает положительная направленность, она присутствует на 2/3 рассматриваемых постов. Уменьшение стока наблюдается на юго-западе территории. На части постов в изменении среднегодовых расходов воды присутствуют положительные статистически значимые тренды. Наименьшие зимние расходы воды испытывают рост на подавляющей части непромерзающих рек, на части постов были обнаружены статистически значимые тренды. Тенденции изменения значений наибольших расходов воды половодья имеют различную направленность, отрицательное изменение наблюдается на юге и востоке территории. Уменьшение наибольших расходов воды половодья происходит примерно на половине постов от числа рассматриваемых. На всех реках отсутствуют статистически значимые тренды в изменении данного показателя.

Ключевые слова: речной сток, Восточная Сибирь, изменение климата.

Assessment of river flow change under the influence of climate change in Eastern Siberia

D.O. Andreeva

*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia
andasha02@mail.ru*

Abstract. The purpose of this work was to assess the river flow change in Eastern Siberia under the impact of climate change. For 26 hydrological stations, located in different parts of Eastern Siberia, the changes in the average annual, the lowest winter and the highest spring flood water discharges were studied. As a result, it was found that positive trend prevails in the average annual water discharge change. It is presented at 2/3 of the considered hydrological stations. A decrease in runoff is observed in the southwest of the territory. Study has shown that there are positive statistically significant trends in the average annual water discharge change on part of considered stations. On the vast majority of non-freezing rivers an increase in the lowest winter water discharge is observed, and statistically significant trends were revealed there at some hydrological stations under consideration. The change in the highest spring flood water discharge has a different direction on different rivers. The decrease is observed in the south and east of Eastern Siberia at about half of the stations from the number of considered ones. Statistically significant trends in the highest spring flood water discharge change were not detected on all rivers.

Keywords: river flow, Eastern Siberia, climate change.

Введение

В связи с происходящими климатическими изменениями вопрос их влияния на речной сток становится актуальным. Целью данной работы явилась оценка этого влияния на расход воды рек Восточной Сибири. Особенности формирования стока на рассматриваемой территории являются наличие многолетней мерзлоты, сильная расчленённость рельефа и резкая континентальность климата, что может влиять на реакцию водосбора на климатические изменения.

Обратимся к работам, в которых исследуется изменение стока рек Восточной Сибири. Рассматривая данный вопрос, Р.Г. Джамалов и Т.И. Сафронова установили наличие роста годового, зимнего меженного и минимального речного стока на большей части исследуемой территории, о чём рассказано в источнике [1].

Производя оценку изменения речного стока для разных месяцев и различных частей территории Восточной Сибири, Л.С. Лебедева установила, что для зимнего сезона наиболее велика доля постов, на которых присутствует статистически значимое увеличение речного стока. Эта доля составляет 40-50% от общего числа рассматриваемых постов. В мае и с августа по октябрь статистически значимое увеличение речного стока наблюдается на трети постов. Также исследование автора показало, что по наличию статистически значимых положительных трендов в изменении характеристик зимнего стока западная часть Якутии является более стабильной, чем восточная и южная области, в которых доля статистически значимых трендов выше [2; 3].

Материалы и методы исследования

В качестве объектов в исследовании были рассмотрены водосборы рек, расположенные в северной, центральной, южной частях Восточной Сибири, с площадью водосбора от 23 и до 165000 км². Были использованы имеющиеся в свободном доступе данные о среднегодовых, наименьших зимних и наибольших расходах воды по 18 гидрологическим постам с периодом наблюдения 1950-2020 гг. и по 8 постам, на которых период наблюдения начинается позднее 1950 г. В работе также были использованы данные о среднегодовых температурах воздуха и осадках, находящиеся в свободном доступе за период 1950-2020 гг. для температуры и 1966-2020 гг. для осадков, по метеорологическим постам и станциям: Сухана, Усть-Чаркы, Восточная, Килеер, Орлинга, Токо.

Оценка влияния климатических изменений на сток проводилась путем графического построения и оценки статистической значимости линейных трендов в рядах среднегодовых, наименьших зимних и наибольших расходов воды половодья по методике, рекомендованной ГГИ, при уровне значимости 5% [4]. В соответствии с этой методикой в качестве нулевой гипотезы принимается гипотеза отсутствия статистически значимых трендов в ходе многолетних колебаний расходов воды. Альтернативная гипотеза заключается в наличии статистически значимого тренда. Вычисляется средняя квадратическая ошибка коэффициента корреляции линейного тренда по формуле:

$$\sigma_r = (1 - r^2) / \sqrt{(n - 1)},$$

где r – коэффициент корреляции, n – объём выборки.

Уровень значимости 5% соответствует приблизительно удвоенной средней квадратической погрешности коэффициента корреляции. При получении значения меньшего, чем коэффициент корреляции, признаётся альтернативная гипотеза неоднородности во времени и нестационарности рассматриваемого гидрологического элемента.

Оценка статистической значимости проводилась по постам, данные по которым имеются за весь рассматриваемый период. Таких постов 9, они расположены на реках Лене, Нюе, Большом Патоме, Бирюке, Малой Черепанихе, Ботоме, Шестаковке, Якоките, Кэмпэндээйи. Практически все перечисленные посты расположены в Центральной Якутии, поэтому результаты статистического анализа характеризуют изменения расхода воды данной области Восточной Сибири.

Результаты

Анализ полученных результатов показал, что значения среднегодовых температур воздуха систематически возрастают с течением времени по всем рассматриваемым станциям, что свидетельствует о нестационарной климатической ситуации. Пример изменения среднегодовой температуры приведён на Рис. 1. В изменении количества годовых осадков однозначных тенденций выявлено не было.

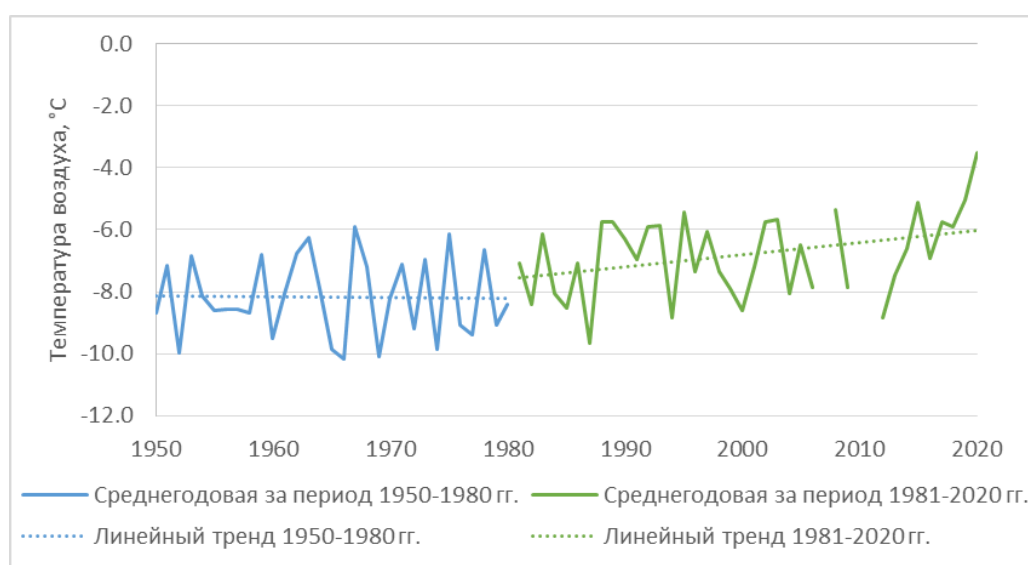


Рис. 1 Изменение среднегодовой температуры воздуха на примере данных метеорологической станции Килеер.

Анализ рядов среднегодовых расходов воды показал, что на 2/3 рассматриваемых постов величина среднегодового расхода воды испытывает рост. На трёх постах, расположенных на юго-западе территории, тенденция отрицательная (Рис. 2). Данные посты расположены на реках Бирюльке, Купе, Киренге. Оценка статистической значимости линейных трендов показала, что на пяти постах из девяти присутствует положительный статистически значимый тренд. Данные посты находятся на таких реках, как Бирюк, Ботома, Шестаковка, Якокит, Кэмпэндээйи.

Анализ графиков изменения наименьших зимних расходов воды на непромерзающих реках показал, что практически на всех рассмотренных постах наблюдается рост величин, пример такого роста приведён на Рис. 3. Обратная тенденция присутствует только на одной из рек, Купе. Была выполнена проверка на наличие статистически значимых трендов в изменении наименьших зимних расходов воды по постам, расположенным на непромерзающих реках, данные по которым имеются за весь рассматриваемый период. Таких постов пять, они расположены на реках Лене, Нюе, Большом Патоме, Бирюке, Ботоме. На трёх реках статистически значимые тренды были обнаружены, а именно на Нюе, Бирюке, Ботоме.

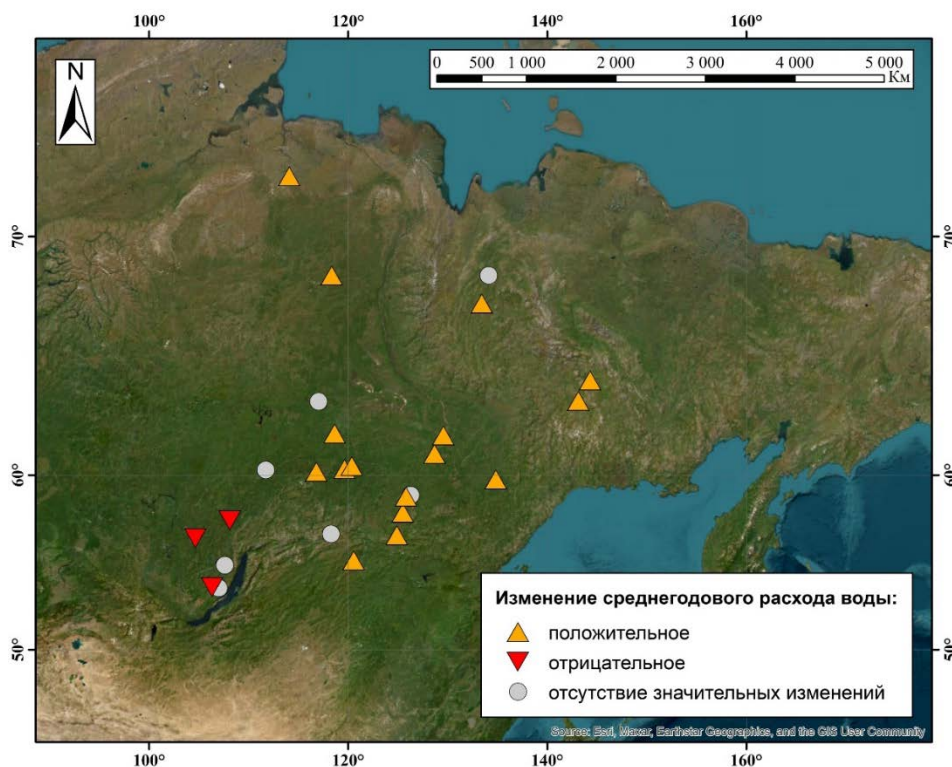


Рис. 2 Направленность изменения среднегодовых расходов воды на постах.

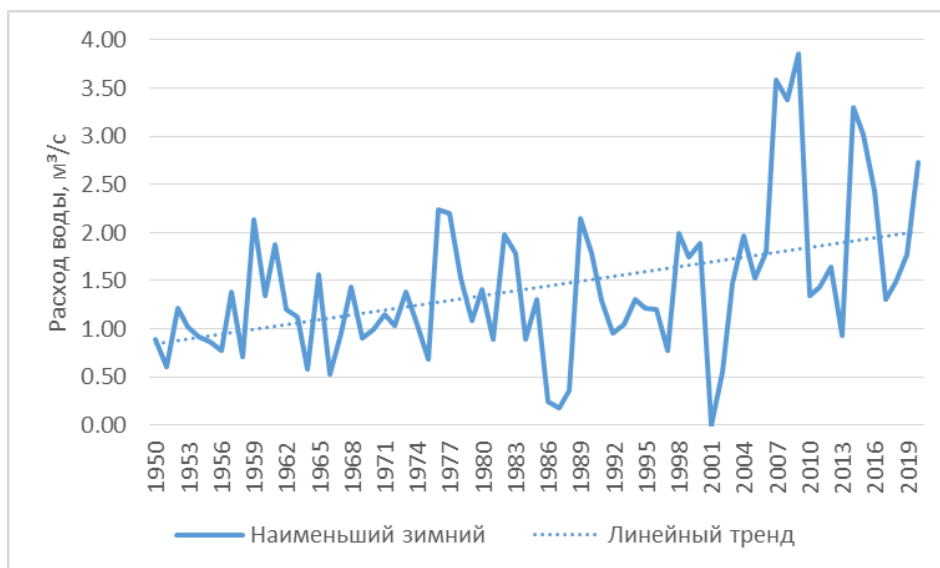


Рис. 3 Изменение наименьшего зимнего расхода воды на реке Ботома (г.п. Бролог).

Изменение наибольших расходов воды половодья имеет различную направленность на реках Восточной Сибири. Примерно на половине постов наблюдается их уменьшение. Такая тенденция характерна для рек южной части рассматриваемой территории, также она прослеживается на востоке в верховье реки Индигирки. Рост наблюдается на таких реках, как Малая Черепаниха, Шестаковка, Якокит, Мая, Кэмпэндээйи, Марха, Оленёк, Яна, Бытантай. Снижение – на Лене (в верховье, в районе села Чанчур), Бирюльке, Купе, Киренге, Ньюе, Большом Патоме, Олёкме, Чаре, Алдане, Большом Нимныре, Чульмане, Индигирке (Рис. 4). Статистически значимые тренды в изменении наибольших расходов воды половодья обнаружены не были.



Рис. 4 Изменение наибольшего расхода воды половодья на реке Большой Патом (с. Патома).

Выводы

Выявлены тенденции изменения среднегодовых расходов воды, наибольших расходов воды весеннего половодья и наименьших зимних расходов воды на реках Восточной Сибири. Результаты показали, что при однозначном положительном изменении температуры воздуха изменение среднегодовых расходов рек Восточной Сибири имеет неодинаковую направленность, однако преобладает положительный тренд. Помимо этого, рост испытывают значения наименьших зимних расходов на непромерзающих реках. Тенденции изменения значений наибольших расходов воды половодья имеют различную направленность на разных реках территории.

Предположительно, различная направленность изменений среднегодовых и наибольших расходов воды половодья может быть вызвана влиянием многолетней мерзлоты и зависеть от характера её распространения.

Список литературы

1. Джамалов, Р.Г. Влияние многолетнемерзлых пород на формирование водных ресурсов Восточной Сибири (на примере отдельных рек Восточной Сибири) / Р.Г. Джамалов, Т.И. Сафронова // Водные ресурсы. – 2018. – Т. 45, № 4. – С. 341-352.
2. Лебедева, Л.С. Изменение стока рек в криолитозоне Восточной Сибири / Л.С. Лебедева // Глобальные проблемы Арктики и Антарктики : Сборник научных материалов Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня рождения акад. Николая Павловича Лавёрова, Архангельск, 02–05 ноября 2020 года / Ответственные редакторы: А.О. Глико, А.А. Барях, К.В. Лобанов, И.Н. Болотов. – Архангельск: Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Российской академии наук, 2020. – С. 125-126.
3. Лебедева, Л.С. Изменения зимнего стока малых, средних и крупных рек Якутии / Л.С. Лебедева // Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития / МГО 2020 имени Л.Н. Карлина : труды IV Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 16–17 декабря 2020 года. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2020. – С. 220-223.
4. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным // Санкт-Петербург: издательство «Нестор-История». – 2010. – 162 с.

Структура водопользования в городах России

Н.Д. Ахмерова, О.Н. Ерина *

*Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
erina.oxn@gmail.com*

Аннотация. В работе рассмотрена структура водопользования в крупнейших городах России с численностью населения более 140 тысяч человек. Анализируются географические и социальные причины выявленных различий в специализации городского водопотребления между городами различных федеральных округов. Объемы удельного водопотребления снижаются по мере уменьшения численности населения городов, а также связаны с обеспеченностью региона водными ресурсами. Показано, что в Центральном федеральном округе преобладает коммунальное водопотребление, тогда как в Сибирском и Уральском федеральных округах основной объем городского водопотребления используется для удовлетворения промышленных нужд.

Ключевые слова: городское водопотребление, структура водопользования, загрязнение вод, водозабор, очистка сточных вод.

Structure of water use in Russian cities

N. Akhmerova, O. Erina *

*Lomonosov Moscow State University, Russia
erina.oxn@gmail.com*

Abstract. The article considers the structure of water use in the largest cities of Russia with a population of more than 140 thousand people. The article touches upon the issue of the geographical and social reasons for the revealed differences in the specialization of urban water consumption between cities of different federal districts. The volume of specific water consumption decreases as the population of cities decreases, and is also associated with the availability of water resources in the region. It is shown that municipal water consumption prevails in the Central Federal District of Russia, whereas in the Siberian and Ural Federal Districts the bulk of urban water consumption is used to meet industrial needs.

Keywords: urban water use, structure of water use, water pollution, water intake, waste water depuration

Введение

Города – сложные многофункциональные природно-антропогенные системы, которые оказывают значительное и разнообразное воздействие на окружающую среду, включая водные экосистемы. Несмотря на наличие множества работ, посвященных влиянию конкретных городов на водные объекты, а также работ, посвященных водосборам крупных рек, вплоть до сегодняшнего дня недостаточно внимания уделяется обобщению данных по структуре использования воды и водопотреблению, водоотведению, качеству воды, практически отсутствуют обобщения по всей территории России. Наиболее крупные и современные опубликованные работы посвящены анализу состояния качества воды Волги, Дона, Оки, Белой, Лены и других рек [3].

Существуют также обобщения по регионам, опубликованные в государственных докладах «О состоянии природных ресурсов и окружающей среды», выпускаемых министерствами природопользования и экологии каждого региона. Однако в данных докладах приводятся результаты мониторинга качества воды в очень общем виде; в них мало анализа данных, нет анализа многолетней изменчивости и динамики показателей водохозяйственного комплекса. Поэтому основной целью данной работы является изучение и анализ пространственной структуры водопотребления и водоотведения в городах России.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования выбраны 121 крупнейший по численности населения город России (численностью населения более 140 тысяч человек на 1 января 2022 года). Пространственный охват расположения городов включает 75 регионов России.

Информационной основой исследований служат: данные по форме 2ТП-Водхоз, публикуемые на информационной платформе АИС ГМВО; схемы водоснабжения и водоотведения городов; информация из базы данных муниципальных образований, а также гидрологическая информация об водных объектах – приемниках сточных вод.

Результаты и обсуждение

Распределение городов на территории России очень неравномерно: большая часть городов, особенно крупных, сосредоточена на западе и юго-западе страны – в так называемой «основной зоне расселения». Эта зона занимает примерно треть общей площади страны, однако там сосредоточено более 90% населения. Соответственно, в данной зоне плотность населения куда выше, чем, например, в Сибири. Так, плотность населения Краснодарского края, согласно данным Федеральной службы государственной статистики на начало 2022 года составляла 74,8 человек на км², а республики Саха (Якутия) – 0,32 человека на км² [5]. Подобное распределение обусловлено различными факторами:

1) климатическими условиями – лишь 10% территории России имеют условия, удобные для жизни. Е. Б. Лопатина и О.Р. Назаревский провели комплексную оценку природных условий России для жизни людей по 30 различным показателям, главным образом – климатическим характеристикам (средние температуры, осадки, продолжительность безморозного периода, годовые амплитуды температур и т.д.). [Лопатина, Назаревский, 1972];

2) особенностями исторического развития – связаны с освоением и заселением новых территорий. Это также объясняет уменьшение плотности населения России с запада на восток – ведь именно так шло освоение новых земель;

3) социально-экономические факторы – наличие полезных ископаемых, транспортная доступность.

Различия в факторах образования городов и их современной специализации обуславливают также различия в объеме и структуре водопотребления; объеме, структуре и составе сточных вод [1].

Водозабор. Объем водозабора в среднем для городов значительно различается между федеральными округами (ФО): наибольший водозабор в среднем характерен для городов Сибирского ФО (179,3 млн м³ за год для города) и Северо-Западного ФО (129,6 млн м³ за год для города). Минимален водозабор в городах Северо-Кавказского и Дальневосточного ФО (26,1 и 46,0 млн м³ соответственно).

Если рассматривать отдельные города, то лидерами в потреблении воды, безусловно, являются города-миллионники – Санкт-Петербург 856 млн м³, Нижний Новгород 729 млн м³, Москва 698 млн м³, Новосибирск 536 млн м³, Красноярск 424 млн

м³ в год. Кроме того, в данных городах расположены крупные ГЭС (Красноярская, Новосибирская), центры машиностроения (Санкт-Петербург, Нижний Новгород, Новосибирск, Красноярск, Москва), черной и цветной металлургии (Красноярск, Новосибирск) и прочие производства, требующие значительного водозабора.

Минимален водозабор преимущественно в городах с населением до 200 тысяч человек, таких как Альметьевск 0,13 млн м³ за год, Керчь 0,32 млн м³ за год, Махачкала 1,13 млн м³ за год, Копейск 1,45 млн м³ за год, Прокопьевск 1,72 млн м³ за год. Исключение составляет Махачкала, численность населения в которой – 604 тыс. человек. Вероятно, это обусловлено большой долей неконтролируемого водозабора (частные скважины, колодцы).

По величине удельного водопотребления также лидируют города Сибирского ФО (396,2 м³ на человека в год). Так, в Ангарске водопотребление достигает – 1593 м³/чел в год, Норильске – 1503 м³/чел в год, Братске – 1277 м³/чел в год и Бийске – 1129 м³/чел в год. Подобные величины связаны, вероятно, с расположением в этих городах крупных центров машиностроения (Бийск), цветной металлургии (Норильск), нефтехимической промышленности (Ангарск, Братск), крупнейшей ГЭС – Братской. Также важно отметить, что данный регион богат водными ресурсами – по его территории протекают крупнейшие реки Азии: Енисей (на нем и его притоках стоят Ангарск, Братск, Иркутск, Красноярск) и Обь (Новокузнецк, Кемерово, Барнаул).

В остальных округах среднее удельное потребление составляет от 150 до 200 м³ на человека в год; минимальное – в Северо-Кавказском и Центральном ФО – 82,4 и 103 м³ на человека в год соответственно.

Основная часть воды для водоснабжения городов России во всех федеральных округах забирается из поверхностных источников. Особенно велика разница в долях забираемой из поверхностных и подземных источников в городах Северо-Западного ФО, где 98,9% водозабора приходится на поверхностные источники. Наибольшая доля подземных источников в структуре водозабора приходится на города Северо-Кавказского ФО, где составляет почти половину – 48,5%. Подобное распределение обусловлено различными факторами. Так, часть округов очень богаты поверхностными водными ресурсами, например, Сибирский (Енисей, Обь), Уральский (Обь), Приволжский (Волга), Северо-Западный (Северная Двина, Печора) федеральные округа. Также определенное влияние оказывает широкое распространение в Сибирском, Уральском и Дальневосточном округах вечной мерзлоты, которая затрудняет использование подземных водных ресурсов. При этом в Центральном и Приволжском федеральных округах очень велика концентрация крупных городов, которые экономически невыгодно снабжать более чистыми, но и более дорогими подземными водами.

Северо-Кавказский же федеральный округ беден поверхностными ресурсами; количество крупных городов там невелико и экономически целесообразнее использование для водоснабжения подземных источников.

Структура водопотребления в городах РФ. В большинстве округов в структуре водозабора преобладает забор на промышленные нужды, особенно выраженный в городах Сибирского ФО (где также максимален общий объем водозабора). Преобладание коммунального водозабора наблюдается в городах только двух ФО: Центрального и Южного. Потребление воды на сельскохозяйственные нужды по сравнению с потреблением на коммунальные и промышленные – крайне мало и не превышает 7,1% (Южный ФО), в среднем составляя около 1,0%, т.к. по большей части сельское хозяйство в пределах городов с населением более 140 тыс. человек отсутствует; максимум в городах Южного ФО объясняется спецификой региона, в котором сельское хозяйство в связи с природными особенностями региона занимает важную роль в экономике.

Сброс вод. Распределение объемов сброса, по очевидным причинам, совпадает с распределением объемов водозабора. Соотношение типов (по санитарной классификации) сточных вод, сбрасываемых городами различных федеральных округов весьма различно. В формах 2ТП-Водхоз выделяют три типа отводимых вод по степени их загрязненности: нормативно чистые сточные воды, нормативно очищенные сточные воды, загрязненные.

В большинстве округов преобладают загрязненные воды, особенно – в городах Северо-Кавказского и Центрального округов, где доля загрязненных вод составляет 90,4 и 72,9% соответственно. Наиболее «чистые» сточные воды в городах Южного и Сибирского округов – там доля нормативно чистых и нормативно очищенных вод составляет 77,9 и 60,4% соответственно.

В целом заметна связь между высоким потреблением городами Сибирского округа вод для промышленных целей и тем, что в данном округе заметно больше доля чистых и нормативно очищенных вод, что, очевидно, связано с водозабором в целях использования в производстве электроэнергии на ГЭС, ТЭС и АЭС, расположенных в административных границах городов, а также в различных отраслях промышленности.

Кроме того, прослеживается связь между числом крупных городов и количеством загрязненных вод, сбрасываемых в среднем городами округов: в городах Северо-Западного и Центрального округов доля таких вод выше.

Выводы

Структура городского водопользования на территории России подвержена значительным различиям под воздействием комплекса географических факторов. Города различных федеральных округов характеризуется различной специализацией в промышленности, численности населения, качеством очистных сооружений. Так, Центральный округ характеризуется большим числом крупных городов, что обуславливает значительную нагрузку коммунальными сточными водами, тогда как в Сибирском, Уральском и Приволжском округах широко распространена тяжелая промышленность: машиностроение, черная и цветная металлургия, и специфика водопользования в большей мере подчиняется требованиям промышленности по сравнению с не столь значительными объемами коммунального водопотребления.

Список литературы

1. Войнова Л.В. Экономическая география. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров, 2015. – 88 с.
2. Лопатина Е.Б., Назаревский О.Р. Оценка природных условий жизни населения. – Москва, 1972. – 148 с.
3. Никаноров, А. М., Хоружая, Т. А., Миронова Т.В. Анализ влияния мегаполисов на качество воды поверхностных водных объектов по эколого токсикологическим показателям // Водные ресурсы. – 2011. – Т. 38. – № 5. – С. 577-584.
4. Субботина Ю.М. Эколого-социальные аспекты использования и охраны водных ресурсов // Социальная политика и социология. – 2012. – Т. 5. – С. 166-176.
5. Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282>.

Оценка доли ледникового стока в питании высокогорных рек Алтая с использованием изотопного метода

Д.В. Банцев^{1*}, А.А. Овсепян¹, А.В. Козачек^{1,2}, К.Б. Чихачев^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

²Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, Россия
bancev-d@yandex.com

Аннотация. Представлены результаты изотопных исследований ледникового льда, снега, фирна, атмосферных осадков и речных вод на территории Алтая. По полученным данным оценен вклад ледникового питания в сток рек, берущих начало в крупных центрах оледенения (массивы Табын-Богдо-Ола, Цамбагарав, Монгун-Тайга, Южно-Чуйский хребет). Определены различия в изотопном составе ледникового льда, связанные с разными условиями аккумуляции и морфологическими типами ледников. Также показаны различия между вкладом талых ледниковых вод в сток на территории исследуемых горных массивов. В целом представлены средние изотопные характеристики формирующих сток объектов, которые в дальнейшей перспективе можно использовать для разделения гидрографов рек Алтая и оценки вклада различных компонентов в их питание.

Ключевые слова: Алтай, ледниковый сток, стабильные изотопы воды.

Estimation of glacier meltwater share in runoff of high- mountainous rivers in the Altai mountains using the isotope method

D.V. Bantcev^{1*}, A.A. Ovsepyan¹, A.V. Kozachek^{1,2}, K.B. Chikhachev^{1,2}

¹St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

²Arctic and Antarctic research Institute, St. Petersburg, Russia
bancev-d@yandex.com

Abstract. The results of isotopic studies of glacial ice, snow, firn, precipitation and river waters in the Altai mountains are presented. According to the obtained data, the contribution of glacial alimentation in river runoff was estimated. Investigated rivers originate in large glaciation centers (the Tavan-Bogd, Tsambagarav, Mongun-Taiga massifs, South Chuya Ridge). Differences in the isotopic composition of glacial ice are determined. These differences are associated with different accumulation conditions and morphological types of glaciers. The differences between the contribution of glacier meltwater in runoff for the studied mountain ranges are also shown. In general, the average isotopic characteristics of the runoff-forming objects are presented. In the future, these characteristics can be used for the hydrograph separation of the Altai rivers. These characteristics also can be used for various component's contribution to alimentation of rivers estimation.

Keywords: Altai, glacier runoff, water isotopes.

Введение

В условиях современных климатических изменений и продолжающегося сокращения ледников гидрологические исследования высокогорных районов с развитым современным оледенением приобретают особую актуальность. Для оценки доли ледниковой составляющей в сток использование изотопных индикаторов ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) является одним из наиболее применимых методов.

Изотопные исследования проводились на территории Юго-Восточного Алтая (массивы Табын-Богдо-Ола, Монгун-Тайга), северо-западной Монголии (массив Цамбагарав) и Центрального Алтая (Южно-Чуйский хребет). Все рассматриваемые районы за исключением Южно-Чуйского хребта отличаются аридным климатом и, следовательно, современное оледенение играет большую роль в питании высокогорных рек. Соответственно, существует потребность в количественном определении доли ледникового стока. Карта-схема исследуемых районов показана на Рис.

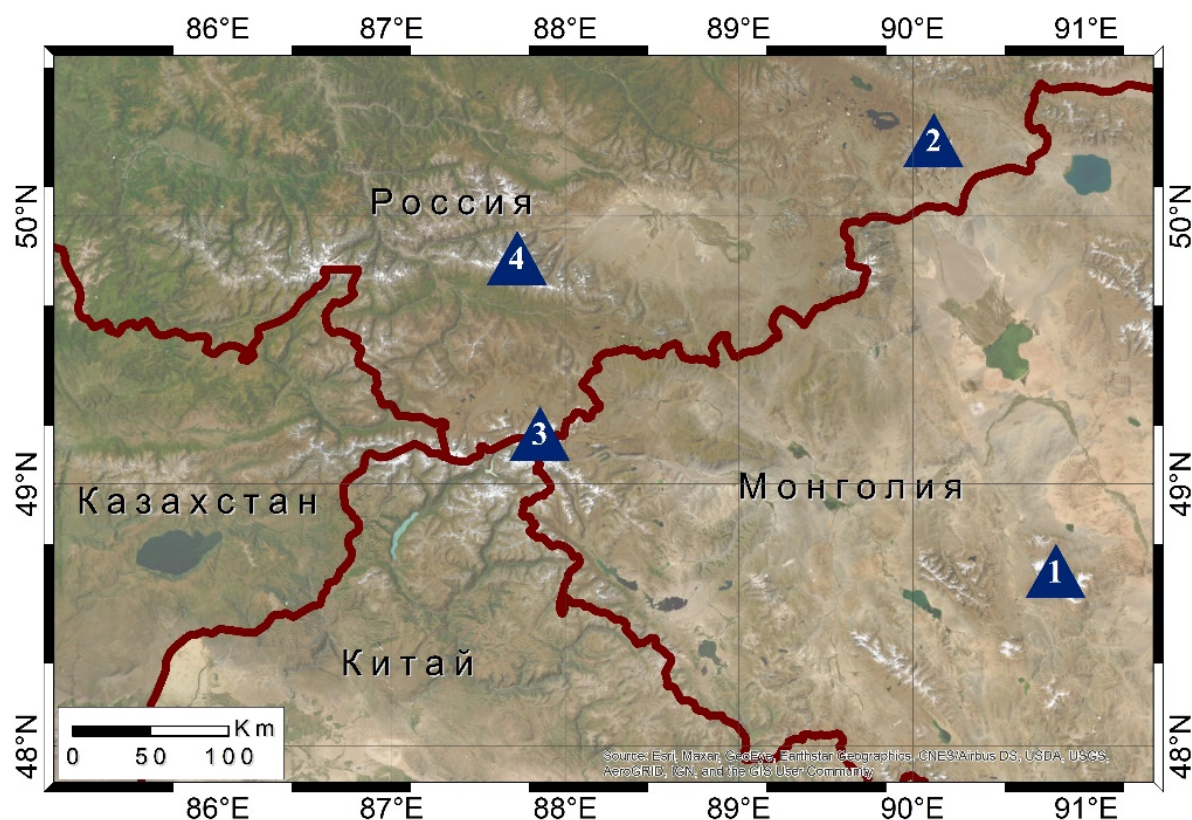


Рис. Исследуемые районы. 1 – массив Цамбагарав; 2 – массив Монгун-Тайга; 3 – массив Табын-Богдо-Ола; 4 – Южно-Чуйский хребет.

Имеются две основные точки зрения на то, что включает понятие «ледниковый сток». Согласно первой, ледниковый сток – это вся вода, образованная путем таяния на поверхности ледника. Согласно второй – за ледниковый принимается сток за счет таяния многолетних запасов фирна и льда. В данном исследовании под понятием ледниковый сток подразумевается только таяние многолетних запасов фирна и льда, поскольку упомянутый подход отражает основную гидрологическую роль ледников, заключающуюся в накоплении осадков и временном исключении их из круговорота воды с последующим перераспределением по годам [1].

Материалы и методы исследования

В основе исследования лежит применение относительных концентраций стабильных изотопов воды: $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$. Изотопный анализ производился в ЛИКОС

ААНИИ на газовом анализаторе Picarro L2120-i с точностью измерений 0.05 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и 0.5 ‰ для $\delta^2\text{H}$.

Во время экспедиционных работ образцы воды отбирались в герметичные пробирки емкостью 50 мл. Объем пробы составлял, как правило, 40 мл. Пробы из водотоков отбирались напрямую в пробирки, а пробы льда – с поверхности зоны абляции через относительно равные промежутки, создавая регулярную сеть отбора проб. Ледниковый лед отбирался в герметичные пластиковые пакеты. Отбор проб осуществлялся с поверхности ледника ледорубом. Верхние 5 см льда счищались, затем откалывался кусок льда объемом 200-300 мл, который далее расплавлялся при температуре окружающей среды и тщательно перемешивался, после чего 40 мл отбирались в пробирки. Снег с поверхности ледников отбирался сразу в пробирки.

Определение доли каждого компонента в работе проводились с помощью уравнения изотопного баланса вида:

$$R^{18}\text{O}_1f_1 + R^{18}\text{O}_2f_2 = R^{18}\text{O},$$

где $R^{18}\text{O}_1$ – изотопный состав первого компонента, f_1 – доля первого компонента, $R^{18}\text{O}_2$ – изотопный состав второго компонента, f_2 – доля второго компонента, $R^{18}\text{O}$ – результирующий изотопный состав [2].

Результаты и выводы

Перед изотопным разделением необходимо определить средние значения $\delta^{18}\text{O}$ компонентов, формирующих сток. Для массивов Цамбагарав, Табын-Богдо-Ола и Монгун-Тайга в качестве таких компонентов рассматривались ледниковый лед и сезонный снег на поверхности ледника, так как согласно используемому подходу [1] талые воды сезонного снега не относятся к ледниковому стоку. Результаты определения изотопного состава льда на территории исследуемых районов показаны в Табл.

Далее с использованием данных об изотопном составе второго компонента определялась доля талых ледниковых вод в водотоках. На территории Южно-Чуйского хребта в качестве второго компонента рассматривался не сезонный снег, а атмосферные осадки. Изотопное разделение было выполнено для указанных в Табл рек, место отбора – 2-5 км от ледника. На территории массива Табын-Богдо-Ола также отбирались пробы из притоков ледникового происхождения. Результаты разделения показаны в Табл. Для массива Табын-Богдо-Ола в скобках указаны диапазон долей талых ледниковых вод в стоке притоков.

Табл. Изотопный состав компонентов и результат изотопного разделения [3; 4].

Район	Основная река, бассейн	$\delta^{18}\text{O}$ льда (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ снега или осадков (‰)	Доля талых ледниковых вод в стоке (%)
Цамбагарав	Эрегтийн, бессточный бассейн Центральной Азии	-16.7	-12.6	76
Монгун-Тайга	Мугур, бессточный бассейн Центральной Азии	-17.7	-13.4	80
Табын-Богдо-Ола	Аргамджи, бассейн Оби	-19.4	-11.9	53 (25-78)
Южно-Чуйский хребет	Талдура, бассейн Оби	-17.3	-11.2	75

Во-первых, необходимо объяснить различия в изотопном составе ледникового льда. Наиболее тяжелый состав наблюдается во льду ледников массива Цамбагарав, поскольку он находится в наиболее аридных условиях. Вдобавок влияние оказывает максимальная доля летних осадков во внутригодовом распределении (89%). На территории массива Табын-Богдо-Ола изотопный состав льда наиболее легкий, так как на западе массива, где и находился исследуемый ледник, выпадает больше осадков (до 800 мм), и большая доля осадков выпадает в холодный период.

Для большинства исследуемых водотоков характерно полное преобладание талых ледниковых вод (75-80%), что неудивительно, ведь отбор проб производился в непосредственной близости от краев ледников. Исключение – массив Табын-Богдо-Ола. Связано это с большим количеством осадков и высоким расположением краев ледников (выше 3000 м). На территории Южно-Чуйского хребта количество осадков сопоставимо, но большая доля ледникового стока связана с наличием там более крупных долинных ледников, которые спускаются до высоты 2600 м. На территории массива Табын-Богдо-Ола минимальные значения доли ледникового стока характерны для водотоков, начинающихся у небольших каровых ледников, потому что на них наилучшие условия для накопления сезонных осадков.

Таким образом, доля талых вод в стоке рек ледникового происхождения на территории исследуемых массивов зависит не только от количества осадков и их внутригодового распределения, но и от характера оледенения.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 23-27-00173 «Оценка вклада различных источников питания в сток ледниковых рек Юго-Восточного Алтая по данным изотопных индикаторов».

Acknowledgments

The work was supported by Russian Science Foundation, project No. 23-27-00173 "Estimation of various components contribution to the glacial streams runoff in the Southeastern Altai according to isotope indicators".

Список литературы

1. Глазырин Г.Е. Влияние сокращения оледенения на сток рек в Средней Азии // Лед и Снег. 2013. № 53 (3). С. 20-25.
2. Чижова Ю.Н., Рец Е.П., Васильчук Ю.К., Токарев И.В., Буданцева Н.А., Киреева М.Б. Два подхода к расчету расчленения гидрографа стока реки с ледниковым питанием с помощью изотопных методов // Лед и Снег. 2016. №56 (2). С. 161-168.
3. Bantsev D.V., Ganyushkin D.A., Chistyakov K.V., Volkov I.V., Ekaykin A.A., Veres A.N., Tokarev I.V., Shtykova N.B., Andreeva T.A. The Components of the Glacial Runoff of the Tsambagarav Massif from Stable Water Isotope Data // Geosciences. 2019. V. 9. P. 290-308.
4. Bantsev D., Ganyushkin D., Terekhov A., Ekaykin A., Tokarev I., Chistyakov K. Isotopic Composition of Glacier Ice and Meltwater in the Arid Parts of the Altai Mountains (Central Asia) // Water. 2022. Vol. 14. 252. P. 1-11.

Разработка макета измерительной установки в LabVIEW для регистрации увеличения расходов воды и передачи информации по компьютерной сети

Ю.В. Безруких

*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия
julia.98.1221@mail.ru*

Аннотация. Мониторинг водотоков для автономного учёта стока воды является первостепенной задачей при интенсивном освоении территорий и использовании водных ресурсов для удовлетворения потребностей сельского хозяйства, промышленности, гидроэнергетики и коммунально-бытового хозяйства. В настоящее время запатентовано несколько устройств для измерения расходов воды, которые работают на акустической связи между расходом воды и частотой акустических волн, исходящих от водотока. В основном во всех устройствах содержится акустический датчик, который представляет собой гидрофон, работающий в диапазоне 100 Гц – 10 кГц, герметично встроенный в отсекающий-ограничитель посторонних шумов. Главными недостатками подобных устройств может стать дороговизна, габариты и неприменимость устройств для горных потоков с бурным течением. В данной работе предложен макет измерительной установки, разработанный в среде LabVIEW, для регистрации гидроакустических сигналов, связанных с увеличением расходом. Также с помощью компьютерной сети и протокола TCP/IP, информацию, а в нашем случае гидроакустические сигналы, можно будет передавать в режиме реального времени на иное устройство.

Ключевые слова: расход воды, макет измерительной установки в среде LabVIEW, передача данных, гидроакустические сигналы.

Development of a layout of a measuring unit in LabVIEW for recording an increase in water consumption and transmitting information over a computer network

J.V. Bezrukikh

*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia
julia.98.1221@mail.ru*

Abstract. Monitoring of watercourses for autonomous accounting of water runoff is a primary task in the intensive development of territories and the use of water resources to meet the needs of agriculture, industry, hydropower, public utilities, as well as the needs of other sectors of the national economy. At the moment, several devices for measuring water flow have been patented, which operate on an acoustic connection between water flow and the frequency of acoustic waves emanating from the watercourse. Basically, all devices contain an acoustic sensor, which is a hydrophone operating in the range of 100 Hz -10 kHz, hermetically built into the clipper-limiter of extraneous noise. Main disadvantages of such devices may be the high cost, dimensions and non-applicability of devices for mountain streams with a rough current. In this paper, a model of a measuring installation developed in the LabVIEW program for

recording hydroacoustic signals associated with an increase in flow rate is proposed. Also, with the help of a computer network and the TCP/IP protocol, information, in our case hydroacoustic signals, can be transmitted in real time to another device.

Keywords: water flow, layout of the measuring unit in the LabVIEW, data transmission, hydroacoustics signals.

Введение

Звуковые сигналы, которые создаются в результате бурных режимов течения, уже не первый десяток лет изучают как зарубежные ученые, так и отечественные. В такой области, как гидроакустика, разделе акустики, занимающимся изучением распространения звуковых волн в воде, активно ведутся исследования природных звуков. Любой водоток представляет собой источник звуков разной интенсивности и частоты, а интенсивность звукового давления потоков жидкостей, характеризуемая частотой акустической волны, прямо пропорциональна их расходу. На взгляд автора, совместно с инженерами в области гидроакустики, гидрологи смогут найти применение таким приборам, как гидрофон и осциллограф, и осуществить сбор корректных данных для дальнейших исследований и изучений.

Макет измерительной установки — это модель существующего прибора, в которой реализуются не только средства управления (рукоятки, кнопки, лампочки и т. п.), но и дальнейший ход работы макета. Связь программы с техническими объектами осуществляется через интерфейсы, представляющие собой драйверы внешних устройств, такими как: аналого-цифровой преобразователь, контроллеры и т. п. Исходя из поставленных задач, макет измерительной установки с дальнейшей передачей информации по компьютерной сети удобно создавать в программном обеспечении LabVIEW.

Материалы и методы исследования

Используя устройства, в основу которых положен принцип использования гидроакустического поля, можно решить множество технических задач: измерение глубины, определение рельефа дна, добыча полезных ископаемых, коммуникация в водной среде и многое другое. Но именно в рамках гидрологии, гидроакустические приемники можно использоваться для сбора полевых данных. К измерительным гидрофонам предъявляются специальные требования: необходимы большая чувствительность и стабильность при изменении температуры и гидростатического давления и малая зависимость чувствительности от частоты и направления прихода звука, а также постоянство параметров во времени.

Компьютерные сети обеспечивают быстрый обмен данными, совместное использование программного обеспечения, ресурсов (таких как принтер, сканер и т. д.), или, к примеру, совместную работу нескольких людей над одним проектом [5]. Сервер – это компьютер, предоставляющий доступ к собственным ресурсам, или управляющий распределением ресурсов сети. А клиент – это компьютер, использующий ресурсы сервера. Сетевые протоколы – это набор правил, благодаря которому реализуется соединение и обмен данными между несколькими (2-мя и более) устройствами, которые относятся к какой-либо сети [5]. Существует несколько уровней протокола, но для нашей задачи необходим будет транспортный уровень. Транспортный уровень отвечает за доставку переданной информации без потерь, ошибок в точно той же последовательности, что и нужно (как данные передаются – так они и поставляются получателю). Протоколы данного уровня работают по принципу «точка-точка». Примеры: TCP, UDP [7]. TCP/IP – это стек протоколов, представляющий собой основу Интернета [8]. Самый нижний, уровень сетевых интерфейсов, обеспечивает

взаимодействие с сетевыми технологиями (к примеру Wi-Fi). Это объединение функций канального и физического уровней OSI [8].

Применение установки для гидрологических работ

Регистрация гидроакустических сигналов осуществлялась в основном в морях для того, чтобы можно было получать измерительную информацию о событиях в водной среде с целью контроля на расстоянии состояния и функционирования технических и биологических систем различных объектов и изучения явлений природы. По отраженному гидроакустическому сигналу можно определять координаты источника звука в пассивном режиме работы шумопеленгаторной станции. Шумопеленгаторные станции (ШПС) — гидроакустические средства наблюдения, предназначенные для обнаружения подводных объектов, их классификации и определения пеленга (курсового угла) на них и ЭДЦ (элементов движения цели, прежде всего – курса) за счет приема энергии шумового поля, создаваемого объектом непреднамеренно в процессе обычного функционирования [8].

Что же касается применения данной установки на реках, то я предлагаю использовать ее на гидрологических постах для фиксирования увеличения расходов. Как правило увеличение расходов несет за собой увеличение уровня, вызванное весенним таянием снега на равнинах, летним таянием снега и ледников в горах, обильными дождями (например, летними муссонами). А если продолжить логическую цепочку, то схематично она выглядит следующим образом:

Увеличение расхода=увеличение уровня малых и больших рек=> интенсивное затопление большой территории водой выше ежегодных уровней

Используя установку для прогностических целей увеличения расхода, можно будет заранее предупредить население, что в скором времени из-за увеличения уровня на больших и малых реках может сложиться неблагоприятная ситуация, и ближайшие территории могут быть затоплены.

Конструкторская часть

В среде разработки LabVIEW была разработана лабораторная установка для многоканальной регистрации гидроакустических сигналов.

Виртуальный прибор состоит из двух частей: блок-схема «устройство-сервер» (Рис. 1) для управляемого компьютера, и блок-схема «устройство-клиент» (Рис. 2) для управляющего компьютера. Для проведения эксперимента мы записываем сигнал с гидрофона на «устройство-клиент», и затем с «клиента» передаем сигнал на «устройство-сервер». С «сервера» мы смотрим, какие данные получает «клиент».

При использовании стека протокола TCP/IP, пользователю предоставляется возможность передачи сигнала с гидрофона на соответствующее оборудование, где будет наглядно показан сигнал на осциллограмме.

Лабораторная установка в LabVIEW состоит из двух частей:

1. Блок-схем, описывающих работу виртуального прибора;
2. Лицевых панелей, описывающих внешний интерфейс устройства.

Блок-схемы содержат функциональные узлы, являющиеся источниками, приемниками и средствами обработки данных. Перечень основных блоков, которые использовались из библиотеки LabVIEW для создания виртуального прибора, перечислены на Рис. 1 и 2.

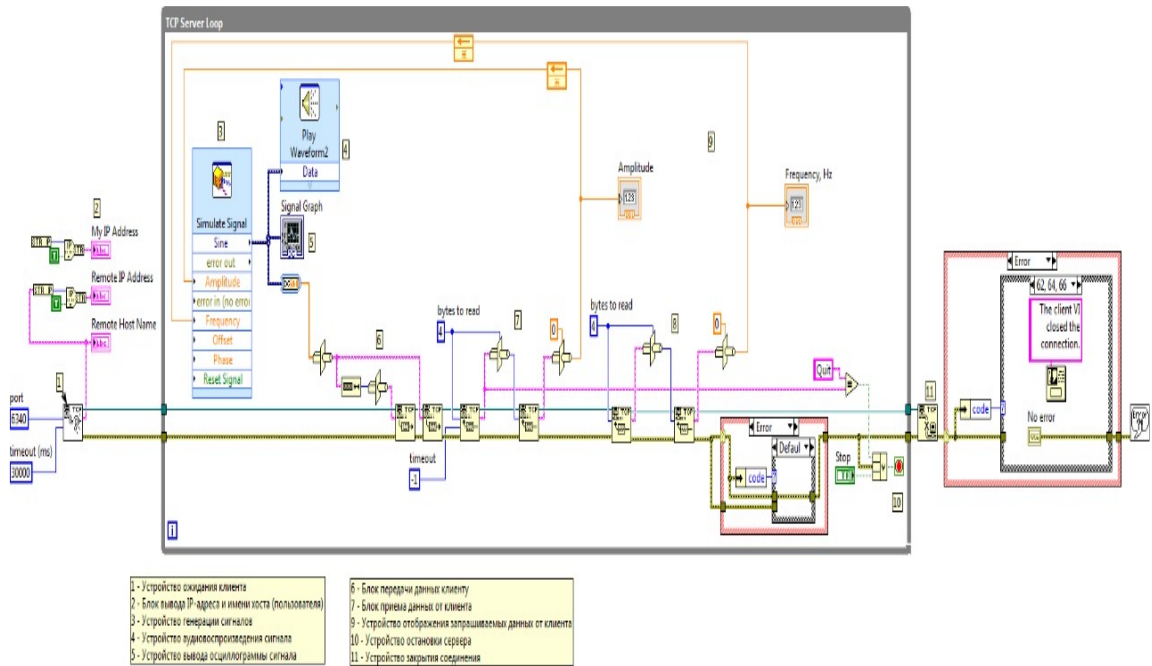


Рис. 1 Блок-схема «устройство-сервер».

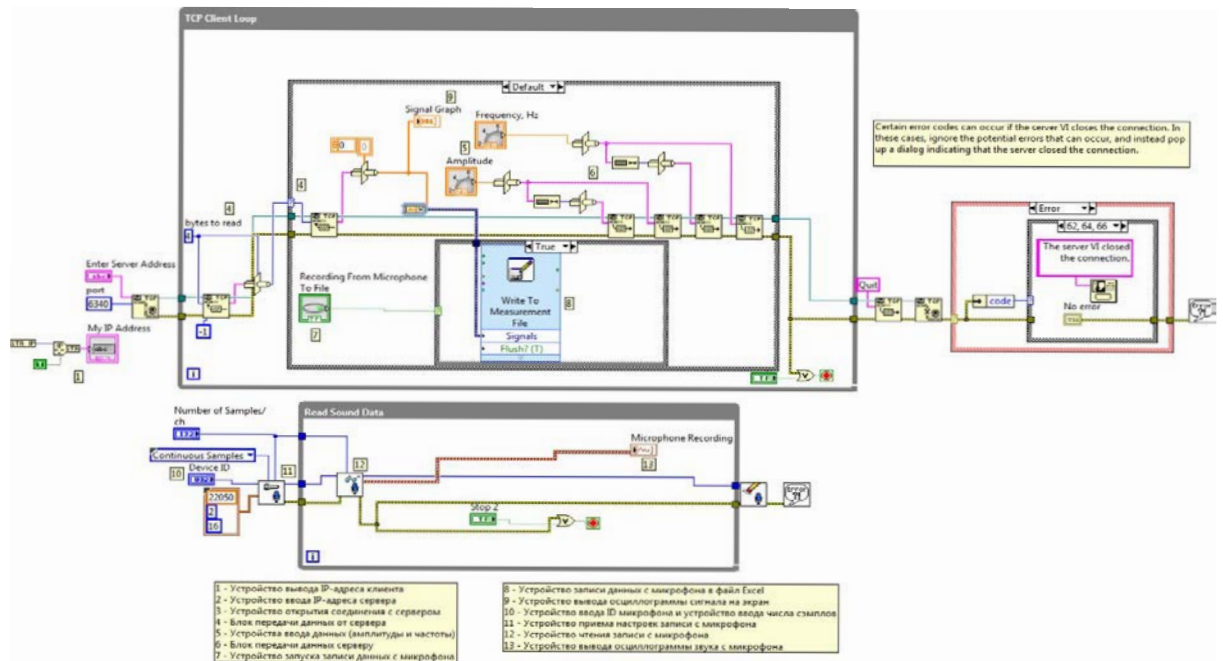


Рис. 2 Блок-схема «устройство-клиент».

Лицевая панель устройства клиент содержит средства ввода-вывода: кнопки, переключатели, информационные табло и т. п. и представлена на Рис. 3. А лицевая панель устройства сервер изображена на Рис. 4 и содержит осциллограмму сигнала, на которой мы можем увидеть параметры изучаемого определенной частоты и амплитуды сигнала.

Окна My IP Address, Enter Server Address отображают IP адрес клиента и сервера. Кнопка Stop позволяет пользователю закрыть соединения.

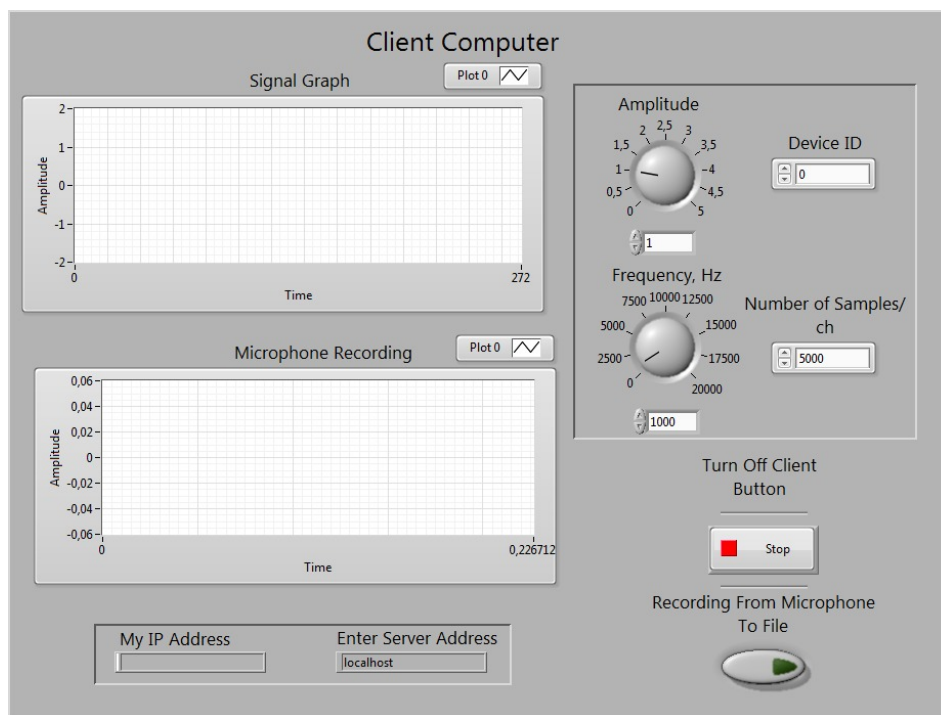


Рис. 3 Лицевая панель устройства Клиент.

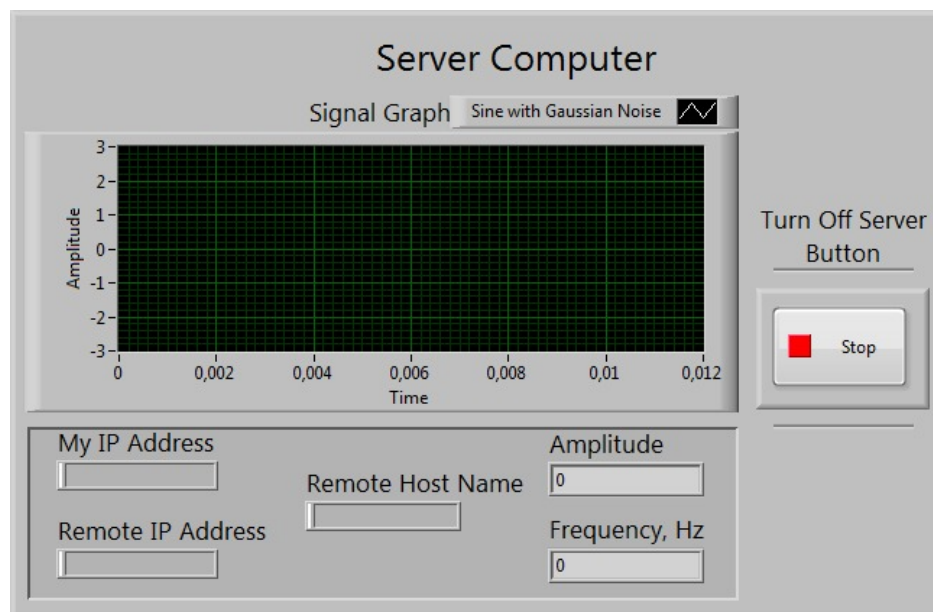


Рис. 4 Лицевая панель устройства Сервер.

Реализация лабораторной установки в программной среде имеет модульную структуру, что позволит в дальнейшем выполнить ее модификацию. Также перед нами поставлена задача передачи информации по беспроводной связи Wi-Fi, но также можно использовать устройства для обмена информацией между клиентом и сервером с использованием технологий сотовой связи GSM/GPRS на основе микросхем SIM 800 производства компании SIMCom (КНР). Связь осуществляется с помощью использования технологии локальных сетей, TCP протокол.

Передача данных на клиенте выстроена из следующих этапов:

1. Установка соединения (оператор задает время ожидания, в течение которого устанавливается связь, а также задает IP-адрес и порт с этим адресом.);

2. Считывание и запись данных (передача в виде ряда);
3. Закрытие соединения;

Для сервера этапы приведены ниже:

1. Ожидание соединения (прослушивание);
2. Считывание и запись данных;
3. Закрытие соединения.

Экспериментальная часть. Условия работы установки

Для проведения экспериментальной части понадобятся такие устройства, как:

1. Гидроакустический приемник (гидрофон с частотный диапазоном: 3...100 000 Гц и температурой рабочей среды: -15...+20 °С);
2. Устройство, которое имеет аналоговый ввод-вывод, цифровой ввод-вывод и четыре 32-битные счетчик-таймера для генерации ШИМ (широтно-импульсной модуляции), и может проводить генерацию импульсов различной частоты, подсчет импульсов и др;
3. Генератор сигнала произвольной формы и стандартных функций, который можно подключить к многоканальному устройству ввода для генерации калибровочного сигнала.
4. Два компьютера, на которые можно установить программу LabVIEW, и запустить установку.

Суть эксперимента заключается в следующем: гидрофон будет подключен к внешнему многоканальному звуковому вводу (звуковая карта). Звуковая карта необходима для того, чтобы усиливать аналоговый сигнал, поступающий с гидрофона, а также оцифровывать с помощью встроенного АЦП (аналого-цифрового преобразователя). Затем к многоканальному устройству ввода для генерации калибровочного сигнала подключаем генератор сигнала произвольной формы и стандартных функций. Затем многоканальное устройство ввода (звуковая карта) подключается к компьютеру через интерфейс USB 2.0.

Следующим шагом будет запуск виртуальной дистанционной лабораторной установки в программной среде LabVIEW (National Instruments) как на первом персональном компьютере, на котором запускается блок-схема «устройство-сервер», так и на втором компьютере, только уже «устройство-клиент». К компьютеру «устройство-сервер» подключается всё вышеизложенное оборудование, в числе которого многоканальное устройство ввода с подключенными к нему гидрофоном и генератором сигналов. Сигналы с гидрофона и генератора поступают на устройство ввода, и в цифровом ввиду поступают на «устройство-сервер». Далее входящие сигналы в цифровой форме передаются с «компьютера-сервер» на «компьютер клиент» по протоколу TCP/IP в режиме реального времени.

И последним шагом является запись и сохранение сигнала на компьютере «устройство-клиент» в формате .wav для удобства последующей обработки.

Заключение

Разработанная измерительная установка позволяет проводить обработку гидроакустических сигналов, сохранять их, а самое главное — подстраивать программу под себя.

С использованием стека протоколов TCP/IP появляется возможность передавать полученные данных между «клиентом» и «сервером» для того, чтобы можно было в дальнейшем работать с полученными сигналами, обрабатывать их и сохранять на переносные устройства в режиме реального времени.

Саму установку со всеми необходимыми для работы приборами можно будет использовать в прогностических целях для заблаговременного информирования о поднятии уровня воды на больших и малых реках.

Список литературы

1. Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Сборник, выпуски 1-8, Изд-во АН СССР, 1957. 294 с.
2. Евтютов А.П., Митько В.Б. Инженерные расчеты в гидроакустике - Л.: Судостроение 1988. 288 с.
3. Кудрявцев В.И. Гидроакустика рыбохозяйственная. — М.: Изд-во ВНИРО, 2018. — 460 с.
4. Кришкин Н.О. Компьютерные сети от А до Я: классификация, стандарты и уровни // Библиотека программиста 2017. URL: <https://proglib.io/p/computer-network> (дата обращения: 27 августа 2023)
5. Красильников В. А., Звуковые и ультразвуковые волны в воздухе, воде и твердых телах, 3 изд., М., 1960; Морз Ф., Колебания и звук, пер. с англ., М. - Л., 1949. 122 с.
6. LabVIEW для всех [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: https://ozlib.com/873162/informatika/podklyuchenie_internetu (дата обращения: 27 августа 2023)
7. LabVIEW Руководство пользователя, /National Instruments Corporation. All rights reserved. Перевод на русский язык: Николаев С.В., 2007. 356 с.
8. Основы построения компьютерных сетей [Электронный ресурс] Режим доступа: URL:<https://murnik.ru/osnovy-postroeniya-kompyuternyh-setej> (дата обращения: 27 августа 2023)

Многолетняя изменчивость максимального стока рек бассейна Баренцева моря

В.А. Бирюкова¹, Л.С. Банщикова²

¹*Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, Россия
welga994@mail.ru*

²*Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия
banshchikovals@yandex.ru*

Аннотация. В современных условиях изменения климата возникает необходимость в детальном изучении характеристик речного стока с целью выявления закономерностей и трендов в многолетнем разрезе. Максимальный сток является одной из важнейших характеристик водного режима рек. В работе приведен анализ изменчивости максимального стока рек Кольского полуострова, а также факторов, влияющих на сток: максимальные снегозапасы, осеннее увлажнение, предвесенняя водность и промерзание почвы. Для оценки зависимости максимальных расходов воды весеннего половодья от основных стокоформирующих факторов на рассматриваемой территории были выделены 10 бассейнов малых и средних рек. Значения максимальных снегозапасов были получены с помощью пространственной интерполяции для каждого водного бассейна. Для расчета осеннего увлажнения использовались данные с 7 метеостанций, расположенных в пределах изучаемой территории. Предвесенняя водность характеризовалась модулем стока рек в марте. Данные по промерзанию почвы использовались по ГМС Кола, как наиболее продолжительный ряд за рассматриваемый период. Полученные результаты необходимы для комплексного исследования гидрологического режима рек бассейна Баренцева моря.

Ключевые слова: максимальный сток, Кольский полуостров, снежный покров, промерзание, осеннее увлажнение.

Long-term variability of the maximum drain of rivers in the Barents Sea basin

V.A. Biryukova¹, L.S. Banshchikova²

¹*Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia
welga994@mail.ru*

²*State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia
banshchikovals@yandex.ru*

Annotation. In modern conditions, climate change is revealed in the identification of the patterns of current runoff, and it is necessary to study the patterns and trends in a long-term context. The maximum flow is the main characteristic of the water regime of rivers. The paper presents an analysis of the variability of the maximum runoff of the rivers of the Kola Peninsula, as well as the factors affecting the runoff. They are the maximum snow reserves, autumn moisture, pre-spring water content and freezing of the ground. In order to assess the dependence of the maximum water discharge during the spring flood on the main runoff-forming factors in the territory under consideration, 10 basins of small and medium-sized rivers were identified.

The values of maximum snow storage were obtained using spatial interpolation for each water basin. To calculate the autumn moisture, data from 7 meteorological stations located within the studied area were used. The pre-spring water content was characterized by the modulus of river runoff in March. The data on soil freezing were used according to meteorological station Kola as the longest series for the period under research. The obtained results are necessary for a comprehensive study of the hydrological regime of the rivers in the Barents Sea basin.

Keywords: maximum flow, Kola Peninsula, snow cover, soil freezing, autumn moisture.

Введение

Оценка изменчивости максимального стока необходима как для комплексного исследования гидрологического режима рек бассейна Баренцева моря, так для актуализации методик по прогнозу максимальных расходов (и высших уровней воды). В дополнение к анализу максимального стока необходим анализ изменчивости факторов, влияющих на сток. Для рек Кольского полуострова это максимальные снегозапасы, осеннее увлажнение, предвесенняя водность и промерзание почвы. Последние оценки, по имеющимся данным, проводились в 80-х годах при написании методик прогноза. С середины 80-х годов наблюдается тренд на увеличение как средних температур воздуха, так и среднемноголетнего стока рек бассейна Баренцева моря [1]. Поэтому анализ изменений максимального стока и стокоформирующих факторов с учетом современных изменений климата является актуальной задачей.

Материалы и методы

Для анализа была создана база данных за период 1966–2020 гг. о максимальных расходах воды по 10 действующим постам. На Рис.1 представлена карта-схема изучаемого района. Выбор бассейнов основывался на ряде условий: выбранные реки относятся к бассейну Баренцева моря, практически по всем выбранным рекам Мурманским УГМС выдается прогноз прохождения максимальных расходов и уровней.

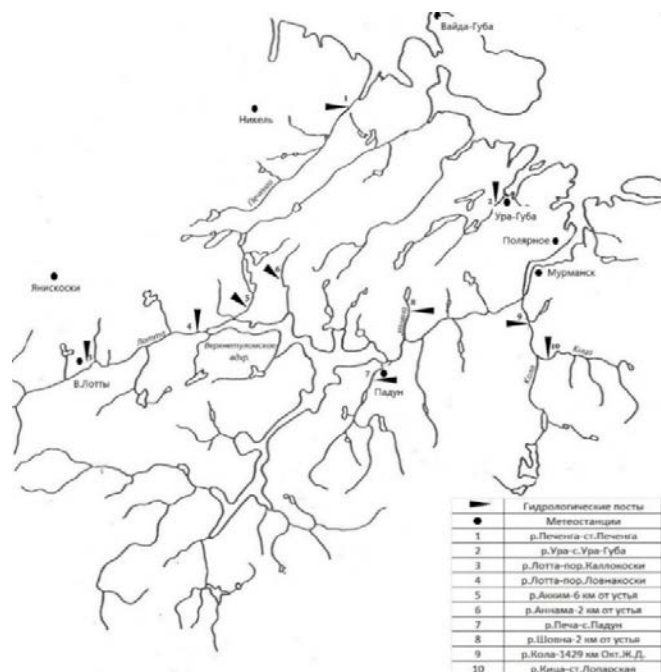


Рис. 1 Карта-схема метеорологических и гидрологических постов рассматриваемой территории.

Кроме того база данных включает в себя данные о максимальных снегозапасах, осенних влагозапасах в почвогрунтах, промерзании почвы и модуле стока рек в марте, как о показателях, оказывающих непосредственное влияние на величину максимального расхода. Данные о максимальных снегозапасах рассчитывались путем планиметрирования или расчета по палетке для каждого водосбора. Дополнительно были проанализированы данные о среднемесечных осадках и температурах воздуха по метеостанциям Вайда-Губа, Никель, Ура-Губа, Полярное, Янискоски, Падун, Мурманск, которые так же включены в базу данных. Осеннее увлажнение рассчитывалось по методике П.Я. Подвиженской [2]. Ввиду недостаточности данных изменение глубины промерзания с течением времени оценивалось исключительно по ГМС Кола.

Результаты и выводы

Максимальные расходы воды на реках бассейна Баренцева моря преимущественно образуются в период весеннего половодья, однако при совокупности неблагоприятных условий (весеннее половодье слабой интенсивности, повышенная водность, обильные осадки в летне-осенний период) возможно появление высших (расходов) уровней, сформированных дождевыми паводками.

Начало половодья на реках бассейна Баренцева моря обычно приходится на начало мая, в годы с ранней весной половодье может начаться в первой декаде апреля. Средняя продолжительность половодья (в зависимости от озерности и высот бассейна) меняется от 55–65 дней, максимальная достигает 120 суток. Разность между сроками начала и пика половодья составляет 19–26 дней, в дружные года 1–9 дней, в затяжные – 45–90 дней.

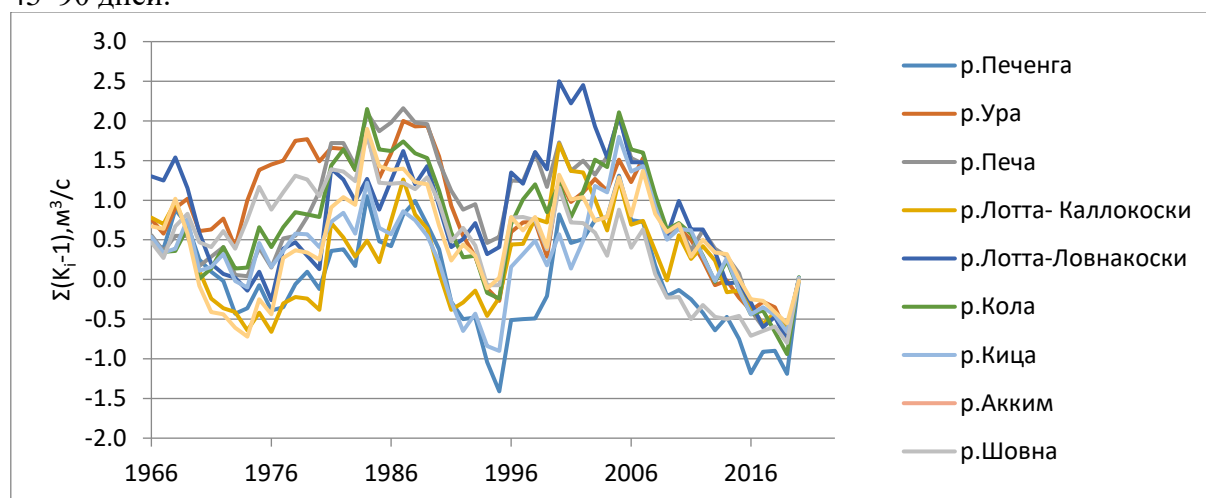


Рис. 2 Разностные интегральные кривые максимальных расходов воды $\Sigma(K_i-1)$ изучаемых рек 1966–2020 гг., м³/с.

Как видно на Рис.2 максимальные расходы воды по рекам характеризуются синхронностью колебаний и наличием четко наблюдаемых циклов.

Как было отмечено ранее, на образование максимальных расходов воды оказывает влияние большое количество факторов, одним из которых являются максимальные снегозапасы. Максимальные снегозапасы формируются на Кольском полуострове преимущественно в конце марта – начале апреля. График изменчивости максимальных снегозапасов за многолетний период приведен на Рис. 3. Анализ рядов показал на большинстве бассейнов рек наличие значимого тренда на уменьшение снегозапасов (за исключением рр. Акким и Аннама), что связано в первую очередь с увеличением температуры воздуха в зимние месяцы. Коэффициенты корреляции между наибольшими расходами и снегозапасами составляют 0,40–0,63.

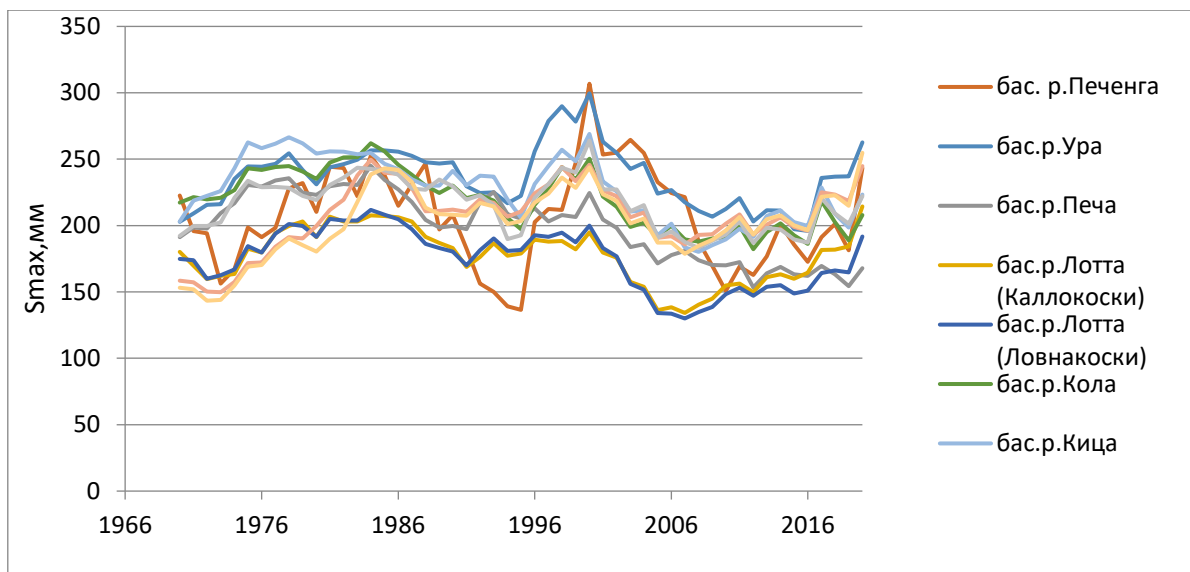


Рис. 3 Графики 5-летнего скользящего осреднения максимальных снегозапасов (S_{max}), мм.

Осеннее увлажнение оказывает важное действие при формировании максимальных расходов воды весеннего половодья, особенно для бассейнов малых и средних рек. Мурманская область относится к зоне избыточного увлажнения [3].

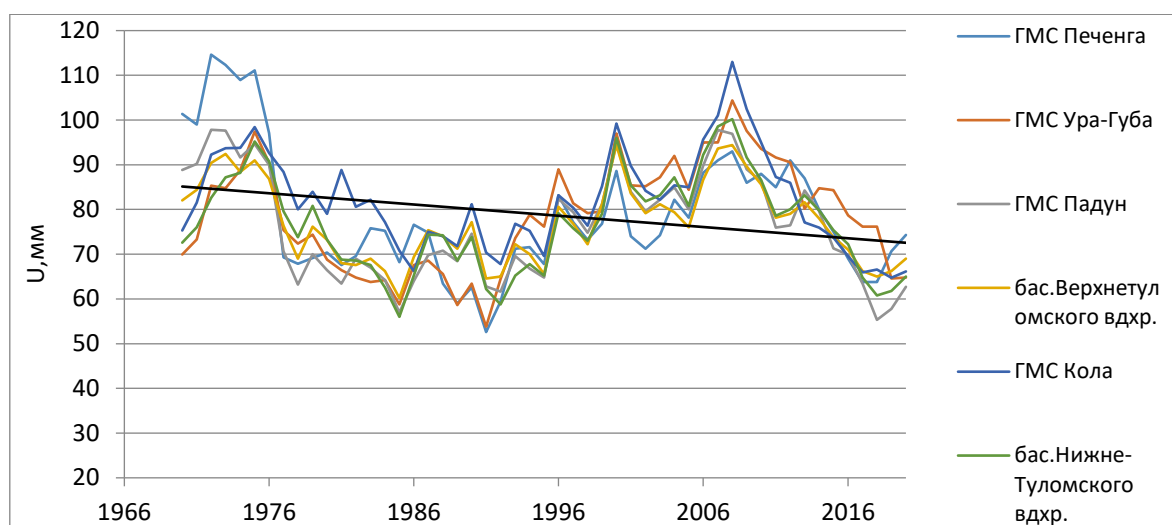


Рис. 4 Графики 5-летнего скользящего осреднения осенних влагозапасов (U) за период 1966–2020 гг. по характерным метеостанциям и среднее по бассейнам, мм.

При средних значениях в 80 мм осеннее увлажнение может меняться от 30 до 140 мм. Более четко влияние увлажненности почвы на весеннем режиме рек прослеживается в годы экстремальных значений, особенно в годы дефицита увлажнения и малой водности в марте. Недостаточное увлажнение увеличивает потери талого стока на смачивание почв, инфильтрацию и заполнение депрессий и водоемов [4]. В случаях повышенного увлажнения и суровой холодной зимы без оттепелей, при большой цементации почвы к весне, период от начала подъема бывает наиболее коротким. Анализ многолетней изменчивости осеннего увлажнения почв показал отрицательный незначимый линейный тренд, представленный на Рис. 4, по большинству объектов (за исключением ГМС Ура), что подтверждается уменьшением количества осадков в летне-осенний период (август-сентябрь).

Промерзание почвы также является одной из наиболее важных характеристик, влияющих на значения максимальных расходов воды.

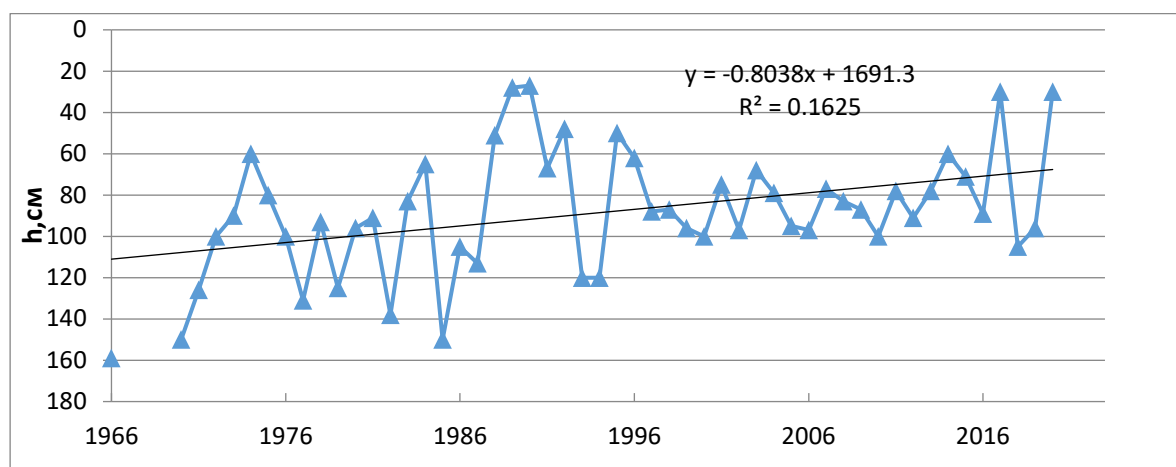


Рис. 5 График изменения глубины промерзания почвы (h) за период 1966–2020 гг. по ГМС Кола, см.

Анализ разностно-интегральной кривой выделил периоды повышения и понижения величины промерзания. На Рис. 5 видно, что начиная с середины 80-х годов глубина промерзания неизменно уменьшается, средняя величина промерзания уменьшилась на 30 см по сравнению с предыдущим периодом.

Предвесенняя водность характеризует наполненность озерно-русловой сети к началу снеготаяния.

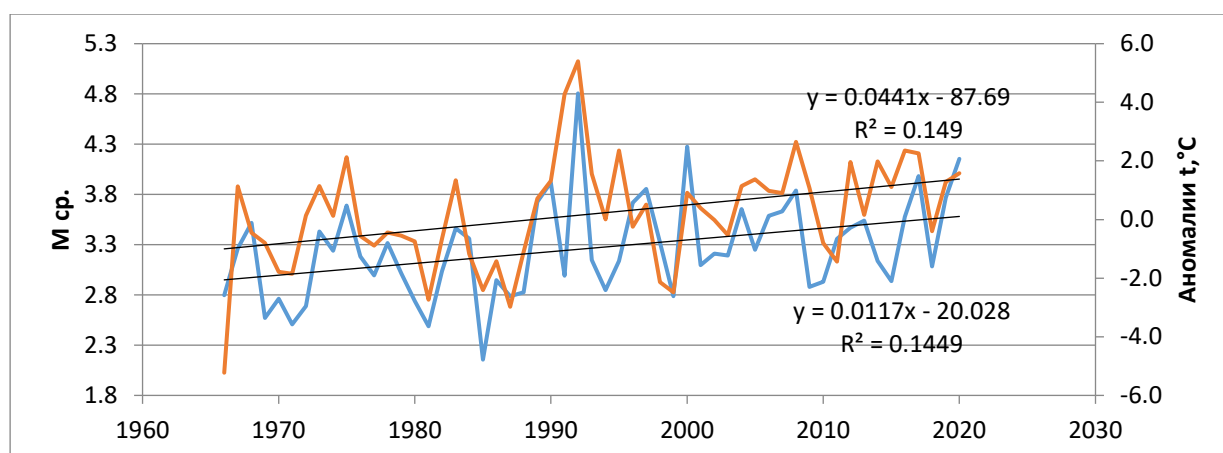


Рис. 6 График многолетней изменчивости аномалий температур воздуха за зимний сезон (Аномалии t) и модулей стока за март (Mcp) в период 1966–2020 гг., °C.

Для рек Кольского полуострова этой характеристикой является отношение модуля стока рек за март к норме. Достаточно высокая водность рек перед началом весеннего половодья свидетельствует о повышении температур воздуха за зимний период (для Кольского полуострова длится с ноября по март). На Рис. 6 можно увидеть, что с середины 80-х годов наблюдается устойчивое повышение температуры воздуха за зимний сезон, что характеризуется значимым положительным трендом. Модули стока рек за март также имеют тенденцию к повышению, коэффициент корреляции между многолетними значениями аномалий температур и модулей стока достигает 0,64.

Таким образом, анализ максимального стока показал, что в целом, за исследуемый период, прослеживается тенденция к снижению водности рек в период

половодья за счет увеличения предвесенних запасов воды. Также отмечаются тренды на понижение максимальных снегозапасов и осеннего увлажнения почвы. В современных климатических условиях глубина промерзания почвы значительно уменьшилась, что обуславливает переход части стока талых вод в грунтовый сток, что будет способствовать понижению максимального стока в период половодья. При этом основной причиной многолетних изменений является повышение температурного режима в зимний период.

Результаты исследования, приведенного в данной работе для рек северо-запада Мурманской области, будут применены авторами для анализа и оценки максимального стока с включением всех рядов наблюдений по действующим постам Кольского полуострова.

Список литературы

1. Бирюкова В. А., Третьяков М. В., Румянцев В. А. Многолетняя динамика рек Кольского полуострова в Баренцево море // Сборник трудов VI Международной конференции "Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития" имени Л. Н. Карлина / MGO-2022–2022 — С. 32-36.
2. Подвишенская П.Я. К вопросу учета потерь стока в период весеннего половодья /Труды ЦИП 39/66, 1955 г.
3. Пупишская М.Г. Методическая записка по составлению долгосрочного прогноза дат начала и пика половодья на реках Кольского полуострова. Мурманск., 1967. 105 с.
4. Пупишская М. Г. Полянская В. И. Методика прогнозов максимальных расходов (уровней) воды на реках Кольского полуострова. Мурманск, 1980. 106 с.

Климатические изменения стока: есть ли методы выявления и учета?

М.В. Болгов

*Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия
bolgovmv@mail.ru*

Аннотация. В докладе обсуждаются проблемы обработки и анализа нестационарных временных рядов гидрологических характеристик. Рекомендуются байесовские методы оценивания и прогнозирования характеристик стока при наличии климатически обусловленных нарушений однородности рядов.

Ключевые слова: климатические изменения, речной сток, нестационарные ряды, регионализация, байесовское оценивание, точка смены состояния, байесовский прогноз.

Climatic changes in runoff: are there methods of identification and accounting?

M.V. Bolgov

*Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia
bolgovmv@mail.ru*

Abstract. The report discusses the problems of processing and analyzing non-stationary time series of hydrological characteristics. Bayesian methods for estimating and predicting the characteristics of runoff in the presence of climatically determined violations of the homogeneity of the series are recommended.

Keywords: Climatic changes, river runoff, non-stationary series, regionalization, Bayesian estimation, point of state change, Bayesian forecast.

Введение

Важнейшей нерешенной задачей современной гидрологии является выявление климатически обусловленных изменений, происходящих в водной оболочке земли, и прогнозирование компонент водного баланса, в первую очередь речного стока, с учетом будущего состояния Земной системы.

Сложность сформулированной задачи заключается в том, что, с одной стороны, временные ряды последовательностей гидрометеорологических характеристик имеют явно недостаточную продолжительность для того, что бы разрабатывать сложные стохастические модели, пригодные для чисто вероятностного прогноза речного стока в нестационарных условиях, а с другой – возможности существующих моделей Земной системы, основанных на воспроизведении геофизических процессов, происходящих в атмосфере и гидросфере, в сочетании с неопределенностями сценариев поступления в атмосферу климатически активных веществ, сегодня ограничены. Получаемые в результате модельных расчетов ансамбли глобальных оценок, позволяют сегодня говорить лишь о параметрах распределений исследуемых величин на период заблаговременности, начиная от 20 и более лет на момент выпуска прогноза. Межмодельный разброс оценок сегодня таков, что его непосредственный учет в инженерных задачах нецелесообразен.

Подходы к решению задачи долгосрочного прогнозирования колебаний стока в нестационарных условиях необходимы для большого числа прикладных задач, что, в свою очередь, задает требования к возможным формам такого рода прогноза. Поскольку календарный прогноз стока на период от года и более, невозможен, то формой представления будущих оценок является их распределение вероятностей. Этот вывод не означает, что изучать и моделировать физические процессы (процессы формирования стока) в новых условиях нет необходимости. Задание сценариев будущего все равно требует понимания генезиса прогнозируемых изменений водной среды, что возможно путем сочетания теоретических, экспериментальных исследований и моделирования.

О стационарности, марковости и нелинейности

Рассмотрим несколько основных вопросов, обсуждение которых требуется при рассмотрении возможности прогнозирования стока. Классическая проблема гидрологии – можно ли рассматривать колебания гидрометеорологических величин в рамках теории стационарных случайных процессов? Не являются ли выделяемые визуально изменения или однородные участки, частями реализации низкочастотного колебания, или мы наблюдаем нарушения стационарного, до некоторой точки во времени, процесса? В обзорной статье [3] обсуждаются более подробно некоторые проблемы стохастического моделирования применительно к речному стоку, здесь же рассмотрим случаи, актуальные для проблемы нестационарности.

В качестве характерного примера, активно обсуждаемого в последние годы, обратимся к ряду годового притока к озеру Байкал. На приведенном графике (Рис. 1). выделяются по крайней мере два «выпадающих» периода. Это глубокое маловодье 80-х годов, и маловодный период, начавшийся в конце 90-х годов и продолжавшийся до 2017 года включительно. Второй маловодный период сменился многоводным после четырех лет экстремально низкой водности. Попытки дать прогноз развития такого временного хода, к сожалению, были безуспешными: традиционные марковские модели давали некоторую вероятность пролонгирования наблюдавшегося «выброса», но уже на втором году прогноза условное и безусловное «средние» практически совпадали (Рис. 2). Можно было бы предложить и более сложные линейные модели, например авторегрессионные более высокого порядка, или билинейные [17], но для надежных оценок требуется наличие во временном ряду хотя бы одного-двух десятков событий такого типа. В данном случае таких событий имеется не более двух. Да и прогноз все равно будет вероятностный, а именно – будут подсчитаны вероятности группировок маловодных лет, которые могут быть больше, чем в случае простой цепи Маркова, но предсказать в каком конкретном году начнется такой маловодный период, невозможно. Ответ на вопрос о том, надо ли переходить от марковских моделей к более сложным, или просто ограничиться корректировкой параметров, отвечающих за инерционность процесса, решается сегодня на уровне приложений. В водохозяйственных расчетах, задав повышенное значение автокорреляции, можно получить увеличенное значение емкости водохранилища, и, тем самым, обеспечить требуемую гарантированную отдачу. Но, например, для задачи прогноза уровня Каспийского моря, этого подхода недостаточно. Колебания уровня моря чувствительны к долговременным периодам пониженной или повышенной водности, и этот факт требует усложнения вероятностной модели притока для получения более надежного доверительного интервала прогнозных значений уровня моря.

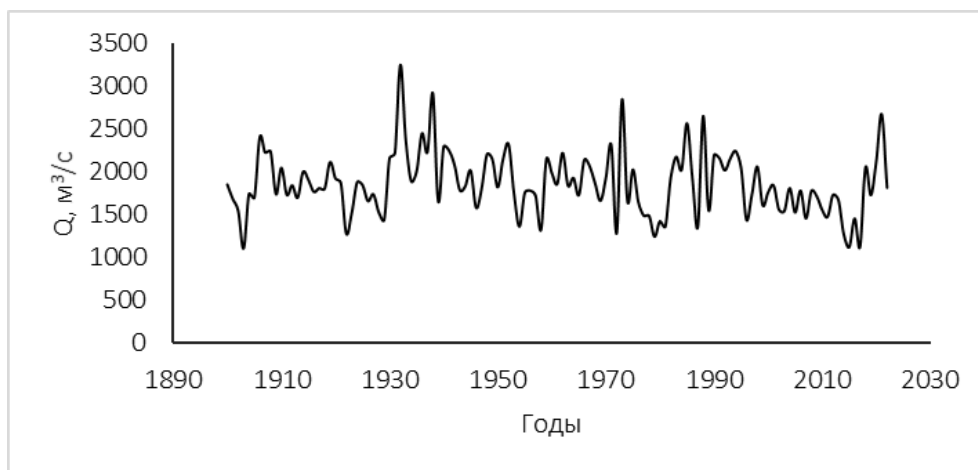


Рис. 1 Годовой полезный приток к оз. Байкал.

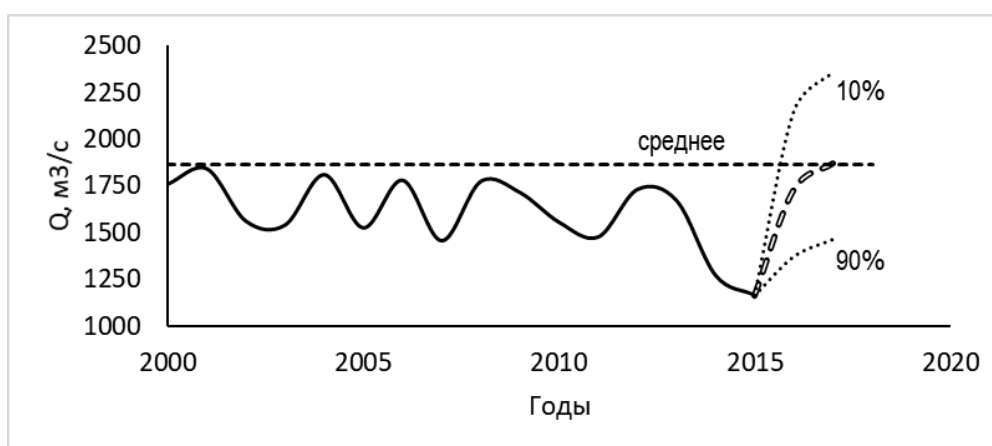


Рис. 2 К возможности вероятностного прогнозирования годового притока.

Из существующих в теории случайных процессов подходов к построению более сложных моделей, можно отметить попытку усложнения марковской модели путем введения в уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова более сложной зависимости коэффициента сноса на основе двухмодального потенциала [7; 9]. Интерес к такого рода постановкам в гидрологии возник в 90-е годы в связи с проблемой прогноза уровня Каспийского моря [13]. Выборочная гистограмма распределения уровня Каспия по данным инструментальных наблюдений за период до 1979 года имеет двухмодальный характер, но в то же время продление ряда уровней до 2016 года приводит к другой форме распределения (Рис. 3). В случае Каспийского моря, выборочная гистограммная оценка плотности распределения по имеющемуся 140 летнему ряду наблюдений, коэффициент автокорреляции которого равен 0.98, совершенно недостоверна [14], поэтому вопрос усложнения вероятностной модели Каспия требует дальнейших исследований.

Более простой подход был предложен в [8] для описания многолетних колебаний уровня воды Торейских озер. В аридных (или полуаридных) зонах во временных рядах притока наблюдается отчетливо выделяемое чередование продолжительных многоводных и маловодных периодов водности, поэтому, в условиях ограниченности данных наблюдений, была принята модель смены периодов водности, в рамках которых колебания стока рассматривались как условно стационарные с соответствующими параметрами, определяемыми по данным наблюдений. Получившийся при такой схеме

модельный ряд наполнений Горейских озер имеет закон распределения уровня, который удовлетворительно согласуется с эмпирической кривой обеспеченности.

В целом по проблеме сложности вероятностных моделей многолетних колебаний гидрологических характеристик можно повторить вывод о целесообразности применения принципа «скупости», сформулированного В. Клемешем [16]. Желательно оставаться в рамках простых моделей, усложняя их только при наличии обоснованных гипотез.

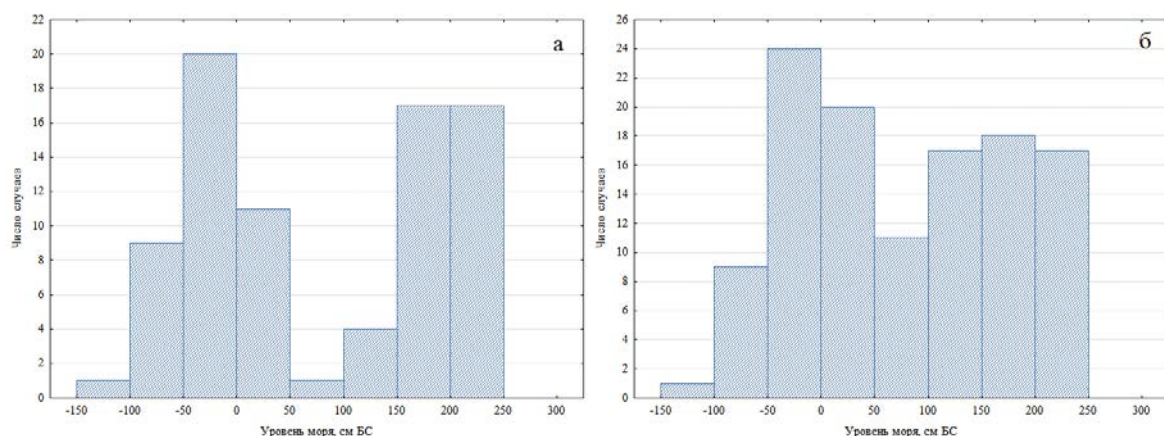


Рис. 3 Гистограмма распределения уровня Каспийского моря для различных периодов: а – 1900-1979, б – 1900-2016 гг.

О механизмах «отклика» гидрологических событий на климатические изменения

Формирование речного стока носит различный характер, или, как говорят в гидрологии, генезис, в зависимости от климатических, ландшафтных, почвенных, гидрогеологических и других условий. В гидрологии распространена гипотеза регионального проявления особенностей процессов стокообразования, что находит свое подтверждение в наличии большого числа устойчивых районов для соответствующих типов процесса, несмотря на существенное влияние азональных факторов. Районирование процесса стока по типам его формирования (например, [2] и многие другие) позволяет обобщать оценки параметров расчетных схем, создавать региональные методики гидрологического расчета. Региональный принцип справедлив не только в стационарном случае, но и при выявлении нарушений однородности. Иначе говоря, объяснение выявленных нарушений во временных рядах за счет климатических изменений может быть принято (обосновано) только в том случае, если такой же характер имеют временные ряды в пределах гидрологически однородных регионов. Или соответствующими методами, например, методом объединения совокупностей, выявлены границы таких регионов. Вопрос о значимости выводов о наличии нарушений будет рассмотрен ниже, здесь же отметим, что фундаментальных гидрологических результатов, поясняющих механизмы нарушения условий формирования стока в условиях климатических изменений, сегодня мало. Можно отметить работы Калужного, Лаврова, Коронкевича с соавторами [10; 11].

Прикладной аспект задачи заключается в том, что для расчетов гидрологических характеристик на обозримое будущее, порядка нескольких десятков лет, необходимо выявить факторы или параметры, влияющие на однородность выборок, достаточно легко определяемые по данным стандартных наблюдений, и прогнозируемые на будущее. В качестве таких факторов для минимального стока зимней межени могут выступать, например, зимние температуры воздуха, влияющие на наличие оттепелей, и,

соответственно, на рост подземного питания рек. Проблема состоит в том, что такие соотношения не носят функционального характера. На Рис. 4 приведена зависимость приращения стока зимней межени (K) от приращения зимних температур для бассейна Верхней Волги (Δt) [5]. Видно, что зависимость существует, хотя и характеризуется невысоким коэффициентом корреляции, поскольку сказывается многообразие путей подземного питания рек. Только в модели «Гидрограф» Ю.Б. Виноградовым рассматривается 15 емкостей для описания подземного питания! Сложность прогноза состоит в том, что эта зависимость должна быть «продолжена» в будущее, для которого, вполне возможно, что и основные климатические факторы, такие как снеготпасы, будут формироваться совсем по-другому. Но поскольку будущее непредсказуемо, то сегодня остается использовать для его прогноза только выявленные на актуальном отрезке времени факторы или гипотетически предполагаемые сценарии.

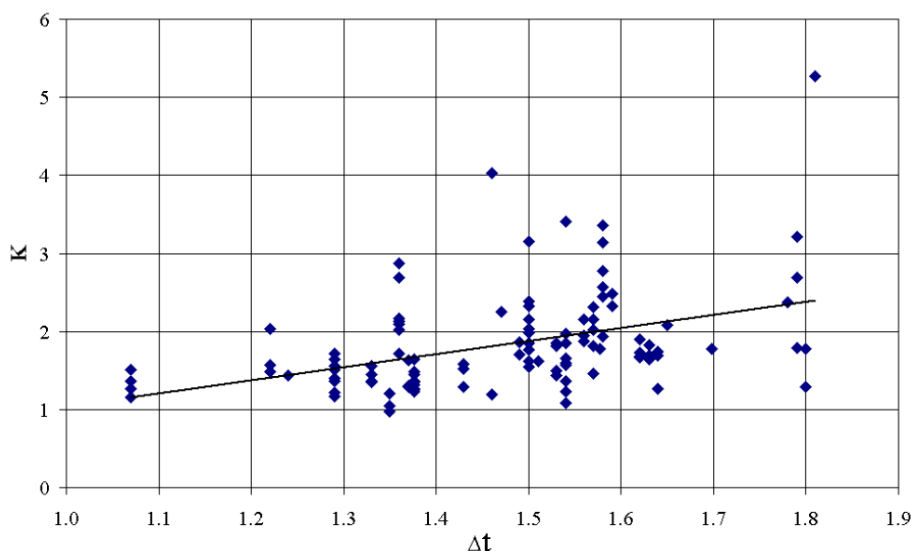


Рис. 4. Зависимость приращения стока зимней межени от приращения зимних температур для бассейна Верхней Волги.

Байесовский подход к оценке точки нарушения однородности

Поиск происходящих изменений во временных рядах требует разработки соответствующих методов оценивания. Вероятностная задача формулируется следующим образом: получаемая в процессе наблюдений выборка рассматривается как набор однородных временных последовательностей, характеризуемый случайной сменой состояний. Моменты смены состояния рассматриваются как параметры вероятностной модели. Такая постановка задачи известна в литературе как задача поиска точки изменения состояния CPD (change point detection).

Рассмотрим предложенный в [18] метод для случая, когда имеется последовательность случайных переменных x_1, x_2, \dots, x_n , которая делится на две части в точке r ($1 \leq r \leq n$). Последовательность $x_i, i = 1, 2, \dots, r$, распределена по закону $F_1(x / \theta_1)$, а $x_i, i = r + 1, \dots, n$, распределено по закону $F_2(x / \theta_2)$, причем $F_1(x / \theta_1) \neq F_2(x / \theta_2)$. Задача заключается в определении точки изменения состояния процесса по заданной последовательности наблюдений x_1, x_2, \dots, x_n , и известных функциях распределения F_1 и F_2 .

Совместное распределение выборки x_1, x_2, \dots, x_n , условное по отношению к параметрам θ_1 и θ_2 , и имеющее точку изменения r ($1 \leq r \leq n$), записывается в виде

$$\rho(x_1, \dots, x_n | r, \theta_1, \theta_2) = \rho_1(x_1, \dots, x_r | \theta_1) \cdot \rho_2(x_{r+1}, \dots, x_n | \theta_2) = \prod_{i=1}^r \rho_1(x_i | \theta_1) \prod_{i=r+1}^n \rho_2(x_i | \theta_2) \quad (1)$$

где $\rho_1(x_i | \theta_1)$, $\rho_2(x_i | \theta_2)$ – плотности распределений двух частей выборки.

Для применения байесовского алгоритма определим априорное распределение r , задав $\rho_0(r)$, $1 \leq r \leq n$, при условии $\rho_0(1) + \rho_0(2) + \dots + \rho_0(n) = 1$

$$\rho_0(r) = 1/n$$

В соответствии с теоремой Байеса, если заданы θ_1 и θ_2 , апостериорная плотность распределения возможной точки изменения для имеющихся данных наблюдений x_1, x_2, \dots, x_n определяется в виде:

$$\rho(\theta | x) = \frac{\rho(x|\theta)\rho(\theta)}{\tilde{\rho}(x)} \quad (2)$$

где $\rho(x|\theta)$ – правдоподобие данных x при заданном значении параметра θ , $\tilde{\rho}(x)$ – апостериорная плотность.

Обращаясь к байесовской оценке точки изменения, формулу (2) запишем в виде

$$\rho_n(r | \theta_1, \theta_2) = \frac{P(x_1, \dots, x_n | r, \theta_1, \theta_2) \cdot \rho_0(r)}{\int_k P(x_1, \dots, x_n | r, \theta_1, \theta_2) \cdot \rho(k) dk} \quad (3)$$

Детальное описание расчетов по (3) можно найти в работе [4]. На Рис. 5 приведены результаты расчета плотности распределения точки перелома для последовательности минимальных расходов r . Малая Кокшага (левый приток Волги). Для назначения точки перелома рекомендуется брать математическое ожидание, рассчитанное с помощью полученного закона распределения.

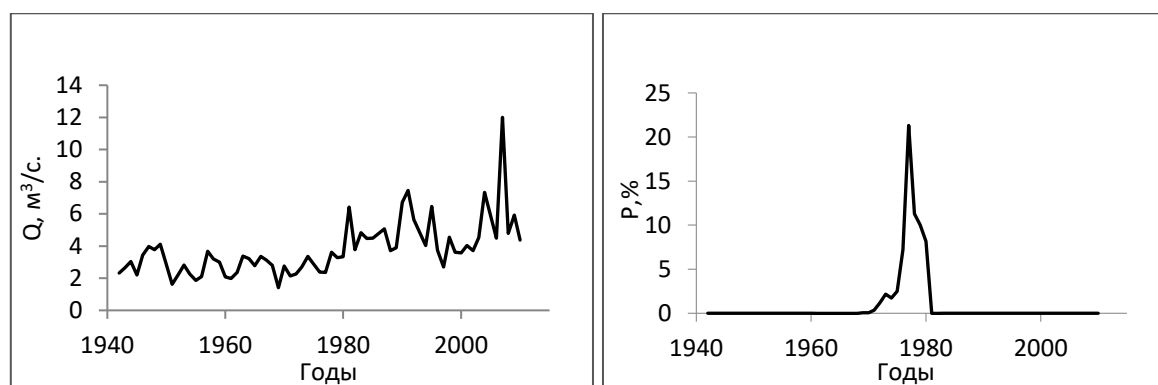


Рис. 5. Временной ход (слева) и байесовская оценка плотности распределения точки смены состояния (справа) для ряда минимального стока реки Малая Кокшага – рзд. Куяр.

Нестационарный гидрологический режим и байесовские методы прогнозирования

Развивая высказанную гипотезу о наличии во временных рядах стока нескольких условно стационарных периодов [5; 6], перейдем к обсуждению возможности получения прогнозных оценок в условиях происходящих и слабо прогнозируемых климатических изменений. Основная идея заключается в том, что допускается, что в прогнозном периоде с некоторой вероятностью может реализоваться любое из трех стационарных состояний рассматриваемой случайной величины, два из которых известны по данным наблюдений, а параметры «климатически обусловленного» стационарного состояния в прогнозном периоде известны с большим доверительным интервалом (погрешностью)

(Рис. 6). Методика решения задачи прогноза основывается на байесовском подходе к учету шансов реализации того или иного сценария в будущем.

Современные нормативные документы в области инженерной гидрологии такую задачу не рассматривают. В случае неоднородных распределений СП [15] рекомендует построение составной кривой обеспеченности с заданием весовых коэффициентов пропорционально продолжительности однородных отрезков. В [6] предложено рассчитывать байесовскую прогнозную плотность распределения с учетом двумерной плотности распределения выборочных оценок параметров распределения для каждого стационарного периода.

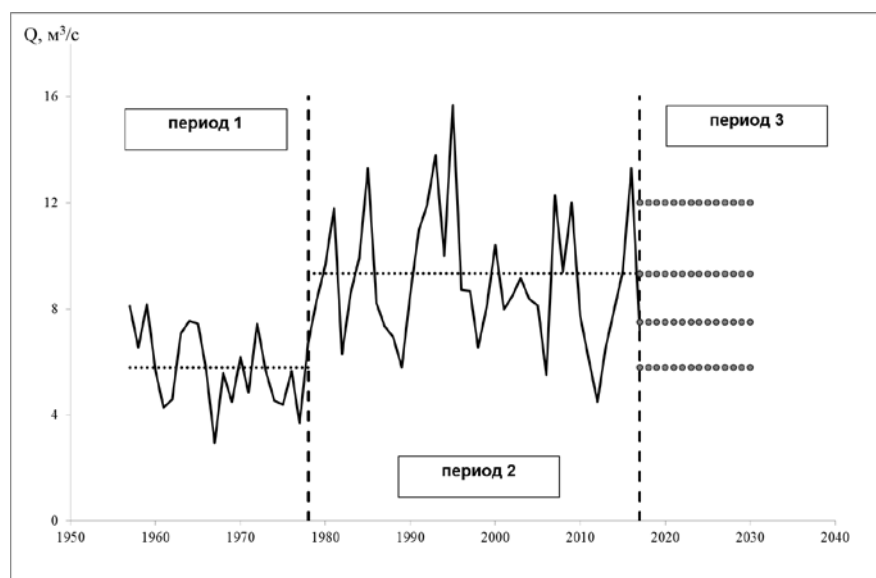


Рис. 6 Схема вероятностного прогноза стока в условиях климатических изменений: ---- даты смены стационарных состояний, – среднее за период, оооо – прогноз средних 3 периода.

Собственно, задание весов и является основной задачей при выполнении расчетов в данном методе. При учете прогнозов будущего состояния водных ресурсов, основанных на многообразии сценариев и модельных реализаций, ситуация становится более сложной. Для получения прогнозной плотности в рамках байесовского подхода необходимо задать весовые коэффициенты для каждого сценария, и здесь возможно несколько подходов. Во-первых, можно дать всем сценарным расчётам одинаковые шансы. Такой метод был применен при прогнозе стока р. Аму-Дарьи в условиях потепления климата и деградации оледенения [1]. В работе [12] такой подход был назван «демократическим», и там же был предложен байесовский способ оценивания весов на основе вычисления правдоподобия имеющихся данных наблюдений, но с параметрами, получаемыми для этих периодов по результатам моделирования Земной системы. Веса различным прогнозам задавались пропорционально оценкам правдоподобия.

Выводы

Обобщая имеющиеся результаты в области анализа нестационарных процессов многолетних колебаний речного стока, можно сформулировать следующие выводы.

1. Существующие инженерные методы гидрологических расчетов основаны на обработке и анализе имеющихся инструментальных данных наблюдений, и не учитывают возможных сценариев развития климатической системы.

2. Оценки будущего гидрологического режима, получаемые из моделей Земной системы, характеризуются большим значением межмодельного разброса, который не позволяет использовать эти результаты непосредственно в приложениях.

3. Поскольку расчеты будущей водности или осадков с помощью моделей циркуляции атмосферы и океана не воспроизводят календарную последовательность климатических и гидрологических характеристик, а могут давать только статистические параметры распределений, для сочетания наблюдаемых и модельных значений (их совместной обработки) необходим байесовский подход, учитывающий степень правдоподобия модельных данных, а так же доверие к фактическим наблюдаемым значениям.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0001 Государственного задания ИВП РАН.

Acknowledgments

The results were obtained within the framework of the State Task of the WPI RAS № FMWZ-2022-0001.

Список литературы

1. Агальцева Н.А., Болгов М.В., Спекторман Т.Ю., Трубецкова М.Д., Чуб В.Е. Оценка гидрологических характеристик в бассейне Амударьи в условиях изменения климата // Метеорология и гидрология. 2011. № 10. С. 58-69.
2. Бефани А.Н., Бефани Н.Ф., Гопченко Е.Д. Региональные модели формирования паводочного стока на территории СССР. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1981. 61 с.
3. Болгов М.В. Стохастическая гидрология: развитие основных идей в России // Труды СПбГУ. 2021. Том 66. № 1. С. 19-40.
4. Болгов М.В. Байесовская оценка точки изменения в последовательностях коррелированных случайных величин гидрометеорологических характеристик // Метеорология и гидрология. 2021. № 10. с.27-35.
5. Болгов М.В., Коробкина Е.А., Филиппова И.А. Байесовский прогноз минимального стока в нестационарных условиях с учетом возможных изменений климата // Метеорология и гидрология. 2016. № 7. С. 72-81.
6. Болгов М.В., Коробкина Е.А., Филиппова И.А. Учет климатических изменений стока на основе байесовского подхода // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения. Сборник научных трудов. Москва: Студия Ф1, 2019. С. 74-79.
7. Гардинер К.В. Стохастические методы в естественных науках. Москва: Мир, 1986. 528 с.
8. Кашницкая М.А., Болгов М.В. Бессточные Торейские озера: можно ли дать прогноз изменений гидрологического режима? // Метеорология и гидрология. 2021. № 5. С. 95-98.
9. Кляцкин В.И. Стохастические уравнения. Теория и ее приложения к акустике, гидродинамике и радиофизике. Том 1. Основные положения, точные результаты, и асимптотические приближения. Москва: Физматлит, 2008. 317 с.
10. Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Георгиади А.Г., Долгов С.В., Зайцева И.С., Кашутина Е.А. Оценка антропогенных воздействий на водные ресурсы России // Вестник Российской академии наук. 2019. № 6. С. 603-614.
11. Калюжный И.Л., Лавров С.А. Влияние климатических изменений на глубину промерзания почв в бассейне р. Волга // Лёд и снег. 2016. Том 56. № 2. С. 207-220.

12. Липавский А. С., Елисеев А. В., Мохов И. И. Байесовы оценки изменения стока Амура и Селенги в XXI веке по результатам ансамблевых модельных расчетов CMIP6 // Метеорология и Гидрология. 2022. №5. С. 64-82.
13. Найденов В.И. Нелинейная динамика поверхностных вод суши. М.: Наука, 2004. 318 с.
14. Раткович Д.Я., Болгов М.В. Исследование вероятностных закономерностей многолетних колебаний уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. 1994. Том 21. № 4. С. 389-404.
15. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных гидрологических характеристик СП 33-101-2003. Государственный комитет Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу (Госстрой России). Москва, 2004.
16. Klemesh V. Dilettantism in hydrology: Transition or destiny? // Water Resources Research. 1986. Volume22. Issue 9S. P. 177S-188S.
17. Priestley M.B. Non-linear and non-stationary time series analysis. London. Academic press, 1988. 237 p.
18. Smith A.F.M. A Bayesian approach to inference about a change-point in a sequence of random variables // Biometrika. 1975. Vol. 62. No. 2. P.407-416.

Каталог ледниковых озер Киргизии, Таджикистана и Узбекистана

С.А. Бондарев*, Д.А. Петраков

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
sergeybondarev97@gmail.com*

Аннотация. Целью настоящей работы является создание актуальной геоинформационной базы данных ледниковых озер Таджикистана, Киргизии и Узбекистана. С помощью ручного (визуального) и автоматизированного дешифрования выделено 4094 ледниковых озера в пределах высот от 1100 до 5150 м. Среди данных озер – 306 каскадных озер. На примере 197 ледниковых озер Таджикистана выполнена оценка суммарной площади (8,5 млн м²) и суммарного объема (130-140 млн м³) ледниковых озер. Дополнительно исследованы трансграничные озера, прорыв которых образует селевые потоки, направленные в сторону других государств. Результаты работы являются важной частью мониторинга ледниковых озер в мире.

Ключевые слова: ледниковые озера, прорывы ледниковых озер, селевые потоки.

Catalog of glacial lakes Kyrgyzstan, Tajikistan and Uzbekistan

S.A. Bondarev*, D.A. Petrakov

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
sergeybondarev97@gmail.com*

Abstract. The purpose of this work is to create an up-to-date geoinformation database of glacial lakes in Tajikistan, Kyrgyzstan and Uzbekistan. With the help of manual (visual) and automated identifying, 4094 glacial lakes were identified within the altitude range from 1100 to 5150 m. Among these lakes there are 306 cascade lakes. Based on the example of 197 glacial lakes in Tajikistan, an assessment of the total area (8.5 million m²) and total volume (130-140 million m³) of glacial lakes was made. Additionally, transboundary lakes were studied, the breakthrough of which forms debris flows directed towards other states. The results of the work are an important part of the monitoring of glacial lakes in the world.

Keywords: glacial lakes, glacial lake outburst flood (GLOF), debris floods.

Введение

Отступление ледников наблюдается во многих горных районах мира, в том числе в высокогорных частях Центральной Азии [5]. Это приводит к нарушению устойчивости ледниковых озер. При их прорыве формируются паводки и селевые потоки. Важно осуществлять периодическую инвентаризацию горных озер, но из-за труднодоступности горных регионов проведение полевых исследований не всегда возможно. Дистанционный мониторинг на основе данных космической съемки может помочь в решении подобных проблем. В данной работе проводится пример создания такого каталога ледниковых озер Киргизии, Таджикистана и Узбекистана на основе картографических данных, научной литературы и фондовых материалов. Для Центральной Азии уже проводилась каталогизация ледниковых озер, охватывающая либо отдельные горные хребты и речные бассейны [7], либо весь регион, но данные уже требуют актуализации и дополнения [3; 8].

Материалы и методы исследования

В целом, методика работы заключалась в дешифрирование ледниковых озер в автоматическом и ручном (визуальном) режимах по актуальным космическим снимкам (в естественных и псевдоцветах), анализе цифровых моделей рельефа (ЦМР) и создании итоговой геоинформационной базы данных ледниковых озер. Работа проводилась в геоинформационных программах ArcGIS и QGIS.

Дешифрирование произведено на основе космических снимков Sentinel-2 за весенний и летний периоды 2020 г. Набор космоснимков с пространственным разрешением 10 м представлен как сплошной мозаикой (в натуральных и псевдоцветах), так и отдельными снимками (в панхроматическом виде). Для удобства работы использовались границы стран с выделенными речными бассейнами в векторном формате.

При инвентаризации ледниковых озер также использовались общедоступные космические снимки Google Maps, Microsoft Bing и Яндекс Карт, подгружаемые в QGIS с помощью плагина Quick Map Services.

В работе использовалась ЦМР SRTM с пространственным разрешением 30 м. После анализа ЦМР были получены данные об абсолютных высотах, на которых расположены ледниковые озера.

Инвентаризация ледниковых озер проводилась преимущественно в ручном (визуальном) режиме на основе космических снимков в псевдоцветах. В некоторых случаях для уточнения береговой линии озер использовался спектральный индекс NDWI (Normalized Difference Water Index). База данных создавалась в системе координат WGS 84.

В первую очередь дешифрировались следующие типы ледниковых озер:

- 1) *Каскадные озера*. Это группы озер, находящиеся в одной горной долине или отдельные озера в двух разных горных долинах. В случае прорыва вышележащего озера или при прорыве озер в двух соседних горных долинах потенциальный селевой поток будет суммарно значительно больше. Такое возможно, например, в случае выпадения значительного объема атмосферных жидких осадков и ослабления устойчивости озерных плотин. Таким образом, объем итогового селевого потока будет гораздо больше;
- 2) *Трансграничные озера*. Данные озера находятся на территории одной страны, но при прорыве озера направление селевого потока будет в сторону другого соседнего государства.

В рамках создания геоинформационной базы данных ледниковых озер Киргизии, Таджикистана и Узбекистана проводились следующие оценки:

- 1) Количество озер с их географическими координатами;
- 2) Абсолютные высоты горных озер, их расположение по высотным интервалам;
- 3) Суммарные и средние величины площади и объема ледниковых озер (с учетом погрешностей) для отдельной выборки озер.

При ручном дешифрировании береговой линии озер возникает погрешность оценки площади водоема за счет качества изображения космоснимка. Оценка данной погрешности рассчитывалась как произведение периметра объекта (озера) на размер половины пикселя раstra снимка на местности [6].

Для дешифрирования ледниковых озер исследуемого региона был выбран порог площади 2000-4000 м². Озера с меньшей площадью водного зеркала учитывались в случае, если они расположены в каскаде других озер и/или если озеро является трансграничным.

Объем ледниковых озер оценивался по эмпирической формуле, согласно которой величина объема горного озера определяется на основе значения площади озера и заданных региональных условий [2; 4].

При инвентаризации ледниковых озер дополнительно анализировался предыдущий каталог горных озер региона «*High Mountain Asia Near-Global Multi-Decadal Glacial Lake Inventory*», созданный в рамках проектов NSDIC (National Snow and Ice Data Center) [8]. Рассматривалась последняя актуальная база данных за 2015 г. Данный каталог ледниковых озер был составлен по космическим снимкам Landsat 4, 5, 7 и 8.

Результаты и выводы

Всего в рамках составления каталога суммарно было выделено 4094 ледниковых озера на территории Таджикистана, Узбекистана и Киргизии в интервале высот от 1100 до 5150 м. Количество озер различно по странам: в Киргизии 2348 озер, в Таджикистане 1703 озера, в Узбекистане 43 озера. Также дополнительно были выделены трансграничные озера, находящиеся в пограничных странах – Афганистан (108 озер) и Казахстан (13 озер) (Рис. 1).

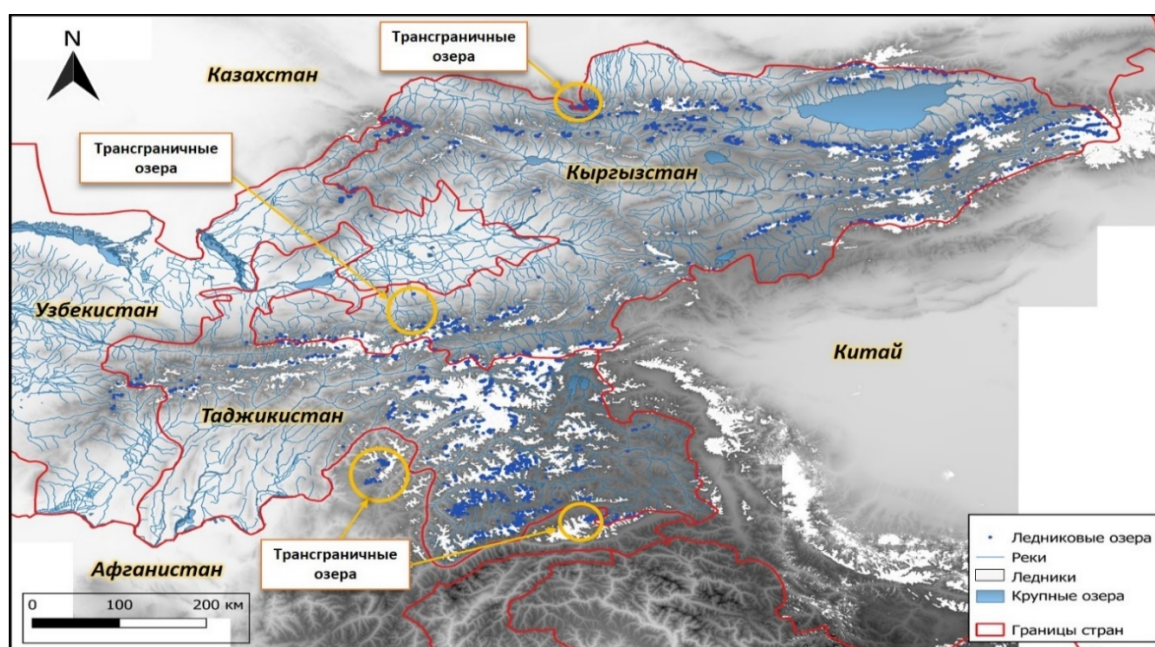


Рис. Каталог ледниковых озер исследуемого региона (подложка ЦМР SRTM 30 м)

В рамках создания геоинформационной базы ледниковых озер Киргизии, Таджикистана и Узбекистана выделено 306 каскадных озер и 129 трансграничных озер. В случае трансграничных озер при потенциальном прорыве селевые потоки могут быть направлены из Казахстана в Киргизию, из Афганистана в Таджикистан, из Киргизии в Узбекистан (бассейн р. Шахимардан) [1].

На примере выборки ледниковых озер Таджикистана (197 озер) была выполнена оценка площади и объема ледниковых озер.

Суммарная площадь составила 8,5 млн м² со средней площадью 43 тыс. м². Максимальная площадь одного ледникового озера составила 780 тыс. м², минимальная 480 м². Погрешности при дешифрировании береговой линии горных озер в среднем составляет около 5% от полученной площади.

Величина объема оценивалась по обеим методикам [2; 4]. По методике [4] были получены следующие величины объема воды: суммарный (140 млн м³), средний (710 тыс. м³), максимальный (24,2 млн м³), минимальный (660 м³). Аналогичные расчеты были выполнены по методике [2], благодаря чему получены значения объемов – суммарного (130 млн м³), среднего (660 тыс. м³), максимального (28 млн м³) и минимального (175 м³).

Также проведено сравнение с предыдущим каталогом ледниковых озер региона NSDIC «*High Mountain Asia Near-Global Multi-Decadal Glacial Lake Inventory*» за 2015 г. В основном каталог ледниковых озер содержит информацию о Таджикистане, где было выделено всего 122 ледниковых озер. В актуальной версии каталога ледниковых озер было выделено 1703 озера. Такая большая разница связано с тем, что в каталоге NSDIC дешифрирование было выборочным, в основном дешифрировались наиболее крупные озера Таджикистана. Возможно, авторы использовали космические снимки более низкого пространственного разрешения.

Настоящий каталог ледниковых озер Киргизии, Таджикистана и Узбекистана содержит актуальную информацию о количестве и отдельных оценочных характеристиках ледниковых озер. Пример данной инвентаризации и создание геоинформационной горных озер является важным проектом в рамках общего мониторинга криосферы и опасных гляциальных процессов.

Благодарности

Настоящая работа выполнена авторами в рамках проекта ЮНЕП «Развитие потенциала и передача технологий для улучшения получения и использования данных и информации в поддержку мониторинга окружающей среды в Центральной Азии» (Номер проекта 40-11).

Acknowledgments

The actual work was carried out by the authors with the support of the UNEP project «Capacity development and technology transfer to improve the generation and use of data and information in support of monitoring the environment in Central Asia» (Project number 40-11).

Список литературы

1. Висхаджиева К.С., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Петраков Д.А., Докукин М.Д., Тутубалина О.В., Ерохин С.А., Глазырин Г.Е., Петров М.А., Штоффел М. Сели прорывного генезиса в бассейне реки Шахимардан (Кыргызстан, Узбекистан): события прошлого и современное состояние // Снежные лавины, сели и оценка риска. – 2020. – С. 3-17.
2. Кидяева В.М. Оценка потенциальной опасности при прорывах горных озёр. Диссертация на соискание ученой степени к.г.н. МГУ имени М.В. Ломоносова. Москва, 2014
3. Chen, F., Zhang, M., Guo, H., Allen, S., Kargel, J. S., Haritashya, U. K., Watson, C. S. Annual 30 m dataset for glacial lakes in High Mountain Asia from 2008 to 2017, Earth Syst. Sci. Data, 13, 741–766, 2021(DOI: 10.5194/essd-13-741-2021)
4. Huggel C., Haeblerli W., Käab A., Bieri D., Richardson S. An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(6), pp. 1068-1083 (DOI: 10.1139/t04-053)
5. Mool P.K., Wangda D., Bajracharya S.R., Joshi, S.P., Kunzang K., Gurung D.R. Inventory of Glaciers, Glacial Lakes and Glacial Lake Outburst Floods: Monitoring and Early Warning Systems in the Hindu Kush-Himalayan Region – Bhutan, UNEP, 2001 (DOI: 10.53055/ICIMOD.373)

6. O'Gorman, L. Subpixel precision of straight-edged shapes for registration and measurement. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, 18 (7), pp. 746 – 751 (DOI: 10.1109/34.506796)

7. Petrov M.A., Sabitov T.Y., Tomashevskaya I.G., Glazirin G.E., Chernomorets S.S., Savernyuk E.A., Tutubalina O.V., Petrakov D.A., Sokolov L.S., Dokukin M.D., Mountrakis G., Ruiz-Villanueva V., Stoffel M. Glacial lake inventory and lake outburst potential in Uzbekistan. *Science of the Total Environment*, 592 (2017), pp. 228-242 (DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.068)

8. https://nsidc.org/data/HMA_GLI/versions/1 - сайт проекта инвентаризации ледниковых озер Центральной Азии «High Mountain Asia Near-Global Multi-Decadal Glacial Lake Inventory». Дата обращения 10 июня 2023 г.

Обзор современных тенденций развития сетей гидрологических наблюдений

С.В. Бузмаков*, А.В. Юхно, А.А. Осташов, А.С. Лубенцов

*Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург
bsv.ru@list.ru*

Аннотация. Увеличение числа опасных гидрометеорологических явлений, связанное с климатическими изменениями, обращает все большее внимание на развитие сетей гидрометеорологических наблюдений. Новые вызовы диктуют переосмысление подходов к организации и функционированию сетей. Это выражается не только в модернизации пунктов наблюдений, но и внедрению новых методов и средств измерений, корректировке программ наблюдений и оперативности передачи данных. В свою очередь техническое переоснащение влечёт за собой структурные изменения организационного характера. Данный аналитический обзор призван выявить основные тенденции в развитии сетей гидрологических наблюдений, описать их и оценить перспективу внедрения в рамках сети Росгидромета.

Ключевые слова: сеть гидрологических наблюдений, модернизация, косвенные методы, АГК, обзор новейших технологий.

Review of current trends in hydrological observation networks development

S.V. Buzmakov*, A.V. Iukhno, A.A. Ostashov, A.S. Lubentsov

*State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia
bsv.ru@list.ru*

Abstract. The increase in the number of hazardous floods and draughts associated with climate change is drawing more and more attention to the development of networks of hydrological observations. New challenges dictate a rethinking of approaches to the organization and functioning of networks. This is expressed not only in the modernization of gauge stations, but also in the introduction of new methods and measuring instruments, adjustment of observation programs and efficiency of data transmission. In turn, technical re-equipment entails structural changes of an organizational nature. This analytical review is intended to identify the main trends in the development of hydrological observation networks, describe them and assess the prospects for implementation within the framework of the Roshydromet network.

Keywords: gauging network, modernization, indirect methods, automatic hydrological complex, state-of-the art.

Введение

Модернизация и развитие сетей гидрологических наблюдений связаны прежде всего с увеличением климатических рисков и частоте возникновения опасных гидрологических явлений (ОГЯ). Их число неуклонно растет как во всем мире, так и в Европе в частности, что подтверждается статистическими данными Центра исследования эпидемиологии бедствий (CRED) на основании данных международной

базы данных о последствиях стихийных бедствий природного и техногенного характера EM-DAT [1-3] в виде диаграммы на Рис. 1.

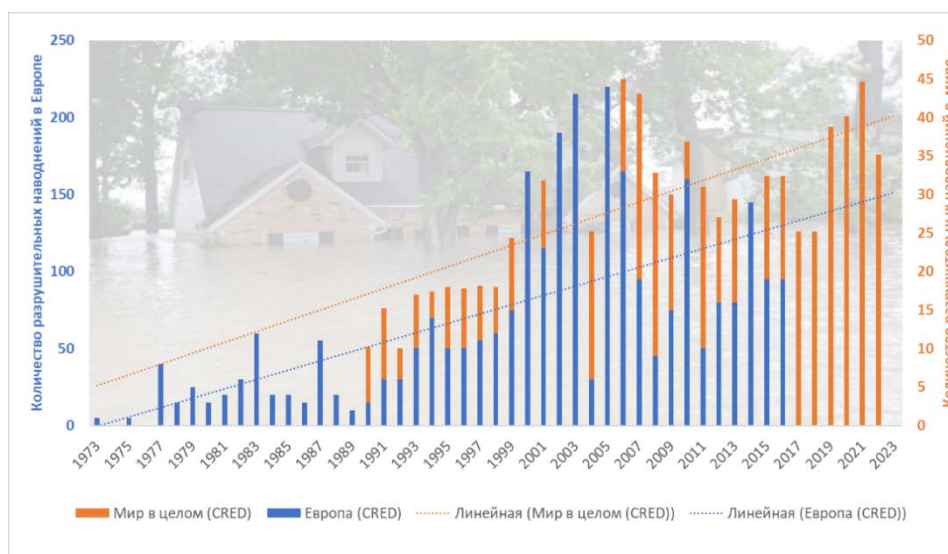


Рис. 1 Многолетние статистические данные о числе зафиксированных CRED разрушительных наводнений в Европе и всем мире в совокупности

Согласно данным реестра экологических угроз Института экономики и мира (IER) [4] наводнения являются самими распространенными из стихийных бедствий природного характера с долей в 40.1% (1990-2019 гг.), эти данные подтверждают специалисты CRED – 43.4% (1997-2017 гг.) [2]. По смертоносности наводнения занимают 4 место после землетрясений, тайфунов и воздействия экстремальных температур [1].

Приведенные выше данные стимулируют государства активнее инвестировать в научные исследования гидрометеорологических явлений и сети наблюдения за гидрометеорологическими параметрами окружающей среды. Ярким примером в этой тенденции может являться программа «Система наблюдения за водными объектами нового поколения» (NGWOS 2022-26), внедряемая национальной гидрометеорологической службой США (USGS). [5]. Именно сравнение опыта USGS и сети Росгидромета будет положено в основу данного обзора.

Модернизация государственной наблюдательной сети (ГНС) РФ происходит с 2006 года по бассейновому принципу. На данный момент завершено первые две волны модернизации, охватившие бассейны Оки, Уссури, Кубани и Волги. Модернизация заключалась прежде всего в переоборудовании гидрологических постов (ГП), их частичной автоматизации (АГП) и переводе в автономный режим работы (ААГП). В центре внимания были вопросы получения, сбора, обработки и передачи гидрологических данных [6].

Основные тенденции

В рамках подготовки аналитического обзора было выделено несколько основных тенденций в развитии гидрологических сетей:

1. Стремление к получению непрерывных оценок стока в режиме реального времени удаленно.

Развитие технологий привело к возможности непрерывной оценки не только уровня воды, но и расхода воды. Это стало возможно на ГП, где для его учёта стока используются радары поверхностных скоростей течения, методы LSPIV (рисунок 2), стационарные доплеровские профилографы течений – горизонтальные (H-ADCP) и вертикальные (V-ADCP), системы стационарных ультразвуковых скоростеметров, АГК с

использованием метода смещения. Все более активно для наблюдений за уровнем режимом и морфометрическими характеристиками русла и водосборов, применяются средства дистанционного зондирования.

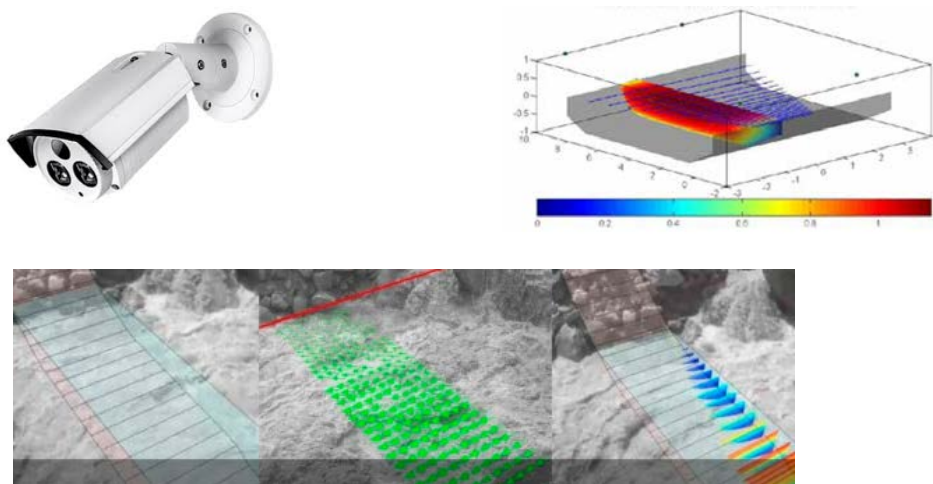


Рис. 2 Пример реализации АГП на основе метода LSPIV с использованием системы Seba Discharge Keeper [7].

2. Применение косвенных методов и методов частичной диагностики.

Все чаще для оценки стока используются косвенные показатели в сочетании с данными о морфометрии или (и) уровне воды, такие как: средняя скорость в выбранном сегменте потока, поверхностная скорость потока, концентрация индикатора, интенсивность шума потока, уклон и др.

3. Особое внимание уделяется урбанизированным водосборам.

Отмечена тенденция увеличения гидрологических постов в черте городов. С одной стороны, гидрологический режим большинства городских водотоков регулируется гидротехническими сооружениями. С другой стороны, общее повышение экстремальности метеорологических явлений (главное из которых - повышение интенсивности ливней) диктует необходимость увеличения пространственно-временной структуры сети наблюдений на развитых, населенных территориях. При этом, что не характерно для гидрологической сети в РФ, в состав пунктов наблюдений входят пункты, расположенные в канализированных руслах, коллекторах и других городских водопропускных сооружениях [8]. Активно для размещения СИ поверхностных скоростей течения используются мостовые переходы, стенки канализированных русел – для установки стационарных доплеровских и ультразвуковых скоростеметров. Часто встречающаяся практика – локальные гидрологические сети на малых реках больших городов.

4. Использование мобильных гидрологических бригад.

За мобильными гидрологическими бригадами закрепляется определенная подконтрольная территория, на которой полевая бригада осуществляет мероприятия в рамках гидрологического мониторинга. При этом кадровый состав таких бригад обязательно включает как высококвалифицированных гидрологов-измерителей, так и технический персонал, отвечающей за надежное функционирование, эксплуатацию гидрологических приборов, наладку связи и средств передачи гидрологических данных.

Такое явление, как наблюдатель на одном ГП, в современной практике передовых гидрологических сетей практически не встречается. Рабочее время современного гидролога преимущественно посвящено работе с оборудованием, а не производством самих измерений. Опыт первых волн модернизации сети ГП Росгидромета вскрыл

важную проблему дефицита технических кадров на местах. Сети нового поколения требуют большого числа высококвалифицированных трудовых кадров и технического персонала.

5. Развитое межведомственное взаимодействие.

В получении гидрологических данных заинтересованы представители многих отраслей первичного сектора экономики (сельское, лесное, рыбное хозяйство; добывающая промышленность, строительство), а также государственных структур (МЧС, природоохранных ведомств и т.д.). Во многих странах развита практика внедрения в единую государственную сеть ведомственных ПН и существенное межведомственное финансирование. Яркой иллюстрацией этого процесса может служить структура финансирования гидрологической сети США, где всего 7% пунктов относятся к государственной сети, 56% межведомственны, а 26% относятся к ведению различных Федеральных агентств [5]. USGS осуществляет методическое руководства по организации наблюдений на всех ведомственных постах, включенных в единую государственную сеть. Подходы к оснащению ведомственных пунктов наблюдений, их персоналу и составу наблюдений различаются и зависят от поставленных задач. На этом фоне межведомственное взаимодействие в РФ развито слабо.

Активное взаимодействие с сетью гидрологических наблюдений и ее ресурсами ведется на уровне поддержки и управления «сине-зеленой» водной инфраструктуры по защите от затоплений и подтоплений и управлению водными ресурсами городов [9]. Первые объекты такой инфраструктуры появляются и в крупных городах РФ.

6. Развитие «виртуальных» гидрологических постов.

При оптимизации штатного состава, новейшей практикой является открытие «виртуальных» постов наблюдений (Рис. 3). Самая простая их реализация – это рейка с направленной на неё фотокамерой, которая делает фотографии (или снимает видео) и отправляет их в центр сбора данных. По фотографии в автоматизированном режиме определяется уровень воды, по видео определяется скорость течения. В рамках программы «Системы наблюдения за водными объектами нового поколения» (NGWOS) пилотные проекты по открытию виртуальных ПН намечены на Аляске [5].

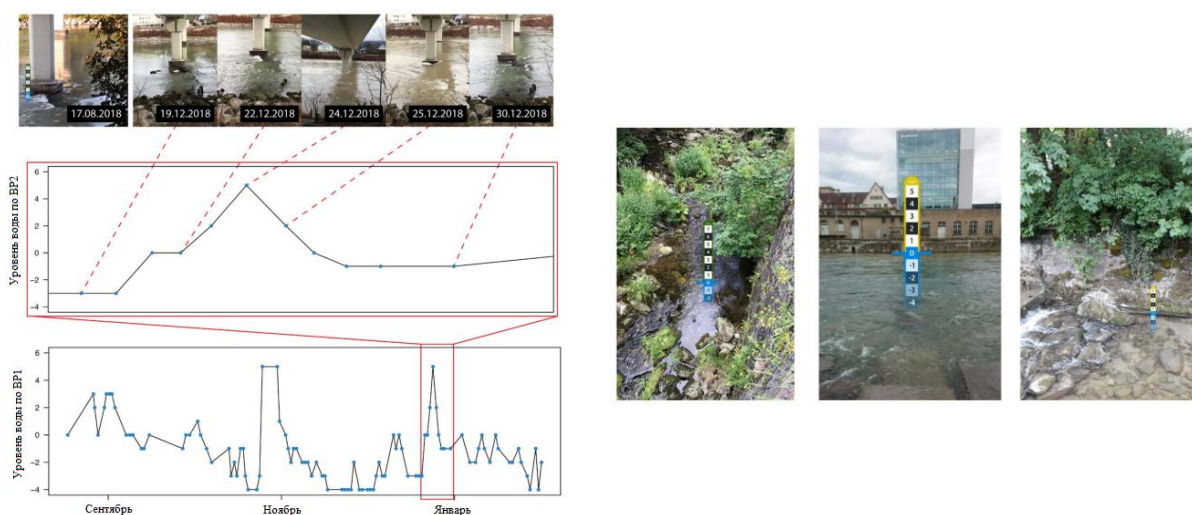


Рис. 3 Примеры виртуальных ГП, установленных в рамках NGOWS [10].

7. Развитие гидрологических пунктов быстрого реагирования.

Rapid Deployment Gages (RDG), или временные гидрологические пункты быстрого реагирования – явление, которое распространяется в странах Западной Европы и США. Такие временные сети развертываются во время прохождения ОГЯ, в местах, где на существующих постах были повреждены или уничтожены СИ, или же для

уплотнения пространственно-временной структуры гидрологических данных во время прохождения экстремальных событий. Как правило, оснащаются такие станции радарными уровне- и скоростемерами на быстроустанавливаемых платформах, разработанных для фиксации на мостовых переходах, стенках каналов (Рис. 4). Также стандартный комплекс включает в себя метеорологические датчики, автономную систему питания на основе использования солнечных панелей и систему связи и передачи данных. План развертывания таких систем есть в каждом из регионов, где возможно развитие быстроразвивающихся паводков, или же разрушительных половодий.



Рис. 4 Примеры ГП быстрого развертывания [5].

8. Большое внимание уделяется качеству воды.

Еще одним принципиальным моментом является применение многопараметрических автономных зондов качества воды. На данный момент существует целый спектр СИ, предлагающих пользователю техническую возможность вести измерения и передачу данных в режиме реального времени сразу по 2-6 датчикам одновременно. Как правило, такие СИ включают в себя датчик уровня воды, УЭП, рН, мутности, температуры воды, БПК5 и других гидрохимических и физических параметров.

9. Картографирование данных и открытость информации

Отмечено стремление к представлению широкого спектра гидрологических данных (как о водном режиме, так и о качестве воды) в ГИС-системах в режиме онлайн на базе единых общедоступных порталов на региональном или федеральном уровнях и прогнозов в формате наукастинг.

10. Развитие гражданской гидрологии как комплексного явления по вовлечению населения в процесс гидрологических наблюдений за уровнем, расходом воды, ее качеством, а также атмосферными осадками. Исчерпывающий отчет о мировой практике по внедрению гражданской гидрологии был подготовлен многонациональным коллективом исследователей и опубликован в 2019 г. [11].

Выводы

Выявленные тенденции являются характерными для всех ведущих гидрометеорологических служб мира. Современные технологии при грамотной их реализации могут значительно расширить наши знания о формировании стока и его

трансформации в русле. Несмотря на то, что большой вклад в развитие данных технологий внесли советские гидрологи, на данный момент времени именно Росгидромет должен перенимать опыт у более развитых служб с учётом местной специфики. Несколько шагов в этом направлении уже сделаны – формирование мобильных гидрологических лабораторий [12], закупка современного оборудования [13], переход постов в автоматизированный режим работы [14], но помимо технического перевооружения необходимо также пересматривать и концептуальные взгляды на проектирование сетей гидрологического мониторинга.

Список литературы

1. Guha-Sapir D., Hargitt D., and Hoyois Ph., 2003. Thirty years of natural disasters 1974–2003. UCL Presses Universitaires de Louvain, CRED-UCL, 190 p.;
2. Disasters in in numbers. Annual CRED EM-DAT Reports for 2017-2022 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.emdat.be/publications/> (Дата обращения 09.08.2023).
3. Number of flood disasters worldwide from 1990 to 2021 (2023) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.statista.com/statistics/1339730/number-of-flood-disasters-worldwide/> (Дата обращения 09.08.2023).
4. Vision of Humanity. Increase in Natural Disasters on a Global Scale by Ten Times [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.visionofhumanity.org/global-number-of-natural-disasters-increases-ten-times/> (Дата обращения 09.08.2023).
5. USGS Streamgaging network: Overview and issues for Congress [Электронный ресурс]. URL: <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R45695>
6. Вуглинский В.С., Высоцкий Д.В., Яковлева Т.И. Мониторинг поверхностных водных объектов в России // Метеорология и гидрология – 2021. – Vol. 6. – p. 77-88.
7. Описание устройства Seba Discharge Keeper [Электронный ресурс] // URL: <https://www.ecotech.com/wp-content/uploads/2019/05/ECOTECH-SEBA-Discharge-Keeper-20190524.pdf> (Дата обращения 25.11.2020).
8. Moy de Vitry M., Dicht S., J.P. Leitao. Flood X: urban flash flood experiments monitored with conventional and alternative sensors // Earth Syst. Sci. Data – 2017. – Vol. 9. – p. 657-666.
9. Bartens J. Green infrastructure and hydrology [Электронный ресурс] // URL: https://www.merseyforest.org.uk/files/GI_&_Hydrology_Report_May_2009.pdf (Дата обращения 23.07.2022).
10. Seibert J., Strobl B., Etter S., Hummer P., Meerveld H.J. Virtual Staff Gauges for Crowd-Based Stream Level Observations // Frontiers in Earth Science – 2019. – Vol. 7. – 10 p.
11. Njue N.J., Kroese S., Graf J., Jacobs S.R., Weeser B., Breuer L., Rufino M.C. Citizen science in hydrological monitoring and ecosystem services management: State of the art and future prospects // Science of the Total Environment – 2019. – Vol. 693. – 16 p.
12. РД 52.08.897–2020. Производство наблюдений приборным комплексом мобильной гидрологической лаборатории
13. РД 52.08.869–2022. Руководство по организации и проведению измерений уровня воды в водоёмах и на водотоках автоматизированными гидрологическими комплексами
14. РД 52.08.903–2020. Руководство по проведению сравнительных наблюдений за уровнем и температурой воды стандартными и автоматизированными методами

Гидрологические характеристики большого молодого Богучанского водохранилища по данным полевых исследований 2021-2023 гг.

А.Н. Василенко А.Н.^{1,2*}, В.Ю. Григорьев^{1,2}, И.А. Репина²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, Россия

an_vasilenko24@mail.ru

Аннотация. На основе трехлетних полевых исследований (2021-2023 гг.) составлены первые представления о гидрологических условиях, сформировавшихся в первое десятилетие после наполнения Богучанского водохранилища. В водохранилище на основе гидрологических съемок выделено 4 основные водные массы водохранилища, показаны различия водных масс заливов. В водохранилище выявлены зоны повышенного содержания органического вещества в воде и донных отложениях, сопряженные с заливами, внутри которых не была проведена достаточная подготовка ложа водохранилища, либо имеющих притоки с повышенным содержанием органического вещества. В летний период выявлены зоны гипоксии, с образованием сероводорода в придонных горизонтах. Также получены представления о ледовом режиме водохранилища и формирующихся донных отложениях.

Ключевые слова: температурный режим водохранилища, МЕТАН, растворенный кислород, донные отложения, водные массы.

Hydrological characteristics of the large young Boguchanskoye reservoir according to the data of field studies 2021-2023

A.N. Vasilenko^{1,2*}, V.Yu. Grigorev^{1,2}, I.A. Repina²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

an_vasilenko24@mail.ru

Abstract. Based on three-year field studies (2021-2023) the first conclusions about the hydrological conditions formed in the first decade after the filling of the Boguchansk reservoir are compiled. Four main water masses of the reservoir were identified based on hydrological surveys, and differences in water masses of bays were shown. Zones of increased organic matter content in water and bottom sediments were identified in the reservoir, associated with bays, within which the reservoir bed was not sufficiently prepared or which have tributaries with increased organic matter content. During the summer period, zones of hypoxia with hydrogen sulphide formation in bottom horizons were revealed. Also, information about the reservoir's ice regime and forming bottom sediments were obtained.

Keywords: reservoir temperature regime, METAN, dissolved oxygen, bottom sediments, water masses.

Введение

Гидрологический режим Богучанского водохранилища, заполненного до НПУ в 2015 г., малоизучен. Режимные наблюдения на его притоках прекратились в 1980-ых гг. а измерения температуры воды и отбор проб на химический состав осуществляется лишь в приплотинной части БоГЭС. Вместе с тем, при строительстве ГЭС затоплению подверглись значительные площади лесных и водно-болотных угодий, процесс распада и трансформации которых сопряжен с рядом неблагоприятных явлений, таких как появление зон гипоксии, повышенного содержания взвешенного и растворенного органического вещества, выделения метана. Также, несмотря на резко-континентальный климат, на акватории водохранилища наблюдаются полыньи чей генезис не ясен и может быть связан как с выходами подземных вод, так и процессами разложения органического вещества на дне. Неопределенность в оценке долгосрочных экологических последствий создания Богучанского водохранилища препятствует хозяйственному освоению региона, в частности строительству Нижнебогучанской ГЭС, и создает риски для водопользования и рыболовства на рассматриваемой территории.

Материалы и методы исследования

Богучанское водохранилище является, на 2023 г. замыкающим водохранилищем Ангарского каскада. Полный объем водохранилища – 58,2 км³, длина составляет 375 км, максимальная ширина – 15 км, максимальная глубина – 74 м, площадь зеркала при НПУ – 2362 км². Коэффициент водообмена менее 2. Несмотря на то, что водохранилище проектировалось с 1970-х, частичное его заполнение произошло только в 2012 г., а заполнение до проектных отметок – в августе 2015 г. Это делает данный водоём самым молодым, при этом большим водохранилищем России с гидроэлектростанцией высокой мощности (2997 МВт). Важной особенностью водохранилища является довольно маленькая призма регулирования, мощность которой составляет 1 м.

В водохранилище до сих пор продолжают процессы формирования донных отложений. На значительном количестве участков не была произведена достаточная подготовка ложа, затоплены значительные площади лесов и торфяных болот.

На водосборе водохранилища ведется достаточно активная хозяйственная деятельность, в-основном связанная с лесозаготовками. По акватории водохранилища осуществляется сплав леса.

Водоохранилище долинное, имеет достаточно большое количество заливов, образованных бывшими устьями рек и ручьев. Большинство заливов – многолопастные. В поймах притоков были затоплены болотные угодья, а также лесные массивы. Большая часть заливов расположена в нижней части водохранилища. Крупнейший залив – Ковинский разлив, значительно отделенный от основной акватории водохранилища. Водоохранилище в середине образует расширение (до 12 км), на месте бывшего разветвления р. Анагара. Данное разветвление морфологически разделяет нижнюю и среднюю часть водохранилища. Средняя часть водоема выделяется от Недокуринского расширения до заливов рр. Ката и Ёдарма – ориентировочной зоны воздействия Усть-Илимской ГЭС. Принятое в работе морфологическое разделение водохранилища приведено на Рис.

Нами было проведено 5 экспедиций (сентябрь 2021, февраль-март и июнь 2022, март-апрель и август 2023) в ходе которых проводилось гидрологическое зондирование, с измерением температуры, электропроводности воды, а также насыщения её кислородом, отбор проб общего органического углерода, отбор проб донных отложений. Экспедиции проводились в период повышенной водности во всём бассейне р. Ангара. Пробоотбором охвачены все основные морфологические части водохранилища, включая как крупнейшие, так и малые заливы.

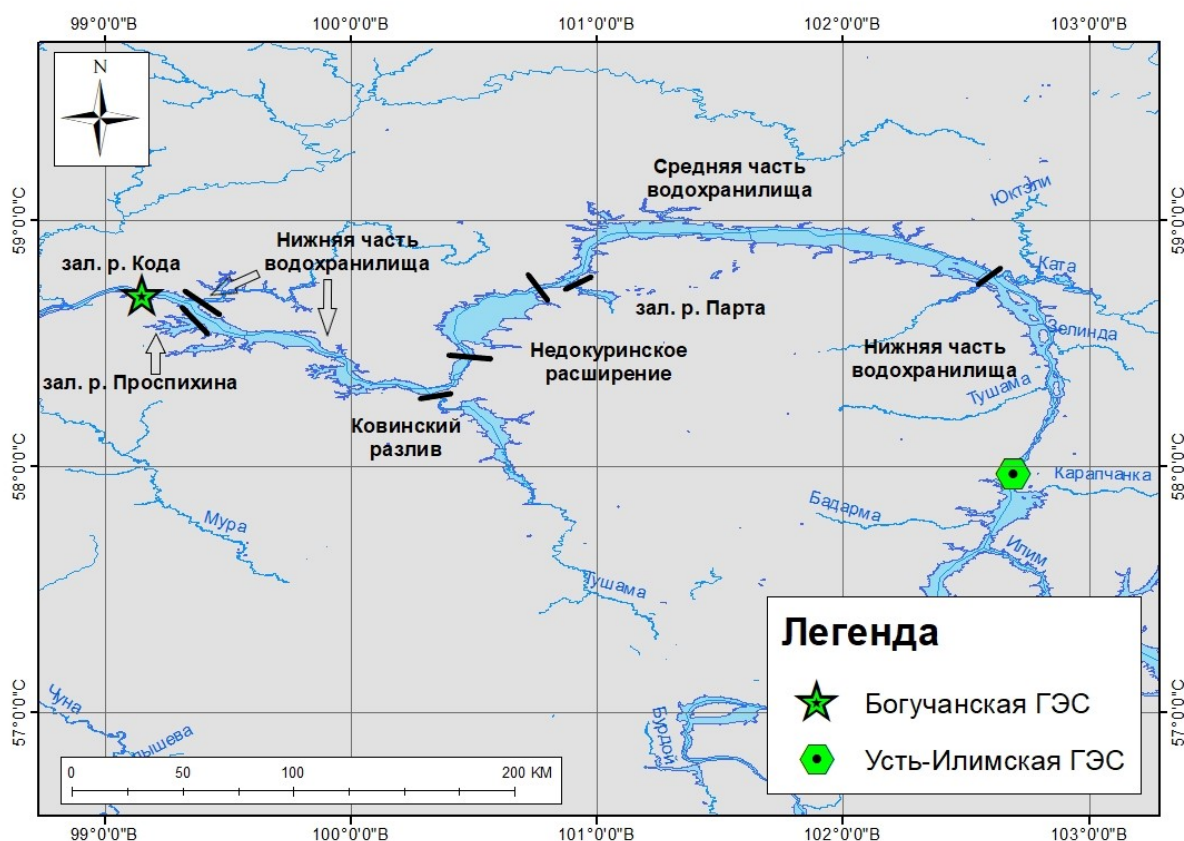


Рис. Принятая в работе схема морфологического деления водохранилища.

Работы проводились с моторной лодки. Осуществлялись линейные и радиальные маршруты. Зондирование осуществлялось зондом «CastAway», измерение содержания растворенного кислорода проводилось оксиметром «Metronix». Отбор проб воды проводился батометром Нискина. Горизонты отбора проб назначались в зависимости от результатов зондирования, но в обязательном порядке пробы отбирались на поверхности и у дна. При наличии стратификации пробы отбирались над и под слоем температурного скачка. Отбор проб донных отложений производился дночерпателем Экмана-Бёрджа. Пробы воды на общий органический углерод фиксировались слабой ортофосфорной кислотой, анализ проводился в лабораторных условиях.

Результаты и выводы

В сентябре, перед началом осеннего охлаждения водные массы водохранилища имеют в основном полноценную прямую температурную стратификацию. Температуры воды на поверхности в среднем 12,7°C. Эпилимнион простирается до глубин 10-20 м. В гиполимнионе выделяются 2 водные толщи с постепенным снижением температур и практически гомотермные придонные. Придонные температуры воды растут вверх по водохранилищу с уменьшением глубин от 6 до 8-9°C. Глубоководные заливы сравнимы по своим термическим характеристикам с русловой частью водохранилища, однако в мелководных гиполимнион может не проявляться, либо разница поверхностных и придонных температур может быть невелика.

В зимний период наблюдается обратная температурная стратификация, однако, разница температур воды подо льдом и у дна не превышает 1,5°C, а в заливах – 0,5-1°C.

В весенний (июнь) период в русловой части водохранилища наблюдалось практически полное перемешивание. В верхних слоях начинался прогрев, местами, в верхней части водохранилища наблюдались в том числе суточные слои скачка. Поверхностные температуры воды достигали 16°C. Прогретые слои в верховьях распространялись на глубину до 5 м. В заливах, за исключением глубоководных, начиналось установление прямой температурной стратификации. Формирование металимниона происходило на глубинах около 10 м. В летний период (август) температуры воды достигали на поверхности 26°C, при этом, для участков над затопленным руслом наблюдалась полноценная прямая стратификация, в то время как на затопленный поймах и в заливах наблюдалось сравнительно равномерное снижение температур воды от поверхности ко дну. Температурная стратификация выявляется на расстоянии 35-40 км от Усть-Илимской ГЭС.

Максимальная электропроводность воды наблюдалась, за исключением отдельных участков, в зимний период, достигая 180-200 мкСм/см в заливах, 170-180 мкСм/см в русловой части и в районах входов в заливы. В осенний период электропроводность была ниже в среднем на 20 мкСм/см (за исключением отдельных участков). В весенне-летний период электропроводность относительно зимнего сезона снизилась в пределах 10-20 мкСм/см. Важно отметить, что в осенний и в весенне-летний период максимальные значения электропроводности наблюдались в-основном у дна. Общие различия электропроводности по глубине во все исследованные сезоны укладывались в 10-20 мкСм/см по всему водохранилищу. Исключение составляла только придонная электропроводность Ковинского разлива, осенью превышавшая поверхностную более чем на 30 мкСм/см.

Содержание растворенного кислорода в водах было наибольшим, очевидно, в июне. В среднем оно составляло 10 мг/л, распределение по водной толще было практически равномерным. Зимой содержание кислорода составляло в среднем 6,9 мг/л, с минимумами около 4 мг/л у дна. В осенний период, в поверхностном слое наблюдались колебания содержания кислорода от 9 до 6 мг/л. В придонных слоях русловой части – до 5-6 мг/л. При этом в заливах и в разливе содержание кислорода у поверхности было меньше, чем в русловой части в осенний, зимний и весенний периоды. Однако, в летний период в заливах средней и верхней части водохранилища наблюдалось относительно насыщение кислородом более 100%, при этом визуально наблюдалось большое количество фитопланктона. Наименьшее содержание кислорода, среди обследованных заливов было отмечено в Ковинском разливе от 4 мг/л в поверхностных слоях до менее 2 мг/л в придонных. Схожие характеристики содержания кислорода были выявлены в летний период в заливах р. Едарма (верхняя часть водохранилища) и р. Кода (нижняя часть водохранилища). Придонные воды заливов р. Кова и р. Едарма в осенний и летний период имели отчетливый запах сероводорода. В другие сезоны подобного не наблюдалось. По опросам местных жителей, в летний период наблюдается запах сероводорода при подъеме сетей, кроме того, груза сетей окрашиваются в черный цвет, что характерно при наличии в воде сероводорода. Особенностью Ковинского залива являются большие площади затопленных болотных угодий, в залив р. Едарма впадает река, переносящая значительное количество органического вещества. В заливах не была проведена полноценная подготовка ложа.

Особенностью ледового режима водохранилища является длительное существование полыней, неясного генезиса в средней его части. Толщины льда при этом достигают к концу зимнего сезона величин в 0,9-1,5 м. Лед преимущественно кристаллический. Замерзание начинается в ноябре и фронт замерзания в течение месяца распространяется снизу-вверх. Навигация в верхней и средней части

продолжается фактически до середины-конца ноября. Вскрытие и очищение водохранилища ото льда обычно происходит в течение мая. Однако, при условиях теплой весны 2023 г. процессы вскрытия (потемнение льда, ярусность ледового покрова со слоями воды внутри) наблюдались с начала марта, при том, что очищение ото льда произошло в мае. Особым по ледовому режиму является залив р. Кова, в котором в суровые зимы формируется лед толщиной около 0,2 м., а в теплые зимы лед на значительных его участках не образуется вовсе.

Донные отложения русловой части водохранилища вне затопленных пойм представлены, в-основном, гравием и галькой. Затопленные поймы покрыты, в-основном, растительным опадом. В нижней части водохранилища, на участках вне бывших шивер, как показали исследования в июне 2022 г. донные отложения представлены растительным опадом, на среднем суглинке с включениями мелкой гальки. Однако, данные участки в нижней части водохранилища по площади невелики. Донные отложения заливов представляют собой, в-основном, растительный опад, в-основном – от затопленной древесины. В заливе р. Проспихина донные отложения представлены водными макрофитами, предположительно затопленными матами водорослей.

Разнообразие донных отложений наблюдается на литорали абразионных берегов. Типы донных отложений здесь варьируют по гранулометрическому составу (определен полевыми методами) от ила до среднезернистого песка и гальки. Состав зависит от литологического состава размываемых берегов. Плотность грунта варьирует от 750 кг/м³ (растительные остатки с включениями гальки или ила) до 1600 кг/м³ (глина, либо тяжелый суглинок).

Наибольшие концентрации органического углерода отмечены на точках пробоотбора с большим количеством органических остатков на пойме (правой) ниже Недокуринского разлива (110 км от БоГЭС), и в заливе р. Едарма. Количество органического углерода составило в среднем 23 и 34 мг/л соответственно. Наименьшее количество органического углерода получено на литорали Недокуринского разлива, у абразионной стенки (0,21 мг/л), хотя именно здесь отмечены повышенные концентрации метана в воде.

В русловой части средней части водохранилища (район устья залива р. Ката) концентрация органического углерода составила 2,7 мг/л. При глинистых донных отложениях. При том, что на затопленной пойме на том же участке (противоположный берег, устье залива р. Едарма) концентрация органического углерода составила 4 мг/л.

На литорали в полынье УИГЭС ниже залива Тушамы концентрация составила 4,9 мг/л, а непосредственно в заливе р. Тушама – 5,9 мг/л.

Таким образом, углерод в донных отложениях, имеющих значительную минеральную составляющую, присутствует в средней и верхней частях водохранилища, однако концентрации органического углерода в нем невелики, не достигают 6 мг/л. Нерешенным остаётся вопрос о характеристиках донных отложений залива р. Кова.

Период весенней гомотермии и начала установления прямой температурной стратификации (лето 2022 г.) отличается от периода обратной температурной стратификации (зима 2023 г.) большим содержанием общего углерода – трехкратное различие у плотины БоГЭС, и меньшей долей неорганического углерода – 21% против 33% зимой. Существенное превышение зимних концентраций над летними наблюдается в заливах рек Кода и Проспихина, что вероятно связано с влиянием речного притока и стоков с г. Кодинска. Также выделяется правый рукав русла Ангары в Недокуринском разливе, что вероятно связано с локальными особенностями места отбора проб.

Благодарности

Исследования выполнены при поддержке ПАО «Русгидро» (договор подряда № 1010-416-2021 от 27 апреля 2021 г.)

Acknowledgments

The research was supported by PJSC RusHydro (contractor agreement No. 1010-416-2021 dated 27 April 2021).

Современное состояние исследований тепловых процессов в реках и термического режима рек в России и мире

А.Н. Василенко*, Д.В. Магрицкий, Н.Л. Фролова

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
an_vasilenko24@mail.ru*

Аннотация. Температура речной воды является одним из важных факторов гидроэкологического состояния потока, обуславливая ряд физических, химических и биологических процессов. При этом, изучению термики рек традиционно уделяется меньше внимания, в сравнении с другими направлениями в гидрологии суши. Данная работа посвящена результатам анализа научных публикаций соответствующей тематики за последние десятилетия, описанию состояния исследований и их перспективных направлений. В Европе и Северной Америке к настоящему времени, в первую очередь на базе кратко- и среднесрочных высокочастотных наблюдений, для, в первую очередь, малых рек и ручьев умеренной климатической зоны показано, что температуры воды формируются под влиянием большого количества физико-географических, метеорологических и гидрологических факторов, причем, считается, что количество факторов снижается с ростом величины водного объекта и шага по времени. Ограниченным остаётся понимание влияния городов и теплового загрязнения на температуры воды рек. Оценки воздействия изменений климата на температуры воды в реках за период 1901-2010 гг. различаются от $-1,21^{\circ}\text{C}/10\text{лет}$ до $1,076^{\circ}\text{C}/10\text{лет}$. В последние годы в литературе отмечается, что рост температур речной воды идет медленнее, чем ожидается. В России и СНГ наиболее изученным является вопрос воздействия водохранилищ на термический режим рек, который достаточно активно изучается в наше время в Восточной Европе и Китае. Кроме того, созданы в 1970 гг. территориальные обобщения температур воды и теплового стока рек. Расчеты теплового стока в арктические моря совершенствуются и уточняются до настоящего времени. По всей территории ведутся систематические режимные наблюдения. Основными механизмами исследований на сегодняшний день являются статистические и физико-математические модели, базирующиеся в первую очередь на связях температур воды и воздуха. Однако пока не получили широкого распространения данные тепловых снимков, которые могут помочь найти ответы на ряд описанных вопросов.

Ключевые слова: температура воды рек, тепловой сток рек, изменения климата, гидрологические измерения, моделирование температур воды.

The current state of studies of thermal processes in rivers and thermal regime of rivers in Russia and all over the world

A.N. Vasilenko*, D.V. Magritskiy, N.L. Frolova

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
an_vasilenko24@mail.ru*

Abstract. River water temperature is one of the most important factors in the hydro-ecological condition of a river, determining a number of physical, chemical and biological

processes. At the same time, the study of river thermicity has traditionally received less attention than other areas of terrestrial hydrology. This paper is devoted to the results of an analysis of scientific publications on the relevant topics over the last decades, describing the state of research and its promising directions. In Europe and North America, mainly on the basis of short and medium-term high-frequency observations, mainly for small rivers and streams in temperate climates, it has been shown that water temperatures are formed under the influence of a large number of physiographic, meteorological and hydrological factors, and it is assumed that the number of factors decreases with increasing water body size and time step. Understanding of the effects of cities and thermal pollution on river water temperatures remains limited. Estimates of the effects of climate change vary (from -1.21°C to $1.076^{\circ}\text{C}/10$ years in 1901-2010). At the same time, the observations increasingly show that river water temperatures have been rising more slowly than expected. In Russia and the CIS, the most studied issue is the influence of reservoirs on the thermal regime of rivers, which is now being studied quite actively in Eastern Europe and China. In addition, territorial generalizations of water temperatures and thermal discharge of rivers were made in the 1970s. Calculations of thermal discharge into the Arctic seas are still being improved and refined. Systematic regime observations are carried out throughout the area. The main mechanisms of research to date are statistical and physical-mathematical models based primarily on water-air temperature relationships. However, thermal imagery data, which can help to find answers to a number of the questions described, have not yet been widely used.

Keywords: river water temperature, heat flow of rivers, climate change, hydrological measurements, modeling of river water temperatures.

Температуры речной воды регулируют прямо или косвенно достаточно большое количество физических, химических и биологических процессов в реках [1]. Наибольшее гидроэкологическое значение имеет ограничение максимального количества растворенного кислорода в воде температурой воды [2]. Тепловой сток оказывает влияние на микро и мезоклиматические параметры речных долин и прибрежных зон морей, на условия русловой эрозии, особенно в зоне распространения многолетнемерзлых пород [3], и транспорта наносов [4]. При этом, достаточно продолжительное время отмечается сравнительно низкий интерес к «тепловой» тематике в гидрологии рек [5, 6], хотя интерес к теме растет год от года. Настоящий доклад посвящен анализу существующих успехов в изучении термического режима рек в России и за рубежом, особенностям термических исследований в России, а также их возможным перспективам. В список литературы внесены только наиболее значимые публикации.

Температура воды в реках формируется под воздействием большого числа гидрометеорологических и физико-географических факторов. Количество факторов, оказывающих воздействие на формирование температур воды в реках, увеличивается с уменьшением пространственного масштаба изучаемого объекта. Согласно [1] можно выделить, по крайней мере для малых и средних рек, масштабы региона, бассейна, участка течения и отдельного участка русла. Ведущим фактором формирования температур воды в реках считается величина прямой солнечной радиации, поступающей к водной поверхности. В большинстве случаев, эта величина выражается через температуру воздуха. Связь между температурами воды и воздуха считается линейной, однако временной сдвиг между предиктором и предиктантом в линейной зависимости может достигать, в зависимости от величины водотока, первых десятков дней. В работе [7] показан рост вариабельности температур воды на водотоках с порядком до 3-го включительно в бассейне р. Луара (8 порядок по Хортону-Шталлеру). В работе [8] показано, что на больших реках (на расстоянии более 100 км от истока)

растут коэффициенты при температуре воздуха в уравнении регрессии средних за 7 суток температур воды от температуры воздуха за тот же период (в отсутствие значительного подземного притока), поэтому, температуры воды этих рек в наиболее значительной степени определяются климатическими факторами. Факторами, снижающими надежность линейной связи температур воды и воздуха, являются: степень залесенности берегов, закономерно снижающаяся с ростом порядка реки [1; 9]; скорости течения и уклоны водной поверхности [10]; выходы грунтовых вод [11].

Большая часть данных выводов получена в последние два десятилетия в Европе и Северной Америке, на реках, протекающих преимущественно в зонах умеренного климата. Важнейшей частью данных исследований является активное использование высокочастотных записей логгеров, со сроками установки от нескольких месяцев, до, реже, нескольких лет. А также в связи с использованием аппарата физико-математического моделирования.

В России исследования термике рек исторически в большей мере связаны с изучением теплового стока, как фактора ледовой обстановки на реках, в морских заливах и прибрежной зоне арктических морей. В значительной мере, этому способствует наличие стационарной сети наблюдений, с включенными в программу работы измерениями температур воды. В Северной Америке, к примеру, параллельные многолетние наблюдения за стоком и температурой воды существуют в значительно меньшем количестве [12]. Интерес к исследованиям теплового стока рек в 21 веке растёт в связи с изменениями климата. Модельные расчеты, выполненные на основании декадных данных о температурах воды в реках, показали, что изменения теплового стока арктических рек может обуславливать до 10% изменений площадей льда в морях Северного Ледовитого океана [13]. При этом, во многих англоязычных публикациях ошибочно интерпретируются средние за 8-10 суток температуры воды на гидрологических постах (в данной форме они публикуются в изданиях «Гидрологических ежегодников»), как единичные измерения 1 раз в 10 суток. Вопрос оценки теплового стока рек с территорий, не охваченных гидрологическими наблюдениями в настоящее время не решен до конца, новые методы, базирующиеся на элементах гидрологических расчётов, предлагаются в последние годы [14]. Не решенным остается и вопрос трансформации теплового стока в низовьях (ниже замыкающих створов) и устьевых областях рек, особенно подверженных приливам. Исследования авторов позволяют предположить, что тепловой сток в низовьях рек снижается на величины до 25% [15].

Значительная неопределенность сохраняется в вопросе репрезентативности мест измерений температур воды на больших реках. Как показали исследования, проведенные в 40-е годы 20 в. различия температур на стрежне и у берегов, могут достигать 1-2°C [16]. В этой же работе было показано наличие различий в температурах воды больших рек у поверхности и у дна, достигающей тех же величин в 1-2°C. Различия в температурах воды в различных частях потока наблюдались авторами в низовьях р. Колымы, а также в период половодья на р. Северная Двина. Недоучет или переучёт значительного количества тепла, требует корректировок мест измерений или же должен тем или иным образом учитываться в расчётах теплового стока в створе, что было сделано для р. Лена [17] и привело к уточнению величины теплового стока на 1 ЭДж/год.

Климатические изменения сложным образом повлияли как на температуры воды, так и на тепловой сток. Оценки изменения температур воды за различные периоды времени находятся в пределах 1.21°C - 1.076°C/10 лет с 1901 по 2010 гг. [2]. В большинстве случаев признанным является рост среднегодовой температуры воды, вычисленной за 12 месяцев с учетом нулевых температур воды на замерзающих реках.

Рассмотрение изменений в рамках отдельных месяцев проводится достаточно редко. Однако, известно, что на арктических реках России наибольший рост зафиксирован на севере ЕТР в период спада половодья в последние 30 лет [15]. Более изучаемой, является проблема быстрых и значительных изменений (обычно увеличений) максимальных суточных температур воды, получившая в англоязычной литературе название “thermoreaking”, обусловленная либо работой гидротехнических сооружений, либо волнами тепла/холода. Опасность данного явления для экосистем рек заключается в гибели множества stenothermic видов, в том числе ценных промыслов (лососёвых). В России проявление интенсивного нагрева воды подробно описано в публикации, посвященной гибели промысловой рыбы на р. Щучья в бассейне Оби [18].

Стоит заметить, что, не смотря на значительные изменения температур воды в отдельные недели и месяцы, на сегодняшний день величину отклика температур речной воды на изменения климата можно считать меньшей, чем это предполагалось в последние десятилетия, как минимум в масштабах отдельных фаз гидрологического цикла [15; 19].

Отдельно стоит отметить все возрастающее число публикаций, посвященных изучению последствий строительства водохранилищ на реках. В первую очередь, интерес к данной тематике развивается в КНР и Польше. В целом, тематика воздействия гидротехнических сооружений и городов на температуры воды и тепловой сток рек представляется одной из наиболее динамично развивающихся и имеющих, не смотря на множество советских исследований 70-х и 80-х годов множество нерешенных вопросов.

Успехам дальнейшего развития термических исследований на реках могут поспособствовать как в России, так и в мире – увеличение открытости данных, как минимум с суточным разрешением; увеличение количества самописцев; развитие термических моделей и более активное применение спутниковых данных и беспилотных средств измерений. Важным видится и более активное расширение географии исследований, как в Арктику, так и в южные регионы.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания кафедры гидрологии суши МГУ им. М.В. Ломоносова «Анализ, моделирование и прогнозирование изменений гидрологических систем, водных ресурсов и качества вод суши»

Acknowledgments

The work was supported by State program for Hydrology department of Lomonosov MSU “Analyze, modeling and predictions of changes of hydrological systems, water resources and inland water quality”

Список литературы

1. Garner G., Hannah D. River water temperature in the United Kingdom. // *Progress in Physical Geography*. 2015. 39. 68-92. 10.1177/0309133314550669
2. IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
3. Costard F., Dupeyrat L., Gautier E., Carey-Gailhardis E. Fluvial thermal erosion investigations along a rapidly eroding river bank: Application to the Lena River (Central Siberia). // *Earth Surf. Process. Landforms*. 2003. 28, 1349–1359.

4. Syvitski J., Cohen S., Miara A., Best J. River temperature and the thermal-dynamic transport of sediment. // *Global and Planetary Change*. 2019. 178. P. 168-183, ISSN 0921-8181, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.04.011>.
5. Webb B., Hannah D, Moore R., Brown L., Nobilis F. Recent advances in river and stream temperature. // *Hydrological Processes*. 2008. 22. P. 902–918.
6. Ficklin D., Hannah D., Wanders N., Dugdale S., England J., Klaus J., Kelleher C., Khamis K., Charlton M. Rethinking River water temperature in a changing, human-dominated world. // *Nature Water*. 2023. 1. 125-128. 10.1038/s44221-023-00027-2.
7. Beaufort A., Moatar F., Curie F., Ducharne A., Bustillo V., Thiéry D. River Temperature Modelling by Strahler Order at the Regional Scale in the Loire River Basin, France. // *River Research and Applications*. 2015. 32. 10.1002/rra.2888.
8. Beaufort A., Moatar F., Eric S. Loicq P. Hannah D. Influence of landscape and hydrological factors on Stream-Air temperature relationships at regional scale. // *Hydrological Processes*. 2019. 34. 10.1002/hyp.13608.
9. Jackson F. Hannah D. Ouellet V. Malcolm I. A deterministic river temperature model to prioritise management of riparian woodlands to reduce summer maximum river temperatures. // *Hydrological Processes*. 2021 35. 10.1002/hyp.14314.
10. Garner G., Malcolm I., Sadler J., Hannah D. The role of riparian vegetation density, channel orientation and water velocity in determining river temperature dynamics. // *Journal of Hydrology*, 2017. 553. 471-485.
11. Fakhari M., Raymond J., Martel R.; Drolet J.-P., Dugdale S., Bergeron N. Analysis of Large-Scale Groundwater-Driven Cooling Zones in Rivers Using Thermal Infrared Imagery and Radon Measurements. // *Water*. 2023, 15, 873. <https://doi.org/10.3390/w15050873>
12. Yang D., Shrestha R., Lung J., Tank S., Park H. (2021). Heat flux, water temperature and discharge from 15 northern Canadian rivers draining to Arctic Ocean and Hudson Bay. *Global and Planetary Change*. 204. 103577. 10.1016/j.gloplacha.2021.103577.
13. Park H., Watanabe E., Kim Y. Polyakov I., Oshima K., Zhang X., Kimball J., Yang D. Increasing riverine heat influx triggers Arctic Sea ice decline and oceanic and atmospheric warming. *Science Advances*. 2020 6. 10.1126/sciadv.abc4699.
14. Магрицкий Д. В. Новая методика расчета теплового стока рек при отсутствии данных наблюдений // *Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле*. 2022. Т. 40. С. 82–104.
15. Vasilenko A., Magritskiy D., Frolova N., Shevchenko A. Patterns of heat flux formation on the large Russian Arctic rivers and its transformations in estuaries under the influence of climate-induced and dam-induced effects. // *Geography. Environment. Sustainability*. 2022. Vol.15, no.4. P.158-170.
16. Соколова Е.М. Термический режим рек СССР. // *Труды ГГИ*. 1951. Вып. 30(84). С. 1-112.
17. Tananaev N., Georgiadi A., Fofonova A. Revising contemporary heat flux estimates for the Lena River, Northern Eurasia. // *Hydrology Research*. 2019. 50 (5). P. 1440–1452. doi: <https://doi.org/10.2166/nh.2019.062>
18. Матковский А.К., Ширшов В.Я., Кривенко И.А., Савчук П.Ю., Коваленко А.И., Макаренкова И.Ю., Семенова Л.А., Степанова В.Б., Абдуллина Г.Х., Князева Н.С., Захарова Т.В. Причины гибели сибирской ряпушки в нерестовой реке Щучья бассейна Оби // *Вестник рыбохозяйственной науки*. 2017. Т. 4. №1(13). С.48-64.

Межгодовые изменения качества вод р. Волга на различных участках

З.В. Волкова*, Д.В. Ломова, Е.Р. Кременецкая

Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия
zinaL@bk.ru

Аннотация. Обобщены многолетние данные наблюдений (с 2007 по 2021 гг.) за качеством вод реки Волги на верхнем, среднем и нижнем участках. Приведены характеристики межгодовых изменений приоритетных показателей качества вод и индекса загрязнения вод (ИЗВ). Рассмотрены тенденции многолетних изменений гидрохимических показателей и качества вод реки.

Ключевые слова: гидрохимические показатели, ИЗВ, качество вод, определяющие факторы.

Long-term variations of the water quality characteristics of the Volga River

Z.V. Volkova*, D.V. Lomova, E.R. Kremenetskaya

Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
zinaL@bk.ru

Abstract. The long-term data of observations (2007–2021) of the water quality of the Volga River in the upper, middle and lower sections are summarized. The characteristics of interannual changes in priority indicators of water quality and water pollution index (WPI) are given. The trends of long-term changes in hydrochemical indicators and water quality of the river are considered.

Keywords: hydrochemical indicators, WPI, water quality, determining factors.

Введение

Изучение межгодовой динамики и тенденций состояния загрязнения вод различных участков р. Волги в условиях высокой антропогенной нагрузки имеет важное значение для развития хозяйственной деятельности и питьевого водоснабжения в бассейне реки. Целью работы является обобщение и анализ данных о современном состоянии качества вод на различных участках р. Волги, тенденций в их изменении в зависимости от хозяйственной деятельности и климатических факторов.

В работе использованы данные государственного мониторинга ГСН Росгидромета за период 2007-2021 гг., обобщены натурные исследования формирования качества вод на Верхней, Средней и Нижней Волге, выполнен анализ литературных источников.

Процессы эвтрофирования водных объектов в условиях высокой антропогенной нагрузки и изменений климата способствуют формированию аноксидных зон и заморных условий, негативно воздействующих на характеристики качества вод и экологическое состояние водного объекта. Исследование роли гидрофизических, гидрохимических, гидробиологических и геоэкологических и техногенных процессов в формировании качества вод в водных объектах суши имеет важное значение для

разработки стратегии улучшения их состояния при высоких антропогенных воздействиях и меняющихся климатических условиях.

Существующие системы мониторинга гидрохимических, гидродинамических, гидрофизических, гидробиологических и др. характеристик водных объектов нуждаются в расширении и совершенствовании. Необходимы также обобщения накопленных данных по различным объектам, с целью оценки их экологического состояния и загрязнения вод приоритетными загрязняющими веществами, прогноза изменения качества вод при различных сценариях развития хозяйственной деятельности и климатических изменений.

Проблемы использования и охраны водных ресурсов занимают важнейшее место в управлении ресурсным потенциалом страны. Сложность решения задач водообеспечения обусловлена неравномерностью распределения вод по территории и во времени, а также неудовлетворительным состоянием качества вод многих водных объектов, высокими затратами на водоподготовку. Дефицит чистой воды растет. По мере роста водопотребления, растет и загрязнение вод. Большинство основных систем рек загрязнены в разной степени, что угрожает здоровью населения, приводит к истощению запасов рыбы, уничтожению фауны, закрытию пляжей, снижает возможности рекреационного использования территорий [3;5].

Материалы и методы исследования

Использование многолетних данных гидрохимических наблюдений позволяет отслеживать тенденции в изменениях класса качества вод по отдельным элементам и получить оценки качества вод по различным поллютантам. Анализ выполнялся для периода 2010-2019 гг. с использованием материалов наблюдений Федерального агентства водных ресурсов РФ [7;8]. Рассматривались повторяемости превышений ПДК (ПП ПДК) для тяжелых металлов (ТМ), биогенных элементов, нефтепродуктов, фенолов, показателей окисляемости: Ок.Би, БПК₅, растворенного в воде кислорода O₂ и другие характеристики качества вод. Выполнялась статистическая обработка данных гидрохимических наблюдений. Для оценки класса качества вод использована Комплексная экологическая классификация поверхностных вод [4], применялись также интегральные и комплексные показатели, фоновые региональные значения и др.

Оценка уровня загрязнения вод проводилась по величинам ПП ПДК, значения до 50 % принимались как характеризующие низкое загрязнение, а соответствующие 51-100% – как умеренное. Для характеристики уровней ВЗ и ЭВЗ рассматривались данные о числе случаев их проявления в бассейнах рек.

Результаты и выводы

Анализ данных показал, что более высокое качество вод по содержанию ТМ, ОБ, НП, фенолов отмечается на нижнем участке р. Волги, что согласуется с данными [1]. Анализ обобщенных данных показывает, что наиболее загрязнены воды Верхнего и Среднего участков реки. Следует отметить, что участки реки характеризуются более высоким уровнем содержания загрязняющих веществ по сравнению с бассейнами рек, что связано с сосредоточенными сбросами промышленных предприятий и с высокой антропогенной нагрузкой на р. Волга (створы Ивановский ГУ, Верхнее Лебяжье).

Средние годовые величины ПП ПДК для разных элементов испытывают, как правило, значительные межгодовые колебания. Значения коэффициентов вариации для разных элементов меняются в широком диапазоне. Более низкие, устойчивые их значения характерны для ТМ (Cu, Fe, Mn) и Ок.Би, БПК₅. Значительный разброс характерен для НП, фенолов.

Анализ показателей повторяемости превышения ПДК (ПП ПДК) различных ингредиентов рассмотренных участков свидетельствует, что приоритетными

показателями загрязнения Волги являются, в первую очередь, тяжелые металлы (Cu, Zn, Fe, Mn) и показатели окисляемости воды (Ок.Би и БПК₅), а содержание Al и Ni, как и азота (нитритного, нитратного, аммонийного) менее значимо.

Преобладающими классами качества вод на участках р. Волги являются 3Б (слабо загрязненная) - 4А (загрязненная). Для водохранилищ Волги преобладающими классами качества вод являются 4А-4Б (загрязненная – сильно загрязненная). В отдельные годы в створах Ивановского ГУ (2012-2013, 2017 гг.), г. Дубна (2012-2013 гг.), Угличского водохранилища (2012г.), Камской ГЭС (2012г) качество вод относилось к разряду 4А (грязная). В створе ниже г. Казани воды относятся к классу 4А во все рассматриваемые годы.

Обобщение данных стандартных наблюдений за стоком и приоритетными гидрохимическими показателями (концентрации меди, цинка, нефтяных углеводородов (НУ), БПК₅, фенолы) в вершине дельты (створ Верхнее Лебяжье) для периода 1977-2014 гг. проводилось с учетом водности года [6;2]. При обработке данных наблюдений применялся статистический подход. Имеющиеся ряды гидрохимических характеристик были разделены на части, отражающие многоводные и маловодные условия. Характер кривых и их взаимное расположение заметно различаются для условий с разной водностью. Оценка класса качества воды с использованием Комплексной экологической классификации качества поверхностных вод суши представлена в Табл.

Оценка ИЗВ для различных станций р. Волги, расположенных в верхней части реки (Ивановский Гидроузел, г. Дубна), в средней части реки (г. Нижний Новгород) и на Нижней Волге – с. Верхнее Лебяжье (вершина дельты) и ниже г. Астрахань за период 2007-2021 гг. показала значительные различия класса качества вод по станциям. Наиболее загрязненными участками являются район Куйбышевского водохранилища, г. Казань (4А класс вод – «грязная»), в течении всего периода, а также верхний участок – Ивановское и Угличское водохранилища (г. Дубна, г. Углич, Угличский ГУ), на этих станциях в отдельные годы (2012, 2013, 2017) класс качества вод соответствовал (4А) – «грязная». Отмечено загрязнение вод на притоках.

Табл. Изменение класса качества воды р. Волги в створе Верхнее Лебяжье в условиях различной обеспеченности стока в период 1977–2014 гг.

Обеспеченность, %	10	25	50	75	90
Сток Волги, км куб.	312	284	256	227	201
Медь, мкг/л	12,3	9,3	6,5	4,5	3,3
Класс качества вод	4Б	4А	4А	3Б	3Б
Цинк, мкг/л	57	40	25	14	7
Класс качества вод	4Б	4Б	4А	4А	3Б
НУ, мг/л	0,50	0,30	0,15	0,06	0,04
Класс качества вод	5А	5А	5А	4Б	4А
БПК ₅ , мгО ₂ /л	4,2	3,8	3,4	2,9	2,6
Класс качества вод	4Б	4А	4А	4А	4А
Взвешенные вещества, мг/л	42	31	21	14	9
Класс качества вод	4А	4А	3Б	2Б	2А
Фенолы, мкг/л	4,9	3,6	2,4	1,5	1,0
Класс качества вод	4Б	4Б	4Б	4Б	4Б

Примечание: 3Б – слабо загрязненная; 4А – умеренно загрязненная; 4Б – сильно загрязненная.

Сравнение характеристик качества вод в бассейне и на отдельных участках реки показало более высокий уровень загрязнения вод участков реки, что обусловлено сбросами сточных вод и локальными загрязнениями.

Многолетние изменения гидрохимических показателей и качества вод реки достаточно неоднородны. Содержание ряда элементов имеет тенденцию к снижению, другие характеризуются колебаниями роста и снижения, третьи меняются хаотично и беспорядочно.

Анализ имеющихся данных о состоянии качества вод Волги (концентрациях приоритетных загрязняющих веществ (медь, цинк, железо, марганец и др.) и попытки объяснить их пространственно-временные изменения пока не дают удовлетворительных результатов, что связано с недостаточной полнотой материалов мониторинга, а также недостаточной изученностью гидробиологических процессов и влияния климатических факторов на массообмен в речной системе. Для выявления механизмов внутриводоемных процессов на Волге, необходимы более детальные экспедиционные исследования.

Таким образом, на основе обобщения материалов ГСН за качеством воды в речной системе Волги за период 2007-2021 гг. получены данные об изменчивости показателей качества воды на станциях Верхней Волги (Иваньковский Гидроузел, г. Дубна; Средней Волги (г. Нижний Новгород); Нижней Волги (с. Верхнее Лебяжье, Астрахань). Определены приоритетные показатели качества вод на рассмотренных участках (ТМ, биогенные элементы, ОкБи, БПК5). Рассмотрены тенденции изменения показателей качества вод с использованием Индекса Загрязнения Вод (ИЗВ), средних за период величин превышений ПДК (ПП ПДК). Определены значения коэффициентов вариации для гидрохимических показателей, и, на основе сравнения данных для бассейна Волги и рассмотренных станций наблюдений для разных участков реки, показаны их различия.

Благодарности

Работа выполнена в рамках плана ИВП РАН, тема 2 «Исследование геоэкологических процессов в гидрологических системах суши, формирования качества поверхностных и подземных вод, проблем управления водными ресурсами и водопользованием в условиях изменений климата и антропогенных воздействий» (N FMWZ-2022-0002), N государственной регистрации 122041100236-4).

Acknowledgments

The work was carried out within the framework of the IVP RAS plan, topic 2 «Study of geoeological processes in hydrological systems of land, formation of surface and groundwater quality, problems of water resources management and water use in the conditions of climate change and anthropogenic impacts» (N FMWZ-2022-0002), N state registration 122041100236-4).

Список литературы

1. Богданов Н.А., Чуйкова Л.Ю., Чуйков Ю.С. Геоэкология дельты Волги: Икрянинский район. М.: Медиа-ПРЕСС. 2013. 383 с.
2. Бреховских В.Ф., Волкова З.В. Методические подходы к оценке качества речных вод // Водные ресурсы России: современное состояние и управление. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2018. Сочи. С. 333-342.
3. Волков В.И., Поляков С.И. Стандарты качества воды в источниках США. ЦБНТИ, Министерство мелиорации и водного хозяйства СССР. Экспресс - информация. Серия 4, вып. 16 // Комплексное использование и охрана водных ресурсов за рубежом, М., 1974. С.4-14.

4. Волкова З.В., Ломова Д.В., Кременецкая Е.Р. Изменения качества вод в речных системах ЕЧР // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. 11. Химический состав и качество воды. Пермь, 2023.
5. Диффузионное загрязнение водных объектов: проблемы и решения. ФГБУН ИВП РАН, М., 2020. С.27-71.
6. Загрязняющие вещества в водах Волжско-Каспийского бассейна. Астрахань: Издатель Сорокин Р.В. 2017. 408с.
7. Интернет ресурс: gvr-1-18 csv; <https://gis.favr.ru/web/guest/opendata>. 2021.
8. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в РФ за 2021 г. М.: Росгидромет, 2022. 216с.

Организация сети гидрологических наблюдений на водосборах горных и предгорных рек

Е.В. Гайдукова, А.В. Плеханова*, Н.А. Решин, И.О. Винокуров

*Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Россия
anastasia35plehanova35@yandex.ru*

Аннотация. Предлагается методика определения оптимальной численности гидрологической сети в горных и предгорных районах, основанная на вычислении критериев, которые отвечают за учет факторов формирования стока, погрешности определения характеристик стока и корреляцию между постами. Выполнен анализ существующих методик оптимизации режимной гидрологической сети, дающих численные оценки плотности постов. Рассчитана оптимальная численность постов в нескольких горных районах по методике ГГИ, оценены положительные и отрицательные стороны примененной методики. Основой предлагаемой методики является построение цифровых двойников горных и предгорных водосборов и определение критериев плотности гидрологической сети с учетом высотной поясности рельефа.

Ключевые слова: режимная сеть, критерии плотности сети, оптимальная численность постов, 3D модель рельефа, высотная поясность.

Organization of a network of hydrological observations at the watersheds of mountain and foothill rivers

E.V. Gaidukova, A.V. Plekhanova*, N.A. Reshin, I.O. Vinokurov

*Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia
anastasia35plehanova35@yandex.ru*

Abstract. A method is proposed for determining the optimal size of the hydrological network in mountainous and foothill areas, based on the calculation of criteria that are responsible for taking into account the factors of runoff formation, the error in determining runoff characteristics, and the correlation between stations. An analysis of the existing methods for optimizing the regime hydrological network, which gives numerical estimates of the density of gauges, has been carried out. The optimal number of gauges in several mountainous regions was calculated using the method of State Hydrological Institute, and the positive and negative aspects of the applied method were assessed. The basis of the proposed methodology is the construction of digital twins of mountain and foothill watersheds and the determination of criteria for the density of the hydrological network, taking into account the altitudinal zonality of the relief.

Keywords: regime network, network density criteria, optimal number of posts, 3D relief model, altitudinal zonality.

Введение

Гидрология суши как самостоятельная наука сформировалась только к концу XX столетия. Но систематические измерения гидрологических характеристик начались еще при правлении Петра I, когда по его указанию были произведены описания

большинства рек с точки зрения их судоходных условий, и в 1715 году был открыт первый водомерный пост на реке Неве у Петропавловской крепости.

Рассматривая современное состояние гидрологической сети, следует отметить следующую динамику численности гидрологических постов на территории России: максимальное количество речных постов было зарегистрировано в 1986 году и составляло около 4 тысяч; к 2020 году это количество сократилось в 1,5 раза; с 2018 года количество вновь стало увеличиваться и к 2020 году появилась 21 новая станция [1].

Организация гидрологических наблюдений на речных водосборах является актуальной темой из-за необходимости контроля над водными ресурсами при рациональном использовании материальных вложений. Правильная организация гидрологической сети позволит собирать информацию о количестве воды и ее качестве, а также предсказывать возможные риски для гидротехнических сооружений и населения, связанные с изменением гидрологических характеристик водных объектов. Это поможет сократить ущерб, вызванный наводнениями и другими катастрофами, а также обеспечить эффективное использование водных ресурсов и их защиту от истощения.

Целью исследования является разработка и апробация методики определения оптимальной численности гидрологической сети в горных и предгорных районах с построением цифровых двойников водосборов и определением с учетом высотной поясности рельефа критериев плотности гидрологической сети, учитывающих факторы формирования стока, погрешности определения характеристик стока и корреляцию между постами.

Материалы и методы исследования

В качестве основы для расчетного метода стал подход, разработанный профессором И.Ф. Карасёвым и опубликованный в трудах ГГИ (Государственного гидрологического института), выпуск 164 за 1968 год [2]. Данный подход остается до сих пор единственным, который предлагает расчетные формулы, обоснованные физическими процессами, которые происходят на речных водосборах. Задача подхода сводится к определению такой густоты пунктов наблюдений, которая была бы достаточной для получения достоверных и репрезентативных гидрологических характеристик и не требовала бы открытия чрезмерного количества постов с большим персоналом, приводящим к неоправданным затратам материальных ресурсов.

Чтобы узнать оптимальное число постов, необходимо рассчитать несколько критериев: градиентный критерий $F_{\text{град}}$ (км²), корреляционный критерий $F_{\text{корел}}$ (км²) и репрезентативный критерий $F_{\text{репр}}$ (км²).

Градиентный критерий выражает минимальный размер водосбора, при котором наблюдениями на постах выявляются изменения нормы стока, обусловленные географической зональностью или высотной поясностью климатических факторов.

Корреляционный критерий дает верхнюю границу для водосбора, контролируемого режимным постом, при сохранении связи между гидрологическими характеристиками постов.

Репрезентативный критерий является обязательным условием для размещения гидрологической сети, учитывающей зональные факторы формирования речного стока.

Научная новизна разрабатываемого метода заключается в использовании и создании для горных и предгорных районов 3D модели рельефа, с помощью которой происходит расчет необходимых величин, входящих в критерии плотности гидрологической сети.

Объектом для апробации разрабатываемого метода является гидрографическая сеть (реки, речные системы) в выбранных предгорных и горных районах России, а

именно: верхнее и нижнее течения реки Обь, реки Северного Кавказа. В перечисленных районах было выбрано следующее число гидрологических постов: Северный Кавказ – 25 постов, нижнее течение р. Оби – 9 постов, верхнее течение р. Оби – 12 постов.

Ряды среднегодовых расходов воды по всем постам были восстановлены с помощью метода гидрологической аналогии, проверены на однородность с помощью критериев Фишера и Стьюдента. Были найдены основные статистические характеристики, которые в дальнейшем понадобились для проведения исследования, а именно: средние значения коэффициента вариации и модуля стока.

Гидрологические ряды по водосборам нижнего течения р. Оби не удалось восстановить из-за большого количества пропусков, и данная территория в дальнейшем не рассматривалась.

Результаты и выводы

Первое, что необходимо было сделать для определения водосборной области и ее характеристик, это найти цифровые модели рельефа выбранных участков. Такие модели были найдены с помощью информационного источника [3]. Цифровая модель рельефа (ЦМР) – это трехмерное отображение земной поверхности, которое представляет собой поле точек с присвоенными значениями высоты. ЦМР учитывает высоту истинного рельефа без учета растительности, городских агломераций и других антропогенных объектов.

С помощью программы *ArcGIS* были созданы карты водосборов для выбранных областей, определены центры водосборов, а также методом Кригинга были построены карты с изолиниями модуля стока и коэффициента вариации. Для примера на Рис. 1 показана 3D модель распределения модуля стока для верхнего течения р. Оби.

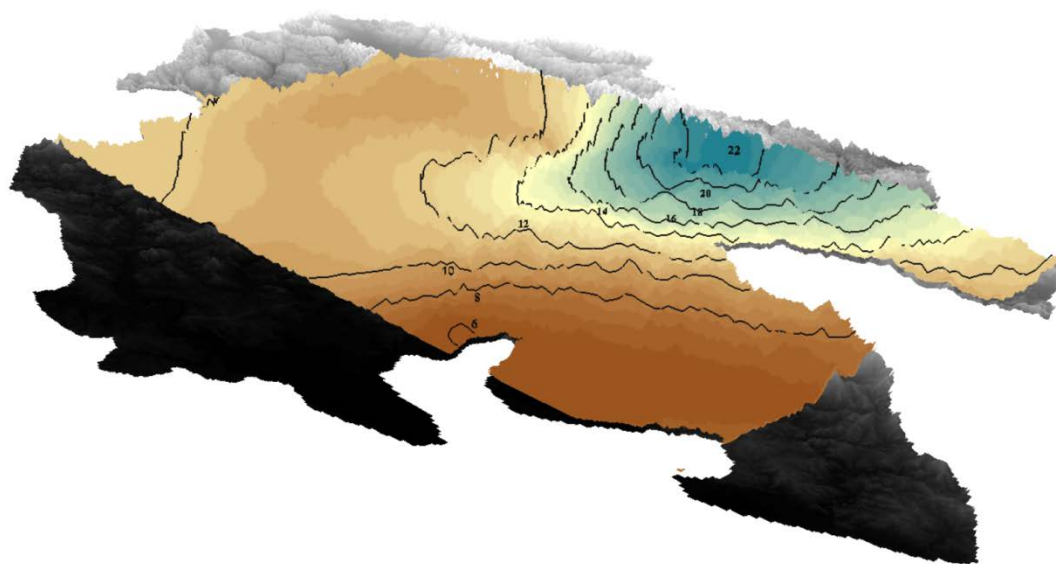


Рис. 1 3D модель распределения модуля стока для верхнего течения р. Оби.

Для расчета критериев плотности сети необходимо также найти расстояние между центрами водосборов.

Ниже, для примера, представлена таблица расстояний по 2D и 3D моделям рельефа (Табл. 1). Как можно заметить, при небольших расстояниях разность между двумя подходами достигает 0,2 км (участок № 11), а при увеличении расстояния разность может достигать 20 км (участок № 10). Данные расчеты показывают существенные различия при использовании 2D и 3D моделей рельефа.

Табл. 1 Расстояния между центрами водосборов верхнего течения р. Оби при использовании 2D и 3D моделей.

№	Расстояние 3D, км	Расстояние 2D, км
1	47,0	45,4
2	77,0	75,9
3	220	210
4	39,2	38,7
5	192	183
6	200	192
7	172	170
8	172	163
9	46,4	45,2
10	307	290
11	7,92	7,79

2D модели не учитывают неровности рельефа, что наглядно показано на Рис. 2.

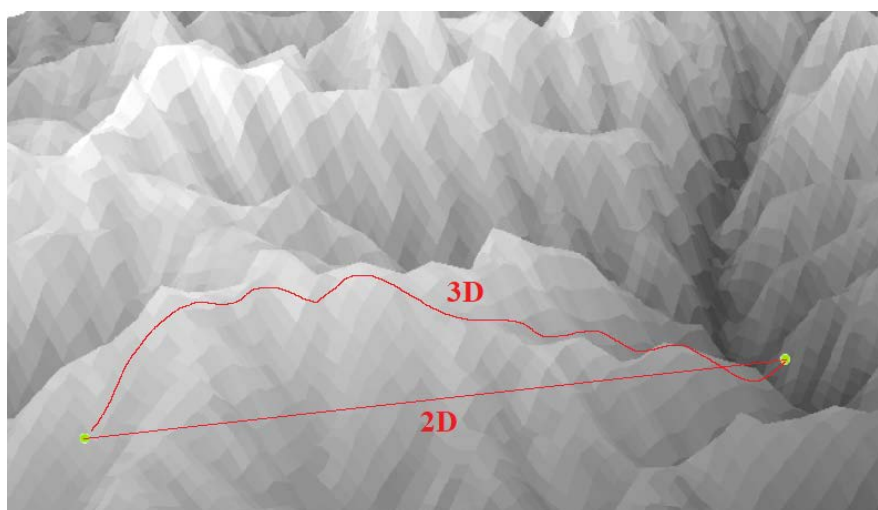


Рис. 2 Пример определения 2D и 3D расстояний.

После проведения необходимых расчетов по методу ГГИ получено, что оптимальное число гидрологических постов для верхнего течения р. Оби должно стремиться к 24 (Табл. 2). Современное число постов, действующих, в том числе и на притоках рек Бия и Катунь, равняется 20. Это говорит о небольшой недостаточности режимных постов и необходимости открытия дополнительных пунктов наблюдений.

Аналогично получено, что для территории Северного Кавказа оптимальное число режимных постов должно достигать 34 (Табл. 2), но на данный момент современное число постов, действующих на реках Северного Кавказа, значительно больше оптимальной численности, что дает наиболее полную картину, отражающую гидрологический режим рек предгорных и горных районов Кавказа.

С учетом новых рассчитанных расстояний по 3D модели были пересчитаны корреляционные критерии для верхнего течения р. Оби и Северного Кавказа (Табл. 2), так как именно этот критерий напрямую связан с расстоянием между центрами водосбора. А также были определены градиенты стока по 3D модели с учетом высотной поясности районов.

Табл. 2 Результаты расчетов оптимального числа постов для верхнего течения р. Оби и водосборов рек Северного Кавказа по 2D и 3D моделям.

2D модель		3D модель	
Верхнее течение р. Оби			
$F_{\text{град}}, \text{км}^2$	4481	$F_{\text{град}}, \text{км}^2$	5535
$F_{\text{корел}}, \text{км}^2$	562	$F_{\text{корел}}, \text{км}^2$	178
$F_{\text{репр}}, \text{км}^2$	1700	$F_{\text{репр}}, \text{км}^2$	1700
$F_{\text{опт}}, \text{км}^2$	4500	$F_{\text{опт}}, \text{км}^2$	5550
$N_{\text{опт}}$	24	$N_{\text{опт}}$	19
Водосборы рек Северного Кавказа			
$F_{\text{град}}, \text{км}^2$	506	$F_{\text{град}}, \text{км}^2$	2106
$F_{\text{корел}}, \text{км}^2$	132	$F_{\text{корел}}, \text{км}^2$	499
$F_{\text{репр}}, \text{км}^2$	1850	$F_{\text{репр}}, \text{км}^2$	1850
$F_{\text{опт}}, \text{км}^2$	1900	$F_{\text{опт}}, \text{км}^2$	2150
$N_{\text{опт}}$	34	$N_{\text{опт}}$	30

Можно отметить, что корреляционный критерий, рассчитанный по 3D модели, существенно уменьшается, так как расстояния между центрами водосборов на этой модели имеют большие значения.

Градиентный критерий наоборот увеличивается. Это связано с тем, что градиентное значение модуля стока рассчитывается также с учетом неровностей рельефа и, главное, с учетом высотной поясности.

Так как меняется градиентный критерий, то согласно именно ему, подбирается оптимальная площадь водосбора, которая должна быть немного больше. Следовательно, меняется и число постов, приходящихся на водосбор. Таким образом, число постов с 24 уменьшается до 19.

Аналогичная ситуация наблюдается и на водосборах рек Северного Кавказа. Оптимальное число постов с 34 уменьшается до 30, что является меньшим значением, чем численность действующих постов в настоящее время.

Подводя итоги данного исследования, стоит отметить, что на территории Северного Кавказа наблюдается избыточная численность гидрологических пунктов наблюдений, что говорит о возможности перехода на автоматические гидрологические посты, которых на выбранных участках нет согласно обзору состояния системы гидрологических наблюдений от ГГИ [1].

На территории верхнего течения р. Оби при расчете традиционным подходом ГГИ наблюдается недостаточность гидрологической сети в 4 поста, а по расчету с использованием 3D модели рельефа наблюдается незначительный избыток гидрологических постов.

Апробация разработанной методики определения оптимальной численности гидрологической сети в горных и предгорных районах с построением цифровых двойников водосборов показала значимость учета особенностей рассматриваемых территорий, связанных с высотной поясностью. Планируется подключение элементов в методику, отвечающих за возможные изменения климата [4].

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РЦНИ, грант № 20-55-05006\21.

Acknowledgments

The work was supported by the Russian Center for Scientific Information, grant № 20-55-05006\21.

Список литературы

1. Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение «Государственный Гидрологический Институт» (ФГБУ «ГГИ») Обзор состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2020 году, Росгидромет, 2021 [Электронный ресурс] – URL: [http:// www.hydrology.ru/sites/default/files/Books/obzor_seti_2020.pdf](http://www.hydrology.ru/sites/default/files/Books/obzor_seti_2020.pdf)
2. Карасёв И.Ф. О принципах размещения и перспективах развития гидрологической сети // Труды ГГИ. 1968. Вып. 164. С. 36–68.
3. Earth resources observation science (EROS) Center – USGS EROS Archive [Электронный ресурс] – URL: <https://www.usgs.gov/centers>
4. Гайдукова Е.В., Хаустов В.А. Оптимизация режимной гидрологической сети в условиях изменения климата // Исследовано в России. 2004. Т. 7. С. 1499–1510.

Динамика озер в высокогорье горного массива Таван-Богдо-Ола (Алтай)

Д. А. Ганюшкин

*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург
d.ganyushkin@spbu.ru*

Аннотация. На основе анализа дистанционных данных, дополненных полевыми наблюдениями, рассмотрено изменение площади и количества озер за период с 2010 г. по 2020 г. в высокогорной зоне массива (в пределах зоны бывшего распространения ледников в период максимума малого ледникового периода). Выявленный 41% рост площади озер при увеличении доли приледниковых озер связывается с ускоренным сокращением ледников и их повышенным таянием.

Ключевые слова: высокогорные озера, динамика, сокращение ледников, приледниковые озера.

Dynamics of lakes in the highlands of the Tavan-Bogdo mountain range (Altai)

D.A. Ganyushkin

*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia
d.ganyushkin@spbu.ru*

Abstract. Based on the analysis of remote data, supplemented by field observations, the change in number and area of lakes for the period from 2010 to 2020 in the high-mountain zone of the massif (within the zone of the former distribution of glaciers during the maximum of the Little Ice Age) is considered. The 41% increase in the area of lakes with an increase in the proportion of near-glacial lakes have been revealed, which is associated with an accelerated reduction of glaciers and their increased melting.

Keywords: high mountain lakes, dynamics, reduction of glaciers, proglacial lakes.

Введение

В последние три десятилетия на фоне глобального сокращения ледников в горных районах имеет место тенденция к появлению новых приледниковых озер [5], растет вероятность опасных явлений, связанных с их прорывом. На Алтае общий тренд к уменьшению ледников проявляется с середины 19 века, когда закончился малый ледниковый период (МЛП), при этом среднее для всего Алтая сокращение площади ледников после максимума МЛП оценивается примерно в 48% [4]. Продолжающееся сокращение ледников в последние десятилетия сопровождается ростом количества озер, что выявлено, например, для периода с 1977 г по 2021 год [3]. Для горного массива Таван-Богдо-Ола сокращение площадей ледников после максимума МЛП составило около 46%, отступление языков крупнейших долинных ледников составило от 1400 до 3700 м [4], после 2010 г. отступление ускорилось. Пояс сокращения ледников массива Таван-Богдо-Ола после максимума МЛП имеет площадь около 161 км² [4]. Это наиболее динамичная зона высокогорья, где в настоящее время имеют место быстрые изменения рельефа, связанные с деградацией ледников, размывом тальми водами морен, развитием термокарстовых процессов. Цель данного исследования - оценка изменений озер,

произошедших в интервале 2010-2020 гг. в пределах указанного выше пояса на территории массива Таван-Богдо-Ола.

Материалы и методы исследования

Основой работы послужил анализ космических снимков: Spot 5 от 31 августа 2010 г., пространственное разрешение 2,5 м и Sentinel 2 от 17 июля 2020 г, пространственное разрешение 10 м, комбинация каналов «естественные цвета» (432), результаты ранее произведенной оценки площадей ледников массива на максимум МЛП, 2010 и 2020 гг. и данные о сокращении долинных ледников северного склона массива, а также повторные фотографии и GPS привязки озер северного склона массива, полученные по результатам полевых наблюдений за 2009, 2015 и 2021 гг. Дешифрирование озер производилось в ручном режиме. Выделенные озера по морфологии были отнесены к 3 типам: термокарстовые, приледниковые и моренно-подпрудные, представляющие собой следующую фазу развития приледниковых озер при потере ими контакта с отступающими ледниками.

Объектом исследования является горный массив Таван-Богдо-Ола (главная вершина г. Кийтын, 4374 м н.у.м., 87° 49' в.д. и 49° 09' с.ш.), являющийся одним из главных ледниковых центров Алтая. Ближайшая к массиву метеостанция Бертек (высота 2200 м) функционировала в период с 1959 г. по 1982 г. Согласно данным метеостанции у подножья массива имеют место низкие летние температуры (8,2°C) малое среднегодовое количество осадков (200,6 мм) с летним максимумом увлажнения и морозной малоснежной зимой. В высокогорной части массива, по нашим оценкам, количество осадков составляет от 300-400 мм на востоке до более 850 мм на западе [2].

В работе [2] выявлена высокая степень корреляции между средними летними температурами метеостанций Кош-Агач и Бертек, восстановленный ряд средних летних температур позволяет выделить скачок летних температур в 1998 году, после чего они стабилизировались на высоком уровне (Рис. 1).

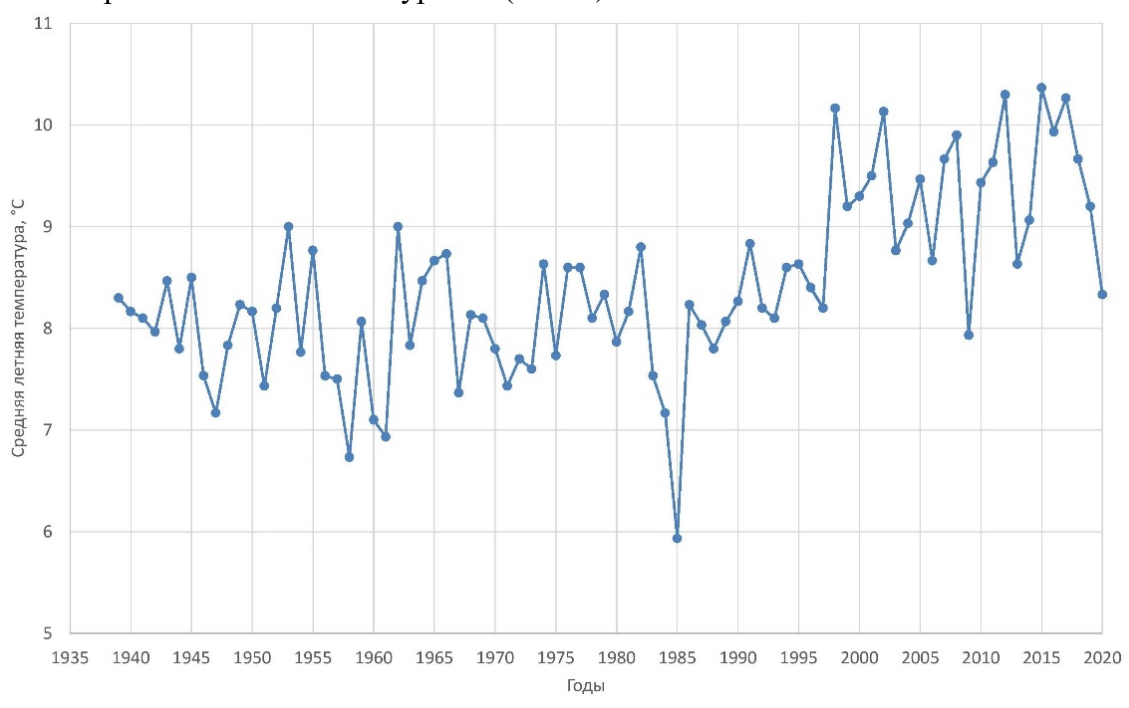


Рис. 1 Восстановленные средние летние температуры для метеостанции Бертек.

В отношении количества осадков наиболее показательной является метеостанция Кара-Тюрек, расположенная к северо-западу от массива, что совпадает с направлением,

откуда приходят основные влагонесущие воздушные массы. По данным этой метеостанции, после 2010 отмечается снижение годовой суммы осадков (Рис. 2).

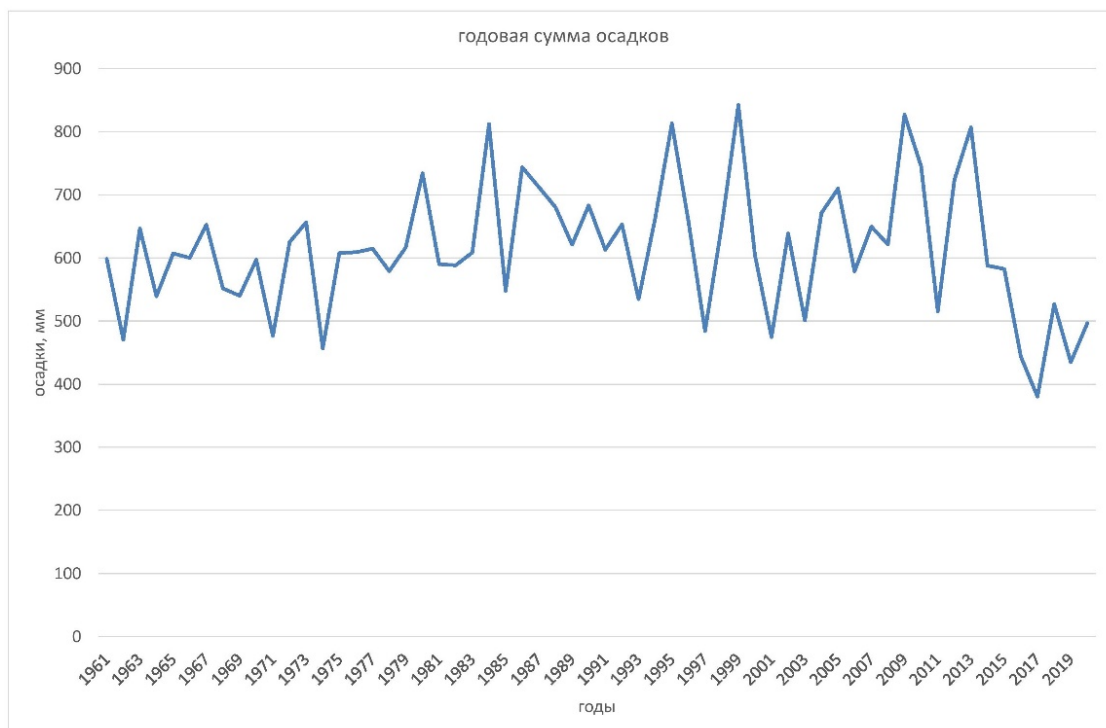


Рис. 2 Годовое количество осадков по данным метеостанции Кара-Тюрек.

Для расчета ледниковой абляции на высоте фирновой границы проводились вычисления средней летней температуры $t(z_{\phi})$ с помощью вертикального температурного градиента γ , высоты метеостанции (z_0) и высоты границы питания. При переходе на ледниковую поверхность учитывается величина температурного скачка Δt . В результате получаем:

$$t(z_{\phi}) = t(z_0) + \gamma(z_{\phi} - z_0) - \Delta t. \quad (1)$$

Абляция определялась по уточненной формуле А.Н. Кренке и В.Г. Ходакова [1]:

$$Ab = 1,33(t(z_{\phi}) + 9,66)^{2,85} \quad (2)$$

Результаты и выводы

Озера по состоянию на 2010 год. На 2010 год было каталогизировано 103 озера суммарной площадью 0,681 км². Из них 25 озер суммарной площадью 0,142 км² относилось к приледниковому типу, 35 озер суммарной площадью 0,503 км² к моренно-подпрудному типу и 43 озера суммарной площадью 0,037 км² к термокарстовому типу. Распределение озер по высоте имело 2 максимума: 2800-2900 м, с максимальной площадью озер в интервале высот 2800-2850 м (наибольшая площадь озер среди всех высотных интервалов), второй максимум имел пик встречаемости озер в интервале 3000-3050 м (наибольшая для всех выделенных озер встречаемость), в отношении суммарных площадей он был более размыт и наблюдался в интервале 2950-3150. По площадям в обоих интервалах максимумов преобладали моренно-подпрудные озера.

Озера по состоянию на 2020 год. По итогам работы было каталогизировано 124 озера суммарной площадью 0,961 км². Таким образом, площадь озер выросла на 0,280, т.е. имело место увеличение площади озер приледниковой зоны на 41%. В период 2010 года возникло 33 новых озера, из них 14- приледниковые, 6- моренно-подпрудные, 13- термокарстовые, суммарная площадь появившихся озер составила 0,074 км², при этом

55% от данной площади приходилась на долю приледниковых озер. Появление моренно-подпрудных озер связано либо с заполнением ранее пустовавших впадин за счет роста ледникового стока, либо с очень интенсивным отступанием ледников, когда за десятилетие образовывалось новое приледниковое озеро, быстро терявшее связь с ледником и переходившее в разряд моренно-подпрудных (Рис. 3).

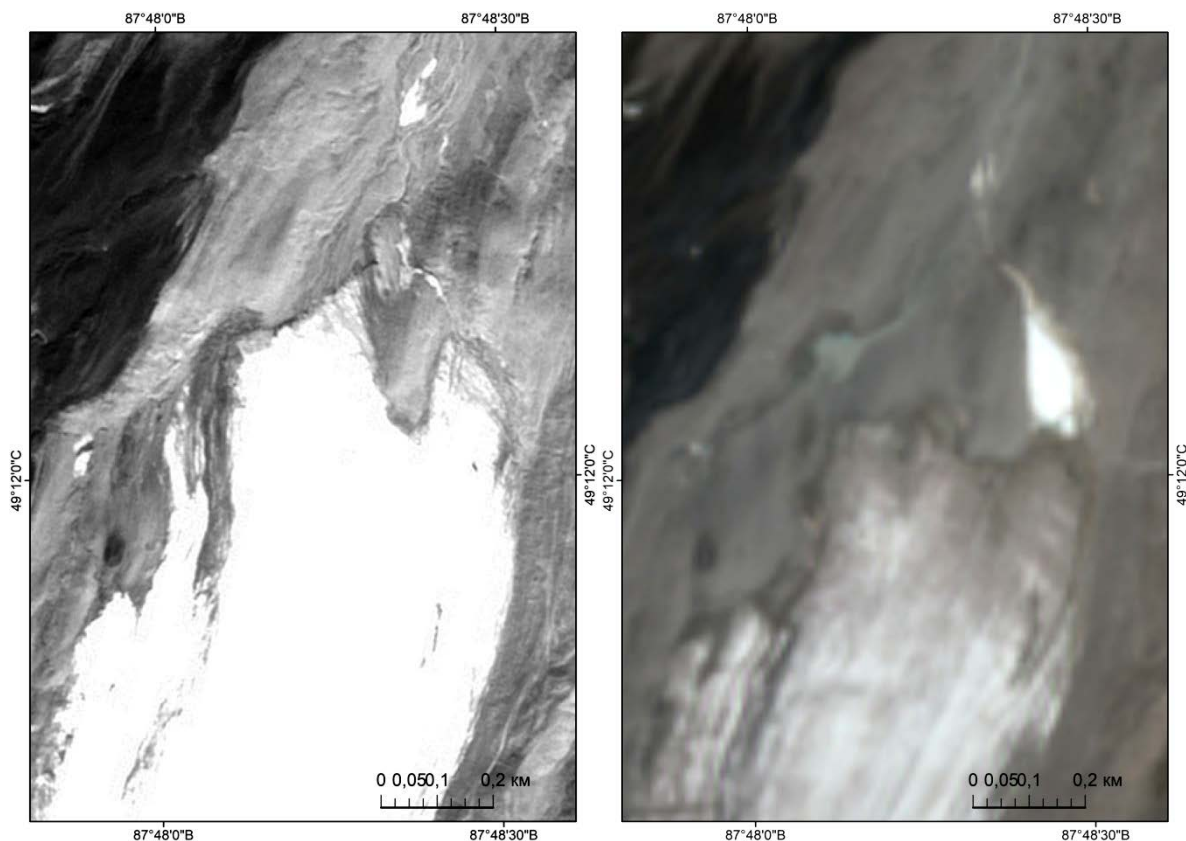


Рис. 3 Формирование приледникового озера при отступании ледника Аргамджи-2 от его позиции в 2010 г. (слева) к его положению в 2020 г. (справа).

Напротив, исчезло 4 озера суммарной площадью 0,001 км², все они относились к термокарстовым. Таким образом, в 2010-2020 гг. шел процесс интенсивного формирования новых озер, что было связано в первую очередь с отступанием ледников. В отношении распределения озер по высоте оба максимума встречаемости и суммарной площади озер сохранились, но по площади озер верхний максимум практически догнал нижний, при этом по площади озер в верхнем максимуме преобладание перешло к приледниковым.

Преимущественно приращение имело место и у площадей озер, существовавших в 2010 году, суммарная их площадь выросла на 30%. Основные механизмы роста озер: увеличение озерной котловины за счет отступления ледников (Рис. 4), расширение термокарстовых котловин при дальнейшем вытаявании подземных льдов и просадках грунта, заполнение уже существующих котловин за счет роста ледникового стока.

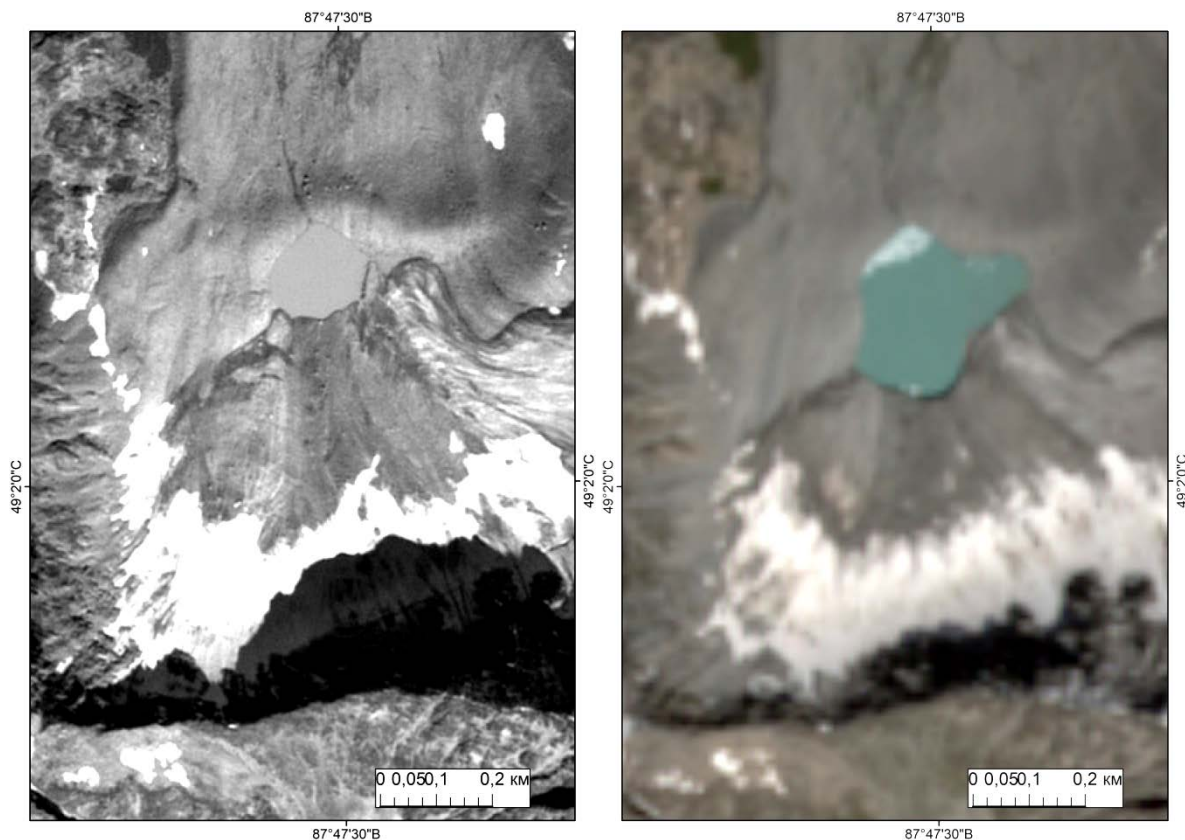


Рис. 4 Рост приледникового озера в бассейне р. Поштых, западный склон массива.

Подтверждением ускорения таяния ледников в последние годы служат данные по сокращению ледников массива Таван-Богдо-Ола. В период с 2010 по 2020 гг. площадь ледников уменьшилась на 8,59 км² [4]. Особенно быстро сокращались долинные ледники. Например, на северном склоне массива язык ледника Аргамджи-2 за период 2009-2021 гг., согласно нашим полевым геодезическим измерениям, отступил на 367 м, ледник Аргамджи-3 за тот же период отступил на 247 м [4]. Расчеты абляции, проведенные для высоты границы питания (3380 м) для ледника Аргамджи-2 (Рис. 5) дают основания говорить о периоде очень высоких значений таяния ледника начиная с 1998 года, причем в 2010-2020 гг. таяние еще увеличилось. Кроме того, анализ спутниковых снимков за период 1977–2021 гг., проведенный в работе [3] для озер Барсово и Гачи-Коль, расположенных на севере массива Таван-Богдо-Ола, выявил для них трансгрессивный режим.

Таким образом, есть все основания считать ускоренное таяние и сокращение ледников основной причиной роста количества и площади озер в приледниковой зоне массива Тван-Богдо-Ола, установленное нами для периода 2010-2020 гг.

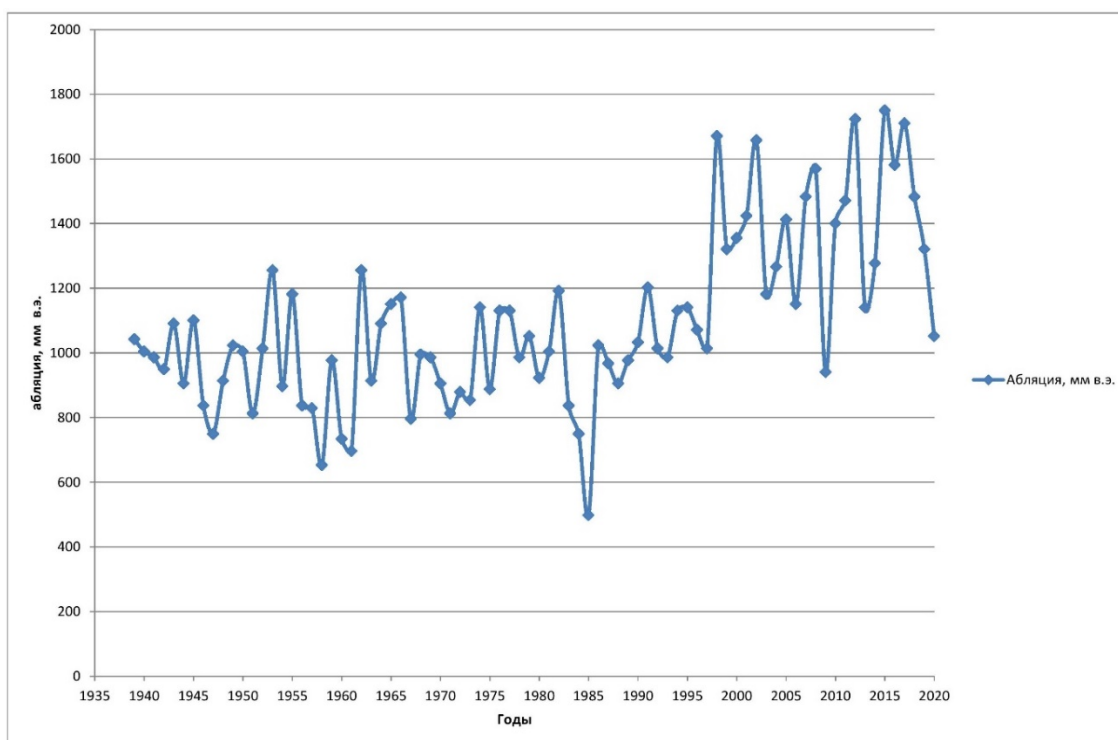


Рис. 5 Результаты расчетов абляции для ледника Аргамджи-2.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект 22-67-00020.

Acknowledgments

The work was supported by Russian Science Foundation, project 22-67-00020.

Список литературы

1. Барбаш В.Р., Бочарова Н.Г., Давидович Н.Е., Кренке А.Н. Расчеты некоторых характеристик таяния и его тепловых ресурсов с помощью ЭВМ // Материалы гляциологических исследований. 1982. № 43. С. 114–119.
2. Ганюшкин Д.А., Чистяков К.В., Волков И.В., Банцев Д.В., Кунаева Е.П., Харламова Н.Ф. Новейшие данные об оледенении северного склона массива Таван-Богдо-Ола (Алтай). *Лёд и Снег*. 2017;57(3):307-325. DOI: [10.15356/2076-6734-2017-3-307-325](https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-307-325)
3. Особенности уровня режима приледниковых моренно-подпрудных озёр в стадии роста (на примере озёр горного массива Таван-Богдо-Ола, Юго-Восточный Алтай) / В. А. Распутина, Г. В. Пряхина, Д. А. Ганюшкин [и др.] // *Лёд и снег*. – 2022. – Т. 62, № 3. – С. 441-454. – DOI 10.31857/S2076673422030143.
4. Ganyushkin, D.; Chistyakov, K.; Derkach, E.; Bantcev, D.; Kunaeva, E.; Terekhov, A.; Rasputina, V. Glacier Recession in the Altai Mountains after the LIA Maximum. *Remote Sens.* 2022, 14, 1508. <https://doi.org/10.3390/rs14061508>
5. Shugar D.H., Burr A., Haritashya U.K., Kargel J.S., Watson C.S., Kennedy M.C., Bevington A.R., Betts R.A., Harrison S., Strattman K. Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990 // *Nature climate change*. – 2020. – Vol. 10. – P. 939-945.

Активизация селей в верховьях бассейна р. Яна в июле 2022 года

Ю.В. Генсировский*, В.А. Лобкина, Л.Е. Музыченко, А.А. Музыченко, М.В. Михалев

*Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Сахалинский филиал,
Южно-Сахалинск, Россия
gensiorovskiy@mail.ru*

Аннотация. В работе приведены сведения о явлении редкой повторяемости: массовой активизации селей 06-07 июля 2022 г. в верховьях бассейна р. Яна, Республика Саха (Якутия), Верхоянский хребет.

Ключевые слова: Яна, Верхоянский хребет, ливневые осадки, сели многолетнемерзлые породы.

Activation of mudflows in the upper reaches of the Yana River basin in July 2022

Yu.V. Gensiorovskiy, V.A. Lobkina, L.E. Muzychenko, A.A. Muzychenko, M.V. Mikhalev

*Far East Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Sakhalin Branch, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
gensiorovskiy@mail.ru*

Abstract. The article provides information about the phenomenon of rare recurrence: mass activation of mudflows on July 06-07, 2022, in the upper reaches of the Yana River basin, Republic of Sakha (Yakutia), Verkhoyansky Ridge.

Keywords: Yana, Verkhoyansky ridge, heavy rainfall, mudslides, permafrost.

Введение

Рассматриваемая нами территория расположена на северо-восточном макросклоне Верхоянского хребта в Республике Саха (Якутия), в бассейне р. Аркачаан (бассейн р. Яна), в высотном интервале от 800 до 1500 м.

Изученность селевых процессов в горной части бассейна р. Яна и ее притоков, крайне слабая. Не смотря на, отнесение Верхоянского хребта к селеопасным районам, описание селей редко встречается в специальной литературе, обычно это описание единичных селевых потоков [1; 2; 3]. Это связано в первую очередь с удаленностью и труднодоступностью региона, а также малой его заселенностью. Регулярных наблюдений за селями на территории никогда не проводилось.

Фиксация массовой активизации селевых процессов, в июле 2022 г., является редкой возможностью оценить масштаб селевой опасности данной территории и дополнить имеющиеся материалы натурными характеристиками селевых потоков.

Материалы и методы исследования

Работы по изучению селевых бассейнов, проводились июле-августе 2022 г. и включали в себя маршрутные обследования долин ряда притоков р. Аркачаан. Площадь обследованной территории составила около 40 км².

Общие принципы полевых исследований селевых потоков изложены в методической и научной литературе [3; 4].

Климат резко-континентальный, с продолжительной холодной зимой и коротким нежарким летом.

Температуры воздуха резко колеблются как между сезонами, так и в пределах суток. Разность температур самого холодного и самого теплого месяцев достигает 58-62°C. Средняя температура января -35.8°C, июля +13.3°C, среднегодовая температура – 12.4°C. Среднегодовое количество осадков находится на уровне 250-300 мм, из которых 60% выпадает в жидком виде в летний период. Количество дней с устойчивым снежным покровом порядка 230, его средняя мощность составляет 35-40 см [6].

Климатические условия, в частности, характеристики атмосферных осадков, резко различаются от точки к точке даже на небольшом удалении. Они определяются конфигурацией долинной сети, а также гипсометрическим положением метеорологической станции, другими локальными факторами.

Геологическое строение исследуемого района (с точки зрения условий, благоприятных для развития селевых процессов) характеризуется наличием большого количества четвертичного гляцио-флювиального и моренного материала, интенсивными процессами морозного выветривания пород, образованием осыпей [5]. Наличие многолетнемерзлых пород (ММП), создающих водоупорные горизонты на склонах и увеличивающих скорость стока со склонов, приводит к формированию потенциальных селевых массивов (ПСМ), находящихся в состоянии неустойчивого равновесия.

Таким образом, при выпадении ливневых осадков на поверхность ПСМ, при максимальной оттайке СТС, в формирование селей поступает дополнительный объем влаги, зачастую являющийся триггером к активизации селевого процесса, как непосредственно на рассматриваемой площади, так и в целом в зоне развития ММП.

Водосборные площади водотоков имеют низкогорный рельеф (абс. отметки достигают 1500 м, перепад высот 400 м на 1 км); крутизна склонов в среднем составляет 25-35°, а местами превышает 45°.

Половодье, а особенно паводки в горной части бассейнов рек исследуемого района, характеризуются резким подъемом уровня стояния вод и почти мгновенным увеличением расхода воды. Такой резкий подъем уровней воды при высоких скоростях потока приводит к переходу потенциальных селевых массивов в состояние селевого потока. При этом в селевой процесс активно вовлекаются породы размываемых селевых отложений из селевого русла, а также вовлечение твердой составляющей курумников и осыпей с бортов долин (Рис. 1а,б).

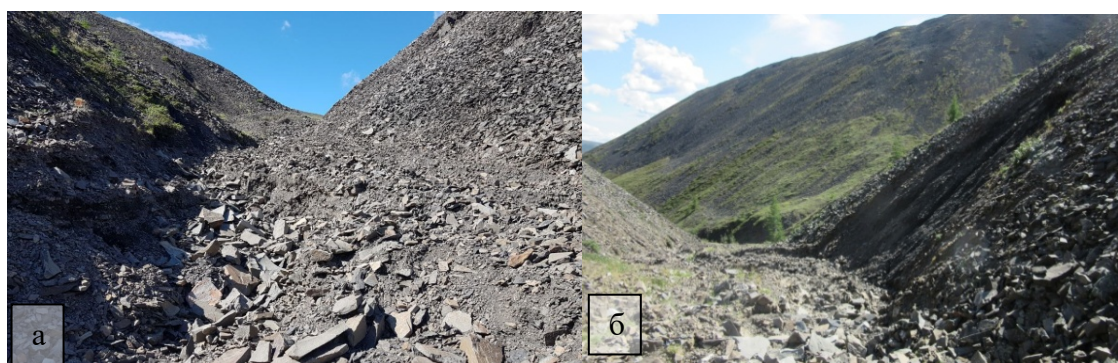


Рис. 1. Селевые очаги в верховьях притоков р. Аркачаан.

Данные по атмосферным осадкам, выпавшим 06 – 07.07.2022 г., приведены по ближайшей метеостанции – Себян-Кюель, 770 м (<https://tr5.ru/>).

При полевых работах был установлен факт массовой активизации селей, который затронул северо-восточный склон Верхоянского хребта. Период формирования можно датировать 06.07 – 07.07.2022 г.

Количество выпавших за двое суток осадков составило 169 мм, а суточный максимум пришелся на 6 июля, когда к 21 часу выпало 106 мм осадков (ГМС Себян-

Кюель, <https://rp5.ru/>). Станция имеет непродолжительный ряд наблюдений (открыта в 2010 г.) За этот период наблюдений осадков такой интенсивности отмечено не было. Непосредственно в горах интенсивность и количество выпавших осадков были видимо больше. Данное проявление селевой активности, можно отнести к явлениям редкой повторяемости, что подтверждается натурными данными. Селевыми процессами были затронуты участки долин водотоков, где произрастали деревья возрастом более 200 лет (подсчет годовых колец по спилу лиственницы поврежденной селом).

Результаты и выводы

Полевыми работами был установлен факт массовой активизации селей в июле 2022 г. Активизация была вызвана интенсивным выпадением осадков, за сутки 6 июля 2022 г., выпало 106 мм жидких осадков, что вызвало сход селевых потоков. По большинству горных участков рек района и их притокам прошли наносоводные сели и селевые паводки.

По полевым оценкам на отдельных участка речных долин скорости потока превышали 5-6 м/с, по руслу перемещались валуны до 1,5 м в диаметре, при сравнительно небольших уклонах (Рис. 2б). В процесс были вовлечены и вырванные деревья, что насыщало водокаменную массу карчами (Рис. 2а, Рис. 3в).



Рис. 2 а) конус выноса наносоводного потока, насыщенный карчами; б) валун песчаника, перемещенный селевым потоком.

Высшие селевые горизонты (ВСГ) достигали 2,5 м над руслом. На небольших водотоках, в районе селевых очагов, первоначально формировались грязекаменные сели, с малыми пробегами и скоростями, далее при поступлении все больших объемов влаги они переходили в несвязную фазу и к впадению в русло главного водотока уже выходили наносоводные сели. Это подтверждается и ленточным характером отложений, их прерывистостью в зонах транзита, отсутствием четких «обмазок» на древесной растительности в прирусловой части долин. Объемы таких селей колеблются в пределах 100 – 5000 м³, в зависимости от водотока, где они сформировались.

Селевые отложения на небольших селевых водотоках представлены щебнем, дрсевой с включением глыб, заполнитель в основном супесчаный. В руслах крупных водотоков отложения выполнены гравийно-галечные с включением валунов, заполнитель супесчаный. Суммарная мощность селевых отложений (по данным полевых инженерно-геологических работ в районе исследований) колеблется от 0,5 до 3,0 м.

Особенностью селеформирования в рассматриваемом районе является расположение очагов зарождения селей. Выположенность водоразделов, привела к тому, что формирование селей в большинстве случаев начинается не в наиболее возвышенной части селевых бассейнов, а несколько ниже, на тех участках, где склоны ледниковых долин приобретают явно выраженную трапецеидальную форму. На них появляются участки, значительная площадь которых покрыта осыпями, курумниками, солифлюкционными шлейфами, которые вносят дополнительный материал в русла

водотоков. На таких участках долин, в отметках 800-1200 м и отмечены очаги зарождения селей.

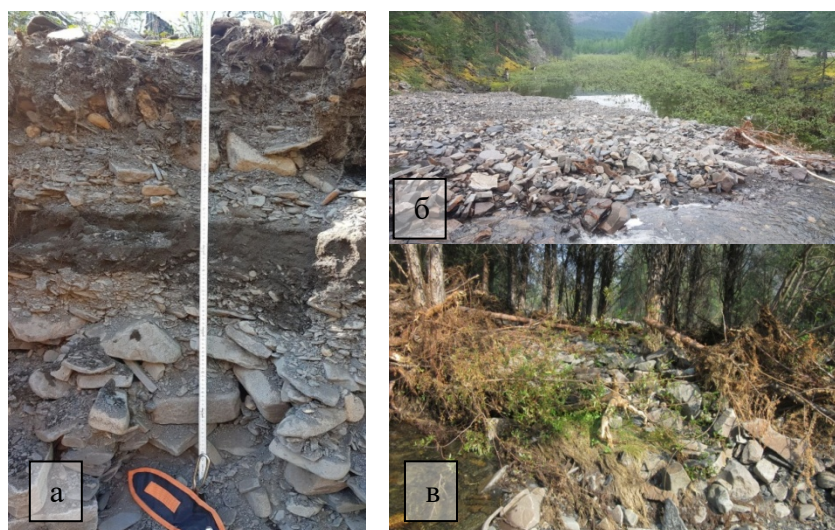


Рис. 3 а) пачка разновозрастных селевых отложений, мощностью до 2,0 м; б) конус выноса селевого потока, прошедшего по одному из притоков р. Аркачаан; в) отложения наносоводного потока, насыщенные карчами.

Склоны селевых бассейнов покрыты осыпями и курумниками, распространены моренные отложения с песчаным заполнителем. В руслах имеется большое количество осыпного материала. Все эти отложения формируют потенциальные селевые массивы.

В условиях распространения ММП, на активизацию селевых процессов оказывает влияние и объем влаги находящийся в сезонно-талом слое (СТС). Причем эта влага может оказать существенное влияние на объемы формирующихся селей в период наибольшего отепления СТС.

Таким образом, на рассматриваемой территории, как и на большинстве территорий Заполярья и Приполярья, формирование селевых потоков возможно в два периода: раннелетний и летний-раннеосенний [1].

Повторяемость селей на небольших селевых водотоках можно оценить – 1 раз в 5-10 лет.

Повторяемость селей (селевых паводков) большого объема – 1 раз в 100–200 лет (периодичность может варьировать с учетом изменений климата).

Наиболее селеопасный период: июль – август.

На территории исследования выделяются 2 генетических типа селей: дождевой и снеговой, с преобладанием дождевого.

Структурно-реологические типы селей. С учетом полевых работ в районе отмечены, как связанные селевые потоки, несвязные селевые потоки, при определенных условиях, вероятно возникновение водоснежных потоков.

Связные сели формируются в верхней части селевых бассейнов, их пробег не превышает 0,1 – 0,2 км. Несвязные селевые потоки проходят по руслам ручьев с выходом в главную реку - 0,3 и более километров.

По данным полевых работ можно говорить о том, что максимальные объемы несвязных селей, отмеченные в пределах исследуемой территории, составляют 100 - 10 000 м³. Объемы выноса материала селевыми паводками превышают 100 000 м³.

Список литературы

1. Генсиоровский Ю.В., Лобкина В.А., Музыченко Л.Е., Музыченко А.А., Михалев М.В., Степнова Ю.А. Условия формирования селей на Северо-Востоке России. Геориск Том XIV, № 3/2020 с. 68-76.
2. Лобкина В.А., Генсиоровский Ю.В., Михалев М.В. Характеристики селей формирующихся в районах распространения многолетнемерзлых пород / Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 477–481.
3. Перов В.Ф. Селеведение. Учебное пособие. М., Географический факультет МГУ. 2012 г
4. РД 52.30.238-89 Руководство селестоковым станциям и гидрографическим партиям.
5. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Издание второе. Серия Верхоянская. Лист Q-52-XXIII, XXIV (Эндыбал). Объяснительная записка [Электронный ресурс] / М. Н. Соловьев, А. И. Некрасов, Я. А. Радудевич; Минприроды России, Роснедра, Госгеолком РС(Я), ОАО «Янгеология». – Электрон. текстовые дан. – М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2020. – 1
6. <https://rp5.ru/>.

Анализ и прогноз высших заторных уровней воды на реке Печора в створе с. Усть-Цильма

Н.И. Горошкова*, А.В. Стриженок, Д.А. Семенова

*Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург
goroshnat@yandex.ru*

Аннотация. Для рек Северо-Западного Федерального округа характерны заторы льда, нередко вызывающие наводнения, приводящие к затоплению населенных пунктов, промышленных объектов и колоссальным материальным ущербам. Риск затопления подвержены и обширные территории, относящиеся к бассейну реки Печора. Ключевой проблемой, влияющей на социальную и экономическую стабильность любой страны, является готовность её структур к борьбе с различными опасными природными явлениями. Важную роль в этом процессе играют мониторинг и прогнозирование опасных явлений, а также меры, необходимые для их предотвращения. Поэтому разработка актуализированной прогнозной методики в рассматриваемом речном бассейне представляет научный и практический интерес.

Ключевые слова: ледовые явления, заторы льда, замерзание, многолетние ряды, бассейн Печоры, прогнозная методика.

Analysis and forecast of the highest jam water levels at the Pechora River – village Ust-Tsilma

N.I. Goroshkova*, A.V. Strizhenok, D.A. Semenova

*State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia
goroshnat@yandex.ru*

Abstract. Ice jams are often observed on the rivers of the Northwestern Federal District, which often cause flooding, leading to flooding of settlements, industrial facilities and colossal material damage. Extensive territories belonging to the Pechora River basin are also at risk of flooding. The key problem affecting the social and economic stability of any country is the readiness of its structures to combat various natural hazards. Monitoring and forecasting of dangerous phenomena, as well as measures necessary to prevent them, play an important role in this process. Therefore, the development of an updated forecasting methodology for this river basin is of scientific and practical interest.

Keywords: ice phenomena, ice jam, freezing, long-term series, Pechora basin, forecast methodology.

Введение

Континентальный климат России приводит к образованию льда на реках, водохранилищах и озерах зимой и разрушению его весной. Многие процессы и явления, связанные с формированием и разрушением ледяного покрова, могут привести к опасным последствиям для населения и хозяйственных объектов, расположенных в непосредственной близости от водных объектов. Весной, при возрастающей водности рек, заторы льда ограничивают водопрпускную способность русла и вызывают быстрый рост уровня воды, в результате которого могут быть затоплены здания, дороги

и сельхозугодья. На берегах и поймах образуются гигантские ледяные валы, способные повредить и даже разрушить, находящиеся здесь сооружения. Теоретической базой для разработки методик прогноза высших заторных уровней воды стали исследования российских и зарубежных ученых. Научная новизна предлагаемой методики прогнозирования высших заторных уровней на реке Печора в створе с. Усть-Цильма заключается в уточнении вкладов затороформирующих факторов, что позволяет более надежно прогнозировать значения рассматриваемой характеристики, по сравнению с существующими методиками. В цели исследований входило также сократить число физически обоснованных предикторов прогнозного уравнения, не ухудшая качество прогноза.

Материалы и методы исследования

В качестве базы при разработке предлагаемой методики была использована методика прогноза высших заторных уровней на реке Печора в створе с. Усть-Цильма В.А. Бузина, которая уточнялась путем изменения числа предикторов и их вкладов в прогнозное уравнение [2, 3].

При разработке методик прогноза высших заторных уровней воды для затороопасных участков реки Печора использована зарегистрированная база данных [4], включающая в себя сведения о многолетних данных по высшим уровням воды, датам начала и конца ледостава и ледовых явлений, высшим уровням воды за ледоход, максимальной толщине льда. Также были исследованы сведения о прошедших заторах (значения высших заторных уровней и продолжительности заторов).

Прогностические зависимости устанавливались по срочным значениям заторных максимумов, которые в случае их отсутствия определялись по связи срочных и среднесуточных значений. Беззаторным вскрытиям соответствуют наибольшим за период весенних ледовых явлений высшие уровни густого ледохода. Если исходить из требований однородности происхождения уровней, то такой подход не совсем правомерен, однако с практической точки зрения полностью оправдан: для потребителя прогностической информации важно не происхождение уровня, а его высота [1, 2].

Основными факторами для прогноза высшего заторного уровня для створа с. Усть-Цильма, согласно методике В.А. Бузина, являлись:

- максимальный уровень в начале ледостава в с. Усть-Цильма ($H_{\text{макс.лдст}}$);
- максимальная толщина ледяного покрова в с. Усть-Цильма ($h_{\text{л}}$);
- уровень на первый день после окончания ледовых явлений на р. Ижме – д. Картайоль (дата выпуска прогноза) ($H_{\text{макс.И.К}}$);
- уровень на дату выпуска прогноза на р. Печоре – д. Мутный Материк ($H_{\text{двп.М.М}}$);
- уровень на дату выпуска прогноза на р. Печоре – д. Усть-Цильма.

Ниже приведена прогнозная зависимость, установленная для участка реки Печоры у села Усть-Цильма:

$$H_3 = -0,04H_{\text{макс.лдст}} + 3,69h_{\text{макс}} + 0,56H_{\text{макс.И.К}} + 0,30H_{\text{двп.М.М}} + H_{\text{двп.У-Ц}} + 152 \quad (1)$$

Оправдываемость прогнозов по уравнению (1) составила 62%, что является удовлетворительным показателем для краткосрочного прогноза. Заблаговременность прогноза в среднем 8–9 дней.

Предлагаемая методика

Для улучшения качества прогноза предложено изменить предикторы в прогнозном уравнении.

Верхний (информационный) гидрологический пост выбирается с учетом необходимой точности и достаточной заблаговременности прогноза (обычно на расстоянии 100–300 км от створа, для которого дается прогноз). Средняя

заблаговременность прогноза высшего заторного уровня (Нз) зависит от скорости продвижения кромки ледяного покрова. Для р. Печоры она составляет 9–11 суток.

Основными факторами для прогноза высшего заторного уровня для створа р. Печора – с. Усть-Цильма были выбраны:

- высший уровень в начале ледостава в с. Усть-Цильма ($H_{\text{макс.лдст}}$);
- максимальная толщина ледяного покрова в с. Усть-Цильма ($h_{\text{л}}$);
- уровень на подъёме половодья на р. Ижме – с. Ижма (дата выпуска прогноза ДВП) (НИ.И.);
- уровень на дату выпуска прогноза на р. Печоре – д. Мутный Материк ($H_{\text{двп М.М}}$);

Заблаговременность прогноза с использованием данных предикторов составит от 8 до 15 дней.

Прогнозные зависимости устанавливались, учитывая изменения климатических характеристик, начиная с 1980 года [6]. Было принято решение использовать ряд исходных данных до 2014 года. Оставшиеся 6 лет оставлены для оценки качества прогноза на независимом материале.

В ходе регрессионного анализа получено уравнение (2) для прогноза высших заторных уровней для р. Печора в створе села Усть-Цильма.

$$H_{\text{зт}} = 0,30H_{\text{макс.лдст}} + 4,78h_{\text{льда}} + 1,26H_{\text{и.и.}} + 0,22H_{\text{двп м.м.}} - 211,2 \quad (2)$$

Как видно на Рис. 1 прогнозное уравнение (2) достаточно хорошо соответствует наблюдаемым данным. После 1995 года уже можно сказать, что уравнение подстроилось под систему и отклонения от фактических данных минимальны.

Так как по методу ГМЦ методика является эффективной, решено проверить прогностическое уравнение на оставшихся 6 годах, с 2015 по 2020 гг. (Рис. 2).

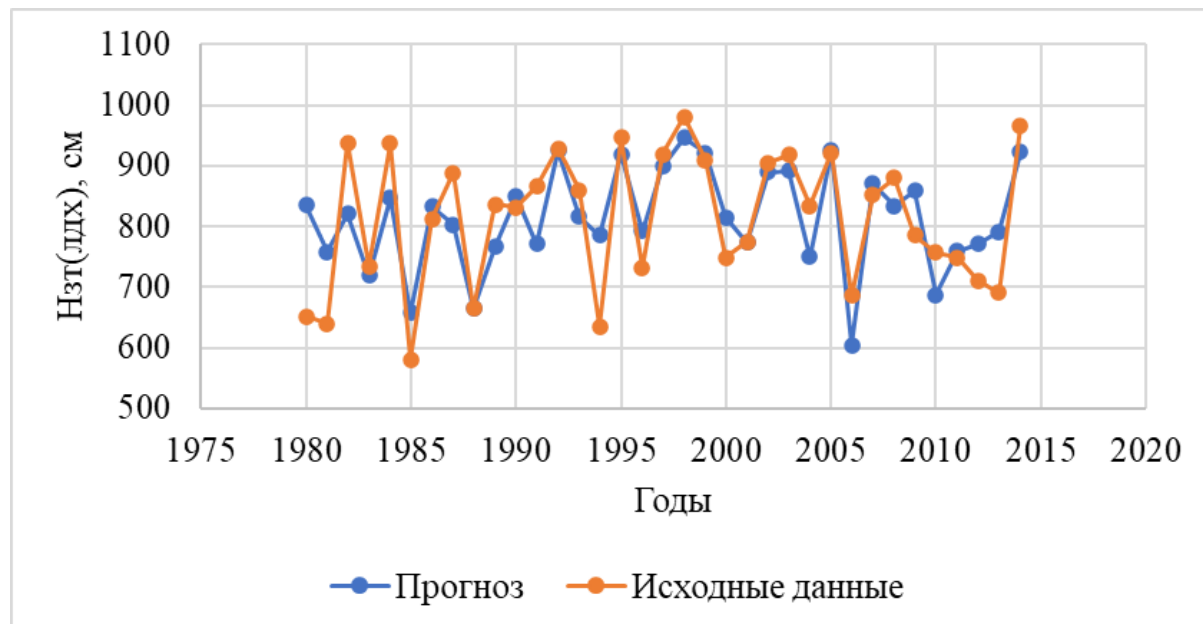


Рис. 1 График хода высших заторных уровней, полученных с помощью прогнозного уравнения и наблюдаемых значений.



Рис. 2 График хода прогнозных и фактических значений высших заторных уровней.

Результаты и выводы

Погрешность прогнозных значений высших заторных (ледоходных) уровней, полученных с помощью предложенного уравнения, не превышает 15 процентов (Табл.).

Табл. Сравнение наблюдаемых данных и значений, полученных по регрессионному уравнению.

Год	Исходные данные	Прогноз	Погрешность, %
2015	859	775	9,8
2016	833	876	-5,1
2017	690	782	-13,3
2018	690	760	-10,1
2019	921	968	-5,1
2020	939	1068	-13,7

Оправдываемость прогнозов по уравнению 2 составила 78%, что позволяет сделать вывод об улучшении методики В. А. Бузина и возможности более надежно прогнозировать высшие заторные уровни воды.

Удовлетворительное качество прогноза высших заторных уровней и достаточная его заблаговременность позволит местной администрации и МЧС принять своевременные меры по ликвидации затора и тем самым уменьшению ущерба от результатов этого опасного гидрологического явления.

Однако стоит отметить, что период равный 6 годам недостаточно продолжителен для полноценной оценки результатов апробации предлагаемой методики.

Список литературы

1. Бузин, В.А. Затопы льда и затопные наводнения на реках. - Л.: Гидрометиздат, 2004. - 202 с.
2. Бузин, В.А. Применение теоретической модели затора льда для прогноза максимальных затопных уровней воды рек севера. - №23 изд. - Сборник работ по гидрологии, 1999. - 108–115 с.
3. Бузин, В.А. Факторы образования и прогноз затопов льда на реках севера ЕТР. - №4 изд. - Метеорология и гидрология, 2010. - 63–74 с.
4. Горошкова, Н.И., Стриженок, А.В., Семенова, Д.А. База данных: Многолетние данные по характеристикам ледовых явлений, высшим годовым уровням и низшим уровням воды открытого русла для рек бассейна р. Печора за период с начала наблюдений по 2019 г. включительно. - 2023 г.
5. Каталог затопных и загорных участков рек СССР. - т.1. Европейская часть изд. - Л.: Гидрометиздат, 1978. - 260 с.
6. Лобанов, В.А., Горошкова, Н.И., Стриженок, А.В., Семенова, Д.А. Влияние изменений климата на экстремальные гидрологические характеристики в бассейне реки Печоры // Гидрометеорология и экология. - 2022. - №68. - С. 435–452.

Результаты исследования внутриводоемных процессов Иваньковского водохранилища в различные годы и сезоны

М. Г. Гречушникова^{1,2}, И. Л. Григорьева^{3*}, Д. В. Ломова², Е. Р. Кременецкая²,
А. Б. Комиссаров³, Л. П. Федорова³, В. А. Ломов¹, Е. А. Чекмарева³, Н. Ю.
Панкова³, П. Н. Терский²

¹Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

³Институт водных проблем РАН, Иваньковская научно-исследовательская станция,
Тверская область, г. Конаково, Россия
Irina_Grigorieva@list.ru

Аннотация. Работа обобщает данные комплексных полевых исследований Иваньковского водохранилища за 2020–2023 г. Выявлены изменения гидрохимических характеристик, связанные как с поступлением воды с водосбора выше г. Тверь, так и обусловленные местными причинами (загрязнение воды в летний период в рекреационных зонах, поступление загрязнений с селитебной территории). Впервые проведенный анализ органического углерода ($C_{\text{орг}}$) показал, что его содержание значительно превышает предельные значения для питьевой воды, принятые как в нашей стране, так и за рубежом, что связано с поступлением притока соответствующего состава с его заболоченного водосбора. Продолжительный период жаркой погоды был благоприятен в отношении снижения цветности воды и эмиссии метана с поверхности, активизации деструкционных процессов в донных отложениях.

Ключевые слова: Иваньковское водохранилище, гидрохимический режим, главные ионы, биогенные элементы, тяжелые металлы, общий органический углерод, фитопланктон, зообентос, метан, обменные процессы с дном.

The results of the study of internal processes of the Ivankovskoye reservoir in different years and seasons

M.G. Grechushnikova^{1, 2}, I. L. Grigoryeva^{3*}, D.V. Lomova², E.R. Kremenetskaya²,
A.B. Komissarov³, L.P. Fiodorova³, V.A. Lomov¹, E.A. Chekmareva³, N.U. Pankova³,
P.N. Terskiy²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia

³Water Problems Institute of RAS, Ivankovskaya research station, Tver region, Konakovo, Russia
Irina_Grigorieva@list.ru

Abstract. The work summarizes the data of comprehensive field studies of the Ivankovskoye reservoir in 2020-2023. Changes in hydrochemical characteristics associated both with the inflow of water from the watershed above the city of Tver and due to local causes (water pollution in summer in recreational areas, the inflow of pollution from the residential area) are revealed. The first analysis of Sorg showed that its content significantly exceeds the limit values for drinking water accepted both in our country and abroad, which is due to the inflow of the corresponding composition from its waterlogged catchment. The prolonged period of hot weather was favorable with respect to the reduction of water color and methane emission from the surface, activation of destructive processes in bottom sediments.

Keywords: Ivankovskoye reservoir, hydrochemical regime, main ions, biogenic elements, heavy metals, total organic carbon, phytoplankton, zoobenthos, methane, exchange processes with the bottom sediments.

Введение

Водохранилищам – источникам водоснабжения уделяют пристальное внимание в отношении исследования качества воды и процессов его формирующих. К ним относятся процессы разбавления и перемешивания водных масс, минерализации органического вещества, обмена на границе вода-донные отложения и другие. В зависимости от водности года и гидрометеорологических условий внутриводоемные процессы могут протекать по-разному, что оказывает влияние на состояние водоема. Изучение влияния различных гидрометеорологических условий на гидроэкологическое состояние и особенности внутриводоемных процессов исследовалось авторами в различные годы и сезоны на Иваньковском водохранилище.

Материалы и методы исследования

Комплексные исследования проведены в августе 2020–2022 гг., в мае 2022 и 2023 гг. и в марте 2023 г. В июне 2022 г. выполнена дополнительная гидрохимическая съемка.

Весь комплекс измерений и отбор проб производился на 5 станциях: 1 – с. Городня (Верхневолжский плес), 3 – комплекс отдыха «Дипкорпус» (Шошинский плес), 5 – г. Конаково (Средневолжский плес), 7 – Корчева и 8 – приплотинный участок в районе г. Дубна (Нижневолжский или Иваньковский плес). В створах: 2 – остров Низовка, 4 – Плоски, 6 – устье Мошковичского залива дополнительно производился отбор проб воды и проб на фитопланктон (Рис.). В процессе съемок выполнялись измерения вертикального распределения температуры воды, растворенного кислорода, электропроводности (зонды YSI ProOdo), прозрачность воды измерялась по диску Секки.

Отбор проб воды осуществлялся из поверхностного и придонного горизонта на фарватере и у каждого из берегов по ГОСТ 3161-2012. Химический анализ отобранных проб воды был выполнен в аккредитованной химической лаборатории Иваньковской НИС ИВП РАН (аттестат аккредитации RA.RU.21АН96). Микроэлементный состав (медь, цинк, свинец, хром, никель) определялся на атомно-абсорбционном спектрометре AA-6800F фирмы Shimadzu. Органический (C_{org}) и неорганический углерод определяли с помощью анализатора общего органического углерода ТОС-2000 с 2023 г. Отбор проб и определение фитопланктона и зообентоса производилось по стандартным гидробиологическим методикам [2,4,5]. Удельный поток из воды в атмосферу определялся методом «плавающих камер» [6]. Определение содержания метана в воде производилось методом «headspace» [7]. Определение концентрации метана производилось на газовом хроматографе Хроматэк-Кристалл 5000.2 с пламенно-ионизационным детектором. Содержание органического вещества в грунте оценивалось по потерям веса при прокаливании. Определение потоков веществ на границе «вода – донные отложения (ДО)» производили методом трубок [1; 3; 8; 9]. Потоки вещества определялись по разнице концентраций веществ в грунтовой и холостой трубке. Общая деструкция органического вещества в илах определялась по количеству HSO_3^- , выделяемого колонкой грунта за время экспозиции, а по величине поглощения кислорода колонкой грунта оценивалась аэробная деструкция органического вещества (ОВ) в ДО.

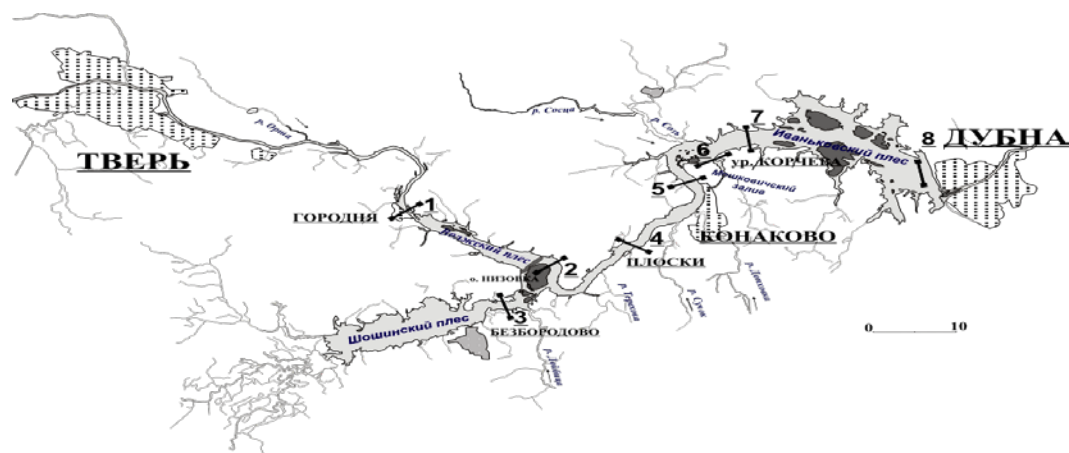


Рис. Схема Иваньковского водохранилища со станциями отбора проб воды, фитопланктона, зообентоса, грунта и измерений эмиссии метана

Результаты и выводы

Комплексные исследования в августе трех последних лет показали, что разные гидрометеорологические условия обуславливают различия в протекании внутриводоемных процессов. Из-за жаркого маловодного лета 2022 г. выявлено увеличение минерализации воды и уменьшение цветности, перманганатной окисляемости, концентраций железа общего и прозрачности воды от мая к августу. Большая проточность водохранилища способствует разбавлению поступающих локальных загрязнений, но, с другой стороны, в значительной степени качество воды на входном створе определяется влиянием г. Тверь. В зимний период изменение параметров качества воды по длине водоема несущественно. В мае наблюдалось значительное различие удельной электропроводности в поверхностном слое воды во входном (Городня) (250 мкСм/см) и в замыкающем створе (Дубна) (167 мкСм/см), поскольку в мае в Иваньковском плесе еще оставались мало минерализованные воды весеннего половодья, а в августе уже преобладали меженные воды. В мае изменение по глубине не наблюдалось, в августе более высокие концентрации отмечались в придонном горизонте. По содержанию минерального фосфора ($P_{мин}$) качество воды водохранилища в мае 2022 г. и 2023 г. и июне 2022 г. можно было отнести к «олиготрофным» (концентрации менее 0.05 мгР/дм³). В августе 2022 г. при отсутствии кислорода у дна концентрации $P_{мин}$ увеличились до 0.10-0.15 мгР/дм³ из-за обменных процессов с ДО, что соответствует статусу водоема «мезотрофный».

Концентрации иона аммония в мае 2022 г. не превышали 0.15 мг/дм³, в июне они были еще ниже и увеличились в августе 2022 г. Концентрации нитрит-иона были наиболее низкими в мае 2022 г. и значительно (до 3 ПДК_{рыб.}) увеличились в августе 2022 г. в районе пляжей, что свидетельствует о свежем фекальном загрязнении. Диапазон изменения концентраций нитрат-иона составил 0.2-3.5 мг/дм³. Наибольшие концентрации наблюдались, как правило, у дна, а низкие на участках интенсивного развития фитопланктона (при его активном потреблении). Содержание нефтепродуктов в мае 2022 г. во всех точках отбора проб воды в поверхностном горизонте было ниже 0.05 мг/дм³ (ПДК_{рыб.}). Небольшое превышение ПДК_{рыб.} отмечалось в июне и августе 2022 г. в поверхностном горизонте на русле и до 2-4 ПДК_{рыб.} на рекреационных участках. Во все периоды наблюдений концентрации хрома в воде были ниже ПДК_{рыб.}, а концентрации меди – выше в 2–40 раз. Наибольшие ее концентрации отмечены в придонном горизонте в марте 2023 г. Известно, что концентрация меди в поверхностных водах имеет сезонные колебания: в зимний период показатели наивысшие, а летом из-за значительного роста биомассы они снижаются.

Впервые проведенные измерения содержания органического углерода ($C_{\text{орг}}$) показали, что значения его концентрации в водохранилище сравнительно высоки из-за притока с заболоченного водосбора. В воде, поступающей в канал имени Москвы, концентрация растворенного $C_{\text{орг}}$ в марте 2023 г. составила 17 мг/л, в мае – 15 мг/л. В международной практике для питьевой воды средние значения органического углерода установлены в пределах от 2 до 4 мг/л. В РФ $C_{\text{орг}}$ является одним из показателей качества бутилированной воды согласно СанПиН 2.1.4.1116А 2002. Для воды высшей категории предельное значение $C_{\text{орг}}$ составляет 5 мг/л, для первой категории — 10 мг/л. Таким образом, в воде водохранилища и канала им. Москвы зафиксированы концентрации растворенного $C_{\text{орг}}$ превышающие предельные значения для питьевой воды, принятые как в нашей стране, так и за рубежом, и свидетельствующие о высокой органической нагрузке на Иваньковское водохранилище даже в зимний период.

В жарком августе 2022 г. в Иваньковском водохранилище были зарегистрированы самые высокие значения численности и биомассы фитопланктона за период наших исследований с 2010 г., но таксономическое разнообразие было в 2 раза меньше. Бурное размножение фитопланктона при жаркой погоде способствовало перенасыщению кислородом поверхностного слоя и значительному снижению эмиссии метана, несмотря на его активную генерацию в донных отложениях при более высокой температуре. Общая численность микроводорослей изменялась в поверхностном слое от 44.116 до максимальных 301.790 млн.кл/л, а общая биомасса фитопланктона изменялась от 13.155 до 65.891 мг/л. Однако, индекс сапробности изменялся в августе 2022 г. от 1.91 до 2.14, что практически не отличается от результатов прошлогодних исследования (в августе 2021 г. — 1.74-2.13, в августе 2020 г. — 1.91-2.10). Вода в водохранилище по индексу сапробности по-прежнему характеризуется как «умеренно-загрязнённая» и относится к 3-му классу качества. Зимой разнообразие фитопланктона формировали представители зелёных и диатомовых. Общая численность микроводорослей изменялась по акватории исследования от 944 тыс.кл/л до 2.1 млн.кл/л, общая биомасса — от 0.271 до 1.786 мг/л. Наибольшие количественные показатели фитопланктона были зарегистрированы в центральной части водохранилища в районе д. Плоски как в августе 2022 г., так и в марте 2023 г.

За период наблюдений в 2022-23 гг. и по материалам предыдущих исследований установлено, что бентофауна глубоководной зоны водохранилища стабильно представлена олигохетно-хинономидным комплексом. При этом структурообразующими участниками донного сообщества являются малощетинковые черви (pp. Tubifex, Limnodrilus, Potamothrix), доля которых в разные годы и сезоны достигала 70-94 % за исключением Городни весной и летом 2022 г. 43-56 %). В летний период значительная концентрация ОВ в глубоководной зоне водоема и высокие показатели температуры придонного слоя воды способствовали возникновению анакисидных условий, приводящих к упрощению структуры донного сообщества и увеличению доли олигохет до 81-98 % в его составе. Олигохеты играют основную роль в процессе биологической утилизации и трансформации органического вещества иловых биотопов. Являясь основными биотурбантами, они способствуют переносу растворенного кислорода и усилению активности бентических микроорганизмов и активизации обменных процессов, что положительно сказывается на самоочищающей способности водоема. Повышение минерализации воды летом маловодного 2022 г. по сравнению с предыдущими летними сезонами способствовало увеличению численности *Dreissena polymorpha* и объему профильтрованной ими воды.

Деструкция в придонном слое воды в летний период увеличивается от верховьев к плотине (от 26 мгО₂/м²сут до 112 мгО₂/м²сут). Зимой потребление кислорода у дна практически отсутствует. Весной максимальные значения наблюдались в верхнем районе (на станциях Шопинский плёс и Плоски – 47 и 79 мгО₂/м²сут, соответственно), что, возможно, связано с поступлением на дно автохтонного ОВ. Характер распределения общей деструкции ОВ в верхнем слое ДО совпадает с распределением деструкции в придонном слое воды: летом наблюдается увеличение интенсивности деструкции в ДО от верховьев к плотине (от 148 мгС/м²сут в Шопинском плёсе до 900 мгС/м²сут в районе Дубны); зимой – минимальные значения по всему водохранилищу (80-148 мгС/м²сут); весной наибольшие значения отмечаются в верхнем районе (600-625 мгС/м²сут), а минимальные (140 мгС/м²сут) – на станции Конаково.

Содержание ОВ в верхнем слое ДО в летний период максимально на станции Плоски (23 %). В остальных районах водохранилища от 11 до 14 %. Зимой содержание ОВ в грунтах одинаково по длине всего водоёма (17-19 %). Весной более высокое содержание ОВ в грунте наблюдалось на станциях Корчева – Дубна и составляло 18-21 %, в остальных районах водохранилища ОВ в ДО было несколько ниже – 14 %.

Максимальные величины выхода фосфора из донных отложений были измерены в августе 2022 г. и составили 40 мгР/м²сут на всех участках водохранилища. Минимальные величины отмечались в зимний период (8 мгР/м²сут). Весной по длине всего водоёма величина потока фосфора составила 16 мгР/м²сут.

При хорошей аэрации придонных горизонтов выход метана из донных отложений, определяемый методом трубок, ничтожный. При содержании кислорода в придонном горизонте более 2 мг/л выход метана не превышает 2 мгС/м²сут. Следует оговорить, что метод трубок не улавливает пузырьковую эмиссию, которая имеет большой вклад в выход метана в атмосферу. В периоды с дефицитом кислорода в придонном слое (август 2022 г.) выход метана из ДО увеличивался и достиг 200 мгС/м²сут. Более точную оценку выхода метана из ДО можно получить только с использованием донной камеры. Содержание метана в воде в створе Городня имеет наименьшую внутригодовую изменчивость и составляет от 9.8 до 14 мкл/л, что может быть обусловлено поступлением загрязнений выше по течению. В жарком августе 2022 г. при снижении содержания кислорода у дна до 2 мг/л концентрация метана возросла до 72.6 мкл/л. На остальной акватории в мае 2022 и 2023 г. получены значения концентрации метана одного порядка с максимумом в придонном горизонте в районе станций Плоски-Конаково (14-27 мкл/л у дна) и выраженным снижением в сторону плотины (до 6.1-6.7 мкл/л у дна).

В летний период при наличии бескислородных условий в придонном горизонте всех станций, кроме Городни, наибольшее содержание метана (1000 мкл/л) характерно для створа Плоски. Вдвое меньше в устье Шоши, на створах Конаково и Корчева и менее 90 у Плотины, что обусловлено глубиной на участках (наибольшая у плотины), содержанием ОВ в грунте. Створ Плоски, по-видимому, испытывает загрязнение от населенных пунктов, расположенных на берегу, ниже устья Шоши. Эмиссия метана в мае 2023 г. была в 2-3 раза ниже, чем в мае 2022 г. из-за более прогретого и насыщенного кислородом поверхностного слоя (7.7-8.1 мг/л против 12.6-15.8 мг/л). Наблюдается закономерное снижение удельного потока по направлению к плотине в соответствии с глубиной. В августе удельный поток на 2-3 порядка больше с максимумом на станции Плоски и минимумом у плотины.

Полученные закономерности указывают на тесную связь качества воды и внутриводоемных процессов в Ивановском водохранилище, несмотря на его значительную проточность. Погодные условия с продолжительной жарой

неблагоприятны в отношении избыточного развития фитопланктона, но в условиях жаркого маловодного лета имеет место снижение цветности воды, увеличение численности дрейссены и объема профильтрованной воды, активизация процессов деструкции и снижение потока метана на поверхности водохранилища. В весенний период при хорошей аэрации водной толщи поток метана не превышает 5 мгС/(м²·сут), в летний период имеет место значительная вариативность его значений по продольной оси и межгодовые различия (до 334 мгС/(м²·сут) в Шошинском плесе), обусловленные синоптическими и гидрологическими условиями.

Благодарности

Авторы благодарят Казанцева В.С. за предоставленную возможность обработки проб на метан в лаборатории парниковых газов ИФА РАН.

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0002 Государственного задания ИВП РАН.

Acknowledgments

The authors thank V.S. Kazantsev for the opportunity to process samples for methane in the greenhouse gas laboratory of IAP RAS.

This study was carried out under Governmental Order to Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, subject no FMWZ-2022-0002».

Список литературы

1. Дзюбан А.Н. Опыт оценки эмиссии метана на водных объектах урбанизированных территорий в бассейне Рыбинского водохранилища // Водные ресурсы, 2010. Том 37. № 4. С. 502 – 504.
2. Кузьмин Г.В. Фитопланктон: видовой состав и обилие // Методика изучения биогеоценозов внутренних водоёмов. М.: Наука, 1975. С. 73-87.
3. Мартынова М.В. Донные отложения как составляющая лимнических экосистем. Москва: Наука, 2010. 243 с.
4. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зообентос и его продукция. Л.: ГосНИОРХ, 1983. 33 с.
5. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. СПб: Наука, 2004. Т. 6. 527 с.
6. Bastviken D., Santoro A., Marotta H. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling // Environmental Science and Technology. 2010. 44(14). P. 5450–5455
7. Bastviken D. et al. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. Global Biogeochemical Cycles. 2004. 18. doi:10.1029/2004GB002238
8. Elrod V.A., Berelson W.M., Coale K.N., Johnson K.S. The flux of iron from continental shelf sediments: a missing source of global budgets // Geophys.Res.Lett. 2004. V.31.P.L 12307/1-12037/4.
9. Sweerts J., Bar-Gilissen M., Cornelse A., Cappenberg T.E. Oxygen-consuming processes at the profundal and littoral sediment-water interface of a small meso-eutrophic lake // Limnol.Oceanogr.1991. V.36. №6. P.1124-1133.

Приледниковые озёра в контексте проблемы несуществующих объектов

С.А. Грига*, Г.В. Пряхина

*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия
semyon.griga@yandex.ru*

Аннотация. Статья посвящена поиску ответа на вопрос, затрагивающий философию науки и науки о Земле, существуют ли несуществующие объекты? Настоящая работа представляет гидрологическое исследование с использованием философских методов: герменевтический, компаративистика, диалектический, научное моделирование. В качестве отправного объекта анализа было использовано замкнутое понижение ложа ледника, которое при его деградации в будущем способно стать озером. В контексте проблемы несуществующих объектов обсуждается вопрос о различии между «существует» и «есть». Показаны возможные пути решения проблемы интенциональности, отрицательных сингулярных утверждений о существовании и дискурса о прошлом и будущем. Главным результатом исследования является обоснование невозможности несуществующих объектов и разработка схемы отношений объекта с его состояниями.

Ключевые слова: философия науки, объект, проблема несуществующих объектов, ледниковые озера, ложе ледника.

Glacial lakes in the context of the problem of non-existent objects

S.A. Griga*, G.V. Pryakhina

*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia
semyon.griga@yandex.ru*

Abstract. The article is devoted to the search for an answer to the question concerning the philosophy of science and Earth science, do non-existent objects exist? This work presents a hydrological study using philosophical methods: hermeneutical, comparative, dialectical, scientific modeling. As the starting object of the analysis, an overdeepening of the glacier bed was used. If it degrades in the future, it can become a lake. In the context of the problem of non-existent objects, the question of the difference between "exists" and "is" is discussed. Possible ways of solving the problem of intentionality, negative singular statements about existence and discourse about the past and future are shown. The main result of the study is the substantiation of the impossibility of non-existent objects and the development of a scheme of relations between an object and its states.

Keywords: philosophy of science, object, problem of non-existent objects, glacial lakes, glacier bed.

Введение

Проблема несуществующих объектов является вопросом, на котором различные авторы размышляют уже с античных времён. Она остаётся актуальной и в настоящее время, в том числе для философии науки. Предположение о том, что несуществующие объекты существуют, парадоксально само по себе и вызывает сильное противоречие. Тем не менее, в повседневной жизни человека уже стало обыденностью говорить и думать о несуществующих объектах. То же происходит и в естественнонаучных направлениях.

Современные изменения климатических условий приводят к увеличению скорости отступления ледников, что способствует образованию большого числа озёр, подпруженных естественными, но неустойчивыми плотинами. Их разрушение приводит к образованию прорывных паводков и селевых потоков различного масштаба [2; 3; 5; 6]. Подобные проявления высокого уровня динамизма горных геосистем привели к резкому росту потенциальной опасности для человека, что обуславливает необходимость изучения приледниковых озёр. Ледниковое ложе образует замкнутые понижения, которые на данный момент полностью заполнены и перекрыты ледником, где потенциально могут образоваться озёра в будущем. Однако данные озёра в настоящее время не существуют. Возникает проблема выбора объекта исследования. Таким образом, несуществующие объекты являются не только философской проблемой, но и проблемой определения объекта исследования в науках о Земле.

Озеро-объект и озеро-состояние

Итак, рассмотрим коренное ложе ледника, на некотором участке которого расположено замкнутое понижение ложа. При отступании ледника со временем оно будет освобождено от него и станет приёмником талой воды и атмосферных осадков.

Само по себе исследование несуществующего озера уже очень странно. Мы можем не просто думать об озере, но и изучать его, что, согласно Дэвиду Юму, уже означает существование озера. Но есть и другой мотив так полагать – взаимодействие с несуществующим объектом.

Возможность изучения – измерения, моделирования, неабстрактно визуализации делает озеро всё более неотличимым от реально существующего.

Мы можем по-разному взаимодействовать с несуществующим озером, например:

- 1) определить его местоположение;
- 2) оценить объём воды;
- 3) оценить будущую динамику озера (увеличение/уменьшение);
- 4) как и когда оно начнет формировать и прорвётся, то есть спрогнозировать весь жизненный путь.

5) прозондировать или пробурить ледник и физически и непосредственно взаимодействовать с тем, что ещё является несуществующим озером.

Конечно, всё это не делает озеро существующим. Оно всё такой же несуществующий объект, как и Пегас или золотая гора, но всё же значительно более конкретный и определённый, чем они. То есть уже находится между существованием и несуществованием.

Это понижение ложа не является озером, то есть озеро не существует пока перекрыто ледником и не заполнено водой. Для того чтобы попробовать утвердить обратное – «существование» этого несуществующего озера обратимся к нескольким определениям озера. То есть осуществим намеренное и направленное мысленное действие на потенциально существующий объект.

1) Озеро – компонент гидросферы, представляющий собой естественно возникший водоём, заполненный в пределах озёрной чаши (озёрного ложа) водой и не имеющий непосредственного соединения с морем (океаном) [4].

2) Озеро – природный водоём в углублении суши (котловине), заполненном континентальными водными массами с замедленным водообменом, не имеющий прямой связи с морем (океаном) [8].

3) Озеро – водоём, окруженный сушей [1].

4) Озеро – природный водоём в углублении суши (котловине), заполненном в пределах озёрной чаши (озёрного ложа) разнородными водными массами и не имеющим одностороннего уклона [9].

В данном случае основываясь на принципе интенциональности, проблема которого остаётся одним из наиболее сильных оснований думать, что существуют несуществующие объекты, мы можем сказать, что озеро не существует. Возникает противоречие, при котором наше мысленная намеренная направленность, согласно принципу интенциональности, говорит о существовании объекта, а его определение отвергает это.

Это объясняется тем, что мы направлены не на один объект: объект 1 из определения существует и согласуется с принципом интенциональности (просто озеро) и некий объект 2, у которого нет определения, но мы также можем о нём думать (замкнутое понижение).

Общим для определений озера является наличие воды. В замкнутых понижениях ложа ледника вода отсутствует, её место занимает лёд. Однако заметим, что лёд – это вода в твёрдом агрегатном состоянии. При этом и лёд, и вода являются состояниями одного объекта – оксида водорода. Аналогично: мы определяем не озеро-объект (и его существование), а озеро-состояние (в данном случае объект 1 одно из них). При этом в определение состояния замешивается и сам объект, для которого отдельное определение отсутствует. Озеро-объект заимствует определение, как и существование, у озера-состояния. А значит озеро, как объект, не существует само по себе, так как на данный момент отсутствует возможность его определить, и мы не можем его представить. Возникает представление о системе объекта и его связей с состояниями, посредством которых он существует.

Кроме того, это положение подтверждается следующим. Отрицая существование озера (замкнутого понижения), мы сталкиваемся с проблемой отрицательных сингулярных утверждений о существовании. Кратко проблема формулируется следующим образом: «для того, чтобы отрицать существование данного индивида, нужно предположить существование этого самого индивида». Таким образом должно возникать противоречие. Однако мы легко можем предположить (с помощью прогноза) существование озера-состояния (следовательно, и озеро-объект), и с уверенностью утверждать, что оно будет в будущем. То есть мы предполагаем существование в будущем, при том, что в настоящий момент озера нет. Таким образом, проблема отрицательных сингулярных утверждений о существовании озера решается.

Существует или есть?

В некоторых философских работах различие между «есть» и «существует» отвергается. Кроме того, в одном из последних исследований на эту тему Грэмом Пристом была предложена теория несуществующих объектов, которая рассматривает «есть» и «существует» как синонимы. Другие философы считают, что есть веские причины для проведения этого различия. Некоторые из них считают, что различие между «есть» и «существует» коренится в обычном языке, но другие твердо отрицают это [7].

Предыдущие размышления плавно подвели нас к проблеме дискурса о прошлом и будущем. Рассмотрим следующие предложения: «Замкнутое понижение ложа будет озером» и «Озеро было замкнутым понижением ложа». Предложения состоят из предметного термина (замкнутое понижение ложа и озеро) и предикатного термина (будет озером и было замкнутым понижением ложа). Обоснование предложений

полностью лежит на прогнозе (предсказании), возможность которого была показана выше. Таким образом мы можем сказать, что озеро (состояние) нет сейчас, но есть в будущем, а озеро (объект) существует вообще. Представим всё вышесказанное в виде схемы. Схема объекта и связей с состояниями на примере «озера».

Заключение

Результаты исследования позволили сделать ряд выводов. Несуществующих объектов не существует. Объекты существуют вообще и в этом их свойство. При этом свойством существования могут не обладать состояния. Они сменяют друг друга, поскольку существование их ограничено во времени, и образуют непрерывную последовательность. Объект существует независимо от того, есть ли у него определение или нет. Разработана схема отношения объекта и его возможных состояний. Показана разница между «существует» и «есть», которые соответственно выступают свойствами объекта и состояний в двухуровневой системе их отношений.

Благодарности

Работа производилась при поддержке РФФИ и в рамках реализации проекта № 22-67-00020 «Изменения климата, ледников и ландшафтов Алтая в прошлом, настоящем и будущем как основа модели адаптации населения внутриматериковых горных районов Евразии к климатообусловленным изменениям среды».

Acknowledgments

The study was conducted with the support of the Russian National Science Foundation and within the framework of the project No. 22-67-00020 "Changes in the climate, glaciers and landscapes of Altai in the past, present and future as the basis of a model of adaptation of the population of the intracontinental mountainous regions of Eurasia to climate-conditioned environmental changes».

Список литературы

1. Богословский Б.Б. Озероведение: учебное пособие / Б.Б. Богословский. – Москва: МГУ, 1960. – 333 с.
2. Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Л.: Гидрометиздат, 1977, 153 с.
3. Голубев Г.Н. Гидрология ледников. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 248 с.
4. Спиридонов А.И. (ред.). Четырехязычный энциклопедический словарь терминов по физической географии: русско-англо-немецко-французский. – Издательство "Советская энциклопедия", 1980.
5. Черноморец С.С., Петраков Д.А., Тутубалина О.В. Прорыв ледникового озера на северо-восточном склоне г. Эльбрус 11 августа 2006 г.: прогноз, событие и последствия // Материалы гляциол. исслед., 2007, № 102, с. 225-229.
6. Clarke G.K.C. Hydraulics of subglacial outburst floods: new insights from the Spring–Hutter formulation // J. Glaciol., 2003, vol. 49, p. 299-313.
7. Reicher M. Nonexistent Objects // Stanford Encyclopedia of Philosophy. – 2010.
8. Большая российская энциклопедия. [Электронный ресурс] URL: <https://bigenc.ru/geography/text/2289844>.
9. Большая советская энциклопедия. [Электронный ресурс] URL: <https://gufo.me/dict/bse/%D0%9E%D0%B7%D1%91%D1%80%D0%B0>.

Точность и однородность суточных сумм осадков на территории России по данным ERA5

В. Ю. Григорьев^{1,2*}, Н. Л. Фролова¹, М. Б. Киреева¹, В. М. Степаненко¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

vadim308g@mail.ru

Аннотация. Редкая сеть наземных наблюдений за осадками на территории России и статистическая неоднородность рядов наблюдений на ней обуславливают в ряде исследований предпочтительность использования данных реанализа. Мы исследовали точность воспроизведения суточных сумм осадков на территории России за 1950–2020 гг. реанализом ERA5 при сравнении с данными наземных наблюдений на 526 метеостанциях, для 457 из которых также привлекались месячные суммы осадков с устраненной систематической ошибкой. На 42%–96.5% метеостанций (в зависимости от сезона) ERA5 продемонстрировала неоднородность величины систематической ошибки (*bias*) по критерию Манна-Уитни или случайной ошибки (σ) по критерию Левена. Заметное уменьшение σ было выявлено в конце 1970-х – начале 1980 гг. на 64%–80% метеостанций. В среднем по территории РФ ERA5 завышает количество осадков от 14% летом до 37% весной. При сравнении с откорректированными суммами осадков зимой ERA5 показывает систематическую ошибку близкую к нулю, а также меньшую величину ее пространственной изменчивости. Также ERA5 ложно идентифицирует (*FAR*) от 30% (зимой и осенью) до 40% (весной и летом) дней без осадков. Величина случайной ошибки в среднем на треть меньше изменчивости суточной суммы осадков (больше весной и летом, меньше осенью и зимой), а доля дней с осадками, корректно выявленными ERA5 (*POD*), составляет 84–89% и в среднем меньше летом, чем в другие сезоны.

Ключевые слова: реанализ, ERA5, осадки, случайные и систематические ошибки, пространственно-временная изменчивость.

Accuracy and homogeneity of ERA5 precipitation dataset over Russia

V. Yu. Grigorev^{1,2*}, N. L. Frolova¹, M. B. Kireeva¹, V.M. Stepanenko¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Water problems institute, Russian academy of sciences, Moscow, Russia

vadim308g@mail.ru

Abstract. Despite relatively sparse rain gauges grid, complex relief and large share of snow in total precipitation (P), using reanalysis data for hydrological modelling in Russia is still rather limited, and overwhelmed by in-situ observation. This study aimed to evaluate ERA5 daily precipitation dataset against rain gauges observation over Russia in 1950–2020. Systematic error (*bias*), random error (σ), probability of detection (*POD*) and false alarm ratio (*FAR*) were used as accuracy metrics. Error series were examined on homogeneity in *bias* and σ . Most of the rain gauges (42%–96.5%) showed heterogeneity in bias according to Mann-Whitney U-test or Levene test. However, the changes of *bias* differ greatly both by magnitude and timing. We assumed that it's mostly due to heterogeneity in rain gauges observation records. Significant reduction of σ in late 1970s - early 1980s was detected. The reduction has effect on 64%–80% of rain gauges

depending on season. On average ERA5 overestimate precipitation amount from 14% in summer to 37% in spring. Comparison with bias-corrected observations for ERA5 shows the least systematic error in winter and more even spatial distribution of the error. ERA5 false detected from 30% (winter and fall) to 40% (spring and summer) days without precipitation. However, the random error in general is less than 2/3 of daily precipitations variability. The error is more in spring and summer and less in winter and fall. The share of days with precipitation identified by ERA5 is about 84–89%.

Keywords: ERA5, precipitations, systematic and random error, spatio-temporal variability.

Введение

Доступность, качество и количество входной метеорологической информации во многом определяют точность гидрологических прогнозов и расчетов. Её отсутствие также препятствует совершенствованию гидрологических моделей, т.к. недостаток информации вынуждает переходить от физически обоснованного описания процесса формирования стока к полуэмпирическим зависимостям. В зависимости от сложности моделей они могут требовать различной входной информации, однако, неизменно включающей в себя суточные суммы осадков (P , мм). Атмосферный реанализ предполагает использование результатов наземных и спутниковых наблюдений в процессе усвоения данных в моделях, что позволяет сочетать в итоговом продукте достоинства различных источников данных. Одними из наиболее широко используемых реанализов является ERA5 (ECMWF Re-Analysis 5) [1]. Цель данного исследования оценка однородности и точности данных ERA5 по суточным суммам осадков на территории России.

Материалы и методы

Данные ERA5 за 1950–2020 гг. находятся в свободном доступе. Суточные данные по P и температуре воздуха на 526 метеостанциях в пределах РФ были предоставлены ВНИИГМИ-МЦД и находятся в открытом доступе. Средняя продолжительность рядов наблюдений 66.2 года, 10% метеостанций имеют ряды продолжительностью в 55 лет или меньше, минимальная продолжительность 33 года. Суточные суммы осадков с метеостанций за период до 1966 г. были откорректированы. Тип осадков определялся по среднесуточной температуре воздуха, измеренной на метеостанциях. При температуре воздуха менее 0°C осадки считались твердыми, в остальных случаях жидкими. В случае, если измеренная величина P составляла 0.1 мм, принималось, что в эти сутки поправка вводилась один раз. Для дней, когда измеренная величина $P > 0.1$ мм, принималось, что поправка вводилась 1.5 раза. Таким образом, при измеренных $P = 0.1$ мм величина поправок составляла 0.1 мм и 0.2 мм, а при измеренных $P > 0.1$ мм 0.15 мм и 0.3 мм для твердых и жидких осадков соответственно. Для расчета величины систематической ошибки также использовались месячные суммы P с устраненной систематической ошибкой [2], на 457 метеостанциях за 1950–2015 гг., доступные через сайт ВНИИГМИ-МЦД.

Для каждого сезона за каждый год и в целом за 1950–2020 гг. рассчитывались 4 метрики, отражающие степень совпадения между данными ERA5 и наблюдениями на метеостанциях. Две метрики, систематическая ошибка ($bias$) и случайная ошибка (σ) показывают, насколько совпадает величина осадков по двум наборам данных. Еще две метрики, POD – доля корректно выявленных дней с осадками и FAR – доля не корректно выявленных дней с осадками, чтобы определить способность ERA5 выявлять случаи выпадения осадков.

Результаты

Однородность. Согласно критериям Манна-Уитни для $bias$ и Левена для σ неоднородность рядов ошибок ERA5 была выявлена для большей части метеостанций, от 42.5% для σ весной до 96.5% для $bias$ зимой (Рис.).

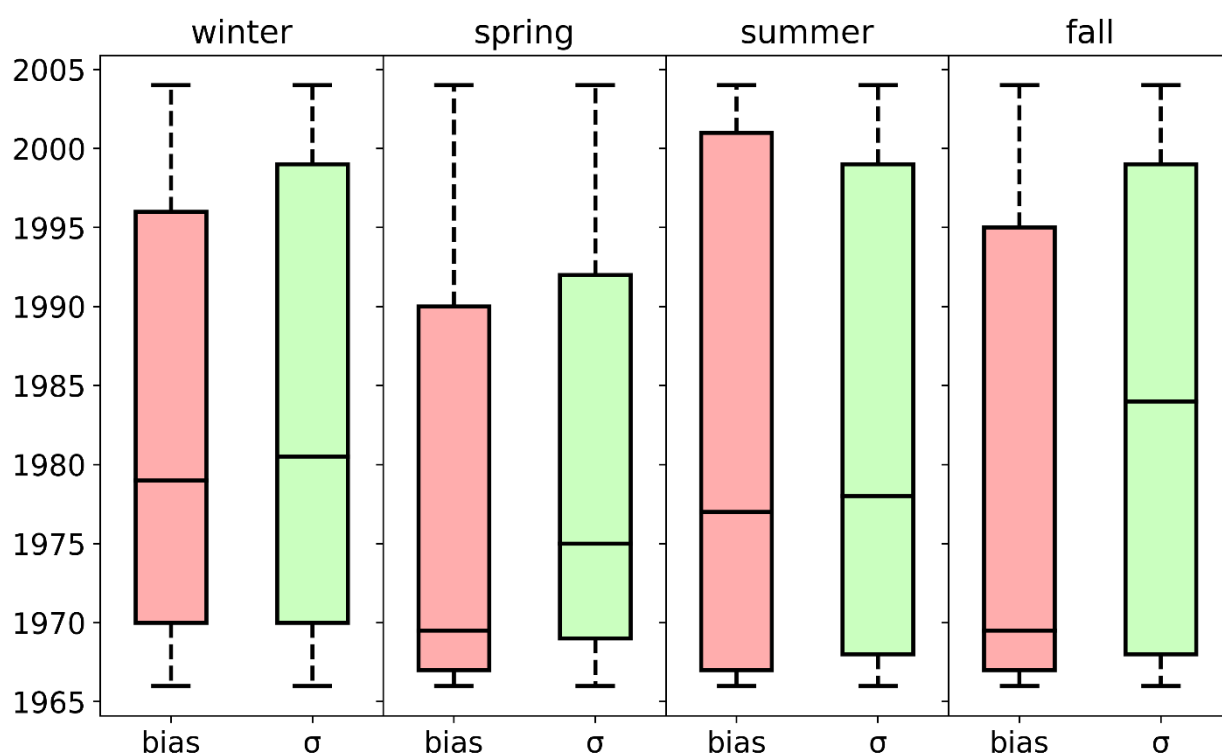


Рис. Распределение года нарушения однородности рядов систематической (*bias*) и случайной ошибки (σ) ERA5 за различные сезоны.

Среди 432–454 метеостанций (в зависимости от сезона) медиана года нарушения однородности/перелома для *bias* располагается от 1970 г. для весны и осени до 1979 г. для зимы. Распределению года перелома *bias* весной и осенью имеет явную асимметрию – для 25% метеостанций год перелома приходится на 1965–1966 гг. Для лета характерно бимодальное распределение – нижний квартиль занимает два года (1965–1966), а верхний четыре (2001–2004). Медиана года перелома σ лежит между 1975 г. (весной) и 1984 г. осенью. Отметим, что для зимы и лета год перелома σ лишь на год опережает год перелома *bias*. Несмотря на статистическую значимость изменений *bias* и σ их величина относительно мала (Табл.).

Табл. Средняя величина *bias* и σ среди метеостанций, где их изменений статистически значимо за два периода (мм/день), а также доля станций, где ошибка уменьшилась.

метрика	<i>bias</i> , мм/день			σ , мм/день		
	первый период, мм	второй период, мм	доля станций, %	первый период, мм	второй период, мм	доля станций, %
зима	0.19	0.16	60.4	1.06	0.96	79.9
весна	0.31	0.35	32.2	1.83	1.69	73.2
лето	0.25	0.28	43.2	4.15	4.07	63.6
осень	0.25	0.3	30.8	1.98	1.84	68.6

В целом уменьшение *bias* произошло лишь зимой. В другие сезоны он вырос от 0.03 мм/день до 0.05 мм/день. Случайная ошибка уменьшилась во все сезоны. Наиболее заметное снижение было выявлено для зимы – в среднем на 9.5%. Зимой же снижение σ было выявлено для наибольшего числа станций. Наименее заметно снижение σ проявило себя летом.

Особенности пространственного распределения. В среднем для всех сезонов ERA5 завышает *P*. Так зимой для 85.7% станций *bias*>0, а для 72% *bias*>10 %, при среднем *bias* в 0.33 % (медиане 23%). Области с *bias*<10% занимает большую часть Азиатской территории России (АТР), помимо ее южных районов, восток Европейской территории России (ЕТР), а

также черноморское побережье Кавказа. Весной выявлена наибольшая величина *bias*, в среднем составляющая 50%. Лишь у 5.1% станций *bias*<10%. Наибольшие величины *bias* характерны для Восточной Сибири, Дальнего Востока (в меньшей степени Приморья) и арктического побережья. Наименьшие величины, преимущественно в диапазоне от 20% до 35%, характерны для запада ЕТР. Летом величины *bias* наименьшие, в среднем составляющие 20%, а для 38% метеостанций не превышающие 10%. Осенью *bias* составляет порядка 30%, а его пространственное распределение занимает промежуточное положение между летним и зимним.

В зимний период использование сумм осадков с устраненной систематической ошибкой привело к уменьшению оценки медианы *bias* с 23% до -1%. Также уменьшилась пространственная неоднородность – разница между 75% и 25% квантилем *bias* уменьшилась с 35% до 28%. Несмотря на уменьшение 25% квантиля *bias*, также выросло минимальная величина *bias* – с -67% до -58%. Максимальная величина уменьшилась с 340% до 289%. Для других сезонов также произошло уменьшение *bias*, хотя и не столь заметное. Наименее значимый рост точности был получен для лета. Медиана уменьшилась с 13% до 7%, а разброс между 75% и 25% квантилем уменьшился с 17% до 15%.

В зимний период величина σ минимальна среди всех сезонов. Для более, чем 40% метеостанций, σ находится в диапазоне от 50% до 66% от изменчивости суточных сумм осадков. Значения σ >66% преобладают лишь на арктическом побережье, на востоке Кавказского региона, юге Восточной Сибири, на территории Чукотки и Камчатки. Весной медиана σ увеличивается с 62% до 70%, однако области с большими/меньшими значениями σ сохраняются. Изменения в закономерностях пространственного распределения σ происходят летом. Исчезает область с повышенными величинами σ на арктическом побережье ЕТР, в результате чего распределение σ на ЕТР становится практически зональным, с направлением роста с северо-запада на юго-восток. Повышенные величины σ наблюдаются на юге Западной и Восточной Сибири, без района Забайкалья, где они становятся близки к таковым на юге Дальнего Востока. Медиана σ достигает максимума в 0.79. Осенью распределение σ близко к зимнему, с несколько большими величинами на ЕТР и меньшими на юге Восточной Сибири.

Зимой максимальные величины *POD* наблюдаются на ЕТР, в Западной Сибири и на Дальнем Востоке, недалеко от Тихого океана. Для половины станций *POD* превышает 0.87, а для трети 0.9. Весной распределение *POD* наиболее равномерно. Для 57% станций *POD* находится в диапазоне от 0.825 до 0.9. Меньшие величины характерны лишь для севера Восточной Сибири и Дальнего Востока, а также района Каспийского моря. Летом *POD* в целом по территории РФ достигает минимальных величин. В пределах ЕТР *POD* уменьшается с севера на юг, достигая минимума в районе Прикаспия. На АТР величина *POD* распределена более однородно, с максимумом в прибрежных районах Тихого океана. Распределение осенью практически идентично распределению весной.

Значительно более низкую точность ERA5 демонстрирует по величине *FAR*. Зимой *FAR*<0.25 было выявлено лишь у 21.3% всех станций. Для остальных сезонов эта доля еще меньше. Так, летом *FAR*<0.25 было выявлено лишь для одной станции. Зимой минимальные значения *FAR* наблюдаются на севере России, не считая прибрежных районов. Максимальные величины характерны для юга ЕТР, Западной и Восточной Сибири. Весной *FAR* увеличивается по всей территории России. Минимальные величины в диапазоне от 0.25 до 0.35 наблюдаются на севере ЕТР и Западной Сибири. Максимум *FAR* приходится на район Забайкалья и Прикаспия, где *FAR* в среднем превышает 0.5. Летом на ЕТР наблюдается небольшой рост *FAR* по сравнению с весной, однако на АТР *FAR* уменьшается до величин порядка 0.35–0.45.

Выводы

ERA5 является первым реанализом, имеющим высокое пространственно-временное разрешение, при этом покрывающим достаточно длительный период, сопоставимый с продолжительностью наблюдений на многих метеостанциях, и не имеющий нарушений

однородности рядов в связи со сменой методов расчета или измерений. Низкая густота метеостанций и неоднородность рядов наблюдений делают реанализ одним из предпочтительных источников информации о величине осадков.

Систематическая ошибка ERA5 за 1950–2020 гг. может рассматриваться как однородная. Случайная ошибка показала некоторую тенденцию к снижению, в среднем с конца 1970-ых гг.

Сравнение осадков по данным наблюдений на метеостанциях и ERA5 показало, что ERA5 в большинстве случаев завышает количество осадков и количество дней с осадками, что наиболее заметно в аридных районах и в относительно сухие сезоны. Вместе с тем ERA5 фиксирует большинство случаев выпадения осадков, а величина случайной ошибки не превышает изменчивости суточных сумм осадков. В целом по четырем рассмотренным метрикам минимальная величина ошибок характерна для северо-запада ЕТР, а максимальная для района Прикаспия и горных районов. В среднем для территории России, систематическая ошибка демонстрирует минимум зимой и максимум весной. Для случайной ошибки характерен минимум зимой и осенью, а максимум летом. Минимальная доля дней с ложно идентифицированными случаями выпадения осадков наблюдается осенью.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке проекта РФФ № 21-47-00008.

Acknowledgments

The work was carried out with the support of RSF projects № 21-47-00008.

Список литературы

1. Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Степаненко В.М. Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения слоя осадков реанализом ERA5 на территории России // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2022. Т. 86, №3. С. 435-446.

2. Bogdanova E.G., Gavrilova S.Y. Correction of the precipitation time series nonhomogeneity caused by replacement of the Nipher shielded rain gauge by a Tretyakov precipitation gauge // Russian Meteorology and Hydrology. 2008. V. 33, № 8. P. 525-536. <https://doi.org/10.3103/S1068373908080074>

Системное нормирование воздействий на водный объект: экологический статус водоема и его изменение при естественном и антропогенном воздействии

В.В. Дмитриев^{1*}, В.Ю. Третьяков^{1,2}, Е.А. Примаков², С.А. Седова¹, Е.А. Васькова³,
Е.С. Дудоркин¹, Н.А. Панютин¹, Э.В. Акулич¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

²Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Россия

³Акционерное общество Группа компаний Шанэко Москва, Россия

v.dmitriev@spbu.ru

Аннотация. Рассматриваются теоретико-методологические положения, метод и примеры интегральной оценки экологического статуса водоемов. Под экологическим статусом (ЭС) понимается эмерджентное (интегративное) свойство водного объекта, характеризующее сочетание его способностей: 1 – продуцировать органическое вещество (продукционный потенциал, трофность, трофический статус); 2 – изменять химический и биологический состав, качество и токсическое загрязнение воды; 3 – сохранять потенциальную устойчивость (устойчивость к изменению физико-географических параметров, климатических особенностей, гидрологического режима). В качестве методов интегральной оценки использовались: метод сводных показателей (композитных индексов) и метод рандомизированных сводных показателей (с использованием системы поддержки принятия решений "АСПИД-3W" - многокритериальная оценка вероятностей на основе экспертных нечисловых, неточных и неполных знаний). На основе формулировки и проверки ряда гипотез рассматривается совершенствование технологии построения интегральных показателей экологического статуса (ИПЭС). Формулируется представление о «норме воздействия» на водную экосистему. Предложена методика оценки нормы воздействия и/или проверки допустимости воздействия на основе сравнения ИПЭС до и после воздействия. ИПЭС после воздействия рассчитываются в примерах на основе гипотетических сценариев или по результатам имитационного моделирования водных экосистем. Рассмотрены этапы оценки воздействия на водную экосистему на основе сочетания методов имитационного моделирования и метода сводных показателей.

Ключевые слова: экологический статус, экологическое благополучие, интегральная оценка, системное нормирование.

System regulation of impacts on a water body: the ecological status of a reservoir and its change under natural and anthropogenic impacts

V.V. Dmitriev^{1*}, V.Yu. Tretyakov^{1,2}, E.A. Primakov², S.A. Sedova¹, E.A. Vaskova³, E.S.
Dudorkin¹, N.A. Panyutin¹, E.W. Akulich¹

¹St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

²Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

³Joint Stock Company Shaneco Group of Companies Moscow, Russia

v.dmitriev@spbu.ru

Abstract. Theoretical and methodological provisions, method and examples of the integral assessment of the ecological status of water bodies are considered. Under the ecological status (ES), we mean the emergent (integrative) property of a water body, which characterizes the combination of its abilities: 1 – produce organic matter (productive potential, trophic status); 2 – change the chemical and biological composition, quality and toxic pollution of water; 3 – maintain potential stability (resistance to changes in physical and geographical parameters, climatic features, and hydrological regime). The following methods of integral assessment were used: the method of summary indicators (composite indices) and the method of randomized summary indicators (using the decision support system "ASPID-3W" – multicriteria estimation of probabilities on basis of expert non-numeric, non-exact and non-complete knowledge). Based on the formulation and testing of a number of hypotheses, the improvement of the technology for constructing integral indicators of ecological status (IIES) is considered. The concept of the "norm of impact" on the aquatic ecosystem is formulated. A technique for assessing the exposure rate and/or testing the acceptability of exposure based on a comparison of IIES before and after exposure is proposed. Post-impact IIES are calculated in the examples based on hypothetical scenarios or from simulations of aquatic ecosystems. The stages of assessing the impact on the aquatic ecosystem based on a combination of simulation modeling methods and the method of composite indices are considered.

Keywords: ecological status, ecological well-being, integrated assessment, system rationing.

Введение

Актуальность проблемы обусловлена выполнением Распоряжения Правительства РФ от 27.08.2009 N 1235-р (ред. от 17.04.2012) "Об утверждении "Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года" [1], разработкой "Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642" [2]; систематизацией знаний, практик разработки, экспертизы и реализации проектов, связанных с преобразованием и управлением водными объектами в связи с развитием цифровизации в науках о Земле, природе, обществе. Решение подобной проблемы в странах ЕС с начала 2000-х гг. сопряжено с принятием, доработкой и адаптацией Европейской Рамочной Водной Директивы или Директивы Европейского парламента и Совета по установлению рамок действий Сообщества в области водной политики (Directive of the European Parliament and of the Council on setting the framework for Community action in the field of water policy) [3]. Основная цель Директивы в ЕС представляется, как достижение экологического благополучия или высокого экологического статуса для всех водных систем. Эта задача реализуется в виде разработки интегрированного подхода к решению проблемы оценки современного и перспективного состояния водных объектов (речных бассейнов), выделения экорегионов в странах ЕС.

Целью работы является разработка теории, методологии, математического аппарата и моделей интегральной оценки экологического статуса и экологического благополучия водных объектов для оценки их современного и перспективного состояния, выделения экорегионов и степени антропогенной трансформации водных объектов и их экосистем. Методология исследований базируется на авторском подходе к исследованию сложных систем в природе и обществе, их эмерджентных свойств и функций; методах построения композитных индексов и субиндексов, анализе и синтезе показателей в условиях дефицита информации о критериях и приоритетах оценивания

(АСПИД- и APIS- методологии), методах имитационного моделирования водных экосистем, разноаспектной ГИС-визуализации полученных результатов.

В перечень задач исследования входят следующие основные задачи: 1 - обоснование теоретико-методологических положений интегральной оценки экологического/геоэкологического статуса (ЭС/ГС) и экологического благополучия (ЭБ) водных объектов; 2 – разработка и апробация моделей интегральной оценки трофического статуса, качества и токсического загрязнения воды, потенциальной устойчивости, ЭБ водных объектов; 3 – разработка математического аппарата и моделей интегральной оценки экологического и/или геоэкологического статуса и экологического благополучия водных объектов для оценки их современного и перспективного состояния; 4 – проверка выдвигаемых гипотез о достаточности интегральной оценки трофического статуса, качества воды, потенциальной устойчивости для формирования представлений об ЭС водного объекта; 5 – проверка выдвигаемых гипотез о необходимости привлечения дополнительных параметров (субиндексов) для интегральной оценки ГС и ЭБ водных объектов с учетом их типа и специфики; 6 – разработка подходов к выявлению пределов устойчивости водных объектов к изменению параметров естественного режима и антропогенному эвтрофированию; 7 – разработка подходов к выявлению пределов устойчивости водных объектов к изменению параметров естественного режима и качества воды; 8 – разработка подходов к выявлению пределов устойчивости водных объектов к изменению ЭС и ЭБ при естественном развитии и внешнем воздействии на водный объект; 9 – разработка моделей учета экологических функций водных объектов, в первую очередь, продукционной и деструкционной, исследование их изменений при антропогенной трансформации водных экосистем; 10 – разработка рекомендаций и примеров учета приоритетов (отдельных субиндексов) в интегральной оценке системных свойств и функций; разноаспектной ГИС-визуализации результатов оценочных исследований ЭС и ЭБ.

Материалы и методы исследования

Рассмотрение большого количества документов, публикаций и обобщений по теме исследования, приведенных в [4; 5] показало, что в большинстве случаев подходы к оценке экологического состояния и качества окружающей человека природной и антропогенно-трансформированной среды не содержит теоретико-методологических обобщений и методов интегральной оценки сложных систем в природе и обществе и их эмерджентных (интегративных) свойств, характеризующих системные свойства и системные функции, их пространственно-временные проявления (эффекты). Индексология и индикаторный подход присутствуют в большинстве исследований на уровне индексов-маркеров, аналитических индексов (простые аналитические - результат нормирования; условные функционалы – индексы разнообразия и сходства; экспертные индексы – индексы качества среды; функция Харрингтона и ее аналоги, отражающие эффект триггерности). Таким образом, в основе большинства оценочных исследований содержатся многокритериальные оценки, недостатком которых является неопределенность интерпретации полученных результатов, когда по одному индексу (субиндексу) система попадает в один класс (продуктивности, качества, устойчивости, благополучия и др.), а по другим индексам (субиндексам) – в другой или другие классы. Системы индикаторов, которые используются управленческими структурами в зарубежных и отечественных оценочных исследованиях сложных природных (и общественных) систем также порождают неопределенность в результатах оценивания временной динамики развития системы. Процесс управления такими системами, основанный на мониторинге факторных показателей, расчете некоторых упомянутых индексов (зачастую, неоправданно большого их количества с представлением

итогового результата в виде балльной оценки), их анализе с учетом влияния на целевой индикатор на основе различных авторских подходов, прогнозе возможных изменений выбранных показателей не дает должного эффекта. В результате, по одному индикатору (набору индикаторов) выявляется положительная динамика развития, а по другому (другим) – стагнация (деградация, спад и т.п.) или негативные системные эффекты. В связи с этим следует признать, что реализация конкретных целей деятельности органов государственной власти в сфере планирования устойчивого развития регионов часто не является эффективной. Это также подтверждается имеющимися зарубежными публикациями. В одном из современных зарубежных обобщений, посвященных обзору более 1500 работ по индексам, разработанным для оценки «территориальных детерминант» с точки зрения охраны окружающей среды, авторами было выявлено более 20 пространственно-распределенных композитных индекса, в основу которых заложена информация о более 300 переменных. С точки зрения авторов статьи, это «может привести к сильной субъективности и ограничению возможности сопоставления различных оценочных результатов» [4].

Основы методики наших исследований были заложены в конце 1990-х гг. [6]. В авторских обобщениях и многочисленных примерах, рассмотренных и реализованных нами в серии публикаций, акцент в создании классификаций ЭС и ЭБ был сделан на разработку оценочных классификаций (моделей-классификаций) на основе обобщенных функций желательности, которые дают возможность одновременно отразить многокритериальность оценок и иерархичность сложной системы на основе иерархии субиндексов интегративных свойств с учетом недостатка информации о критериях и приоритетах оценивания. Исследовались, главным образом, водные экосистемы и геосистемы, их эмерджентные (сложные, неаддитивные, интегративные) свойства и функции, характеризующие системы в целом (современный или ретроспективный статус системы, ее системное благополучие, степень трансформации системы, устойчивость/уязвимость системы, и др.) в условиях достаточного информационного обеспечения или недостатка информации (с использованием неполной, неточной, нечисловой информации, т.н. «*ннн*-информации») о критериях и приоритетах в планировании управления системами. Также впервые были разработаны новые методы оценки воздействия на системы и их ответной реакции на воздействие. При решении этой проблемы исследователь нацелен на прогнозирование состояния сложной системы (и ее подсистем) на основе моделей системной динамики (имитационных моделей) и моделей интегрального оценивания. Совмещение подходов, позволило разработать новые методики системного нормирования воздействия на водные объекты [7-9].

Результаты и выводы

В качестве примера рассмотрим некоторые полученные результаты. Сформулированы и проверены следующие научные гипотезы.

Гипотеза 1 – о достаточности интегральной оценки трофического статуса, качества воды (и донных отложений), устойчивости водного объекта для формирования представлений об ЭС водного объекта [7; 9].

Гипотеза 2 – о необходимости привлечения дополнительных параметров для интегральной оценки ЭБ водных объектов с учетом их типа и специфики. Например, под экологически благополучной природной системой понималась система, способная: 1 – продуцировать органическое вещество в соответствии с исторической фазой развития; 2 – выполнять социально-экономические функции и функции жизнеобеспечения (средо- и ресурсовоспроизводство); 3 – являющаяся разнообразной по составу биоты и абиотической среды; 4 – чистой по химическому составу воды и гидробиологическим критериям качества воды; 5 – устойчивой к изменению

параметров естественного (и антропогенного) режимов; 6 – способной к самоочищению; 7 – обладающей низкой скоростью загрязнения, ацидификации; 8 – способной сохранять названные свойства и функции достаточно долго в изменяющихся условиях среды и жизни организмов. Перечисленные свойства, учитываемые в оценочных классификациях, в других случаях, потребовали разработки дополнительных субиндексов и их учета в сводной оценке. В некоторых случаях количество учитываемых параметров обоснованно уменьшалось в связи с недостаточным информационным обеспечением работ. В любом варианте делалась попытка объединить био- и антропоцентризм в подходах к исследованию ЭБ [5; 8].

Гипотеза 3 – об использовании разных шкал устойчивости и разных моделей при оценке ЭС и ЭБ водоемов [5-9].

Гипотеза 3.1. Шкала потенциальной устойчивости, построенная для оценки ЭС, изменяется от неустойчивого класса (I класс) до устойчивого класса (V класс). При этом в первый класс по остальным группам признаков (трофический статус, качество воды) включаются параметры, характеризующие высокий ЭС водоема. Устойчивость в этом случае будет следовать принципу Ле Шателье-Брауна. При этом система постепенно адаптируется к новым условиям (устойчивость I типа, адаптационная). Следствием этого будет положение, при котором при прочих неизменных условиях более продуктивная экосистема малого водоема может оказаться более устойчивой к эвтрофированию, а более сапробная (токсобная) экосистема – более устойчивой к загрязнению. В этом случае устойчивая экосистема не должна ассоциироваться с экологическим благополучием (или высоким ЭС).

Гипотеза 3.2. При оценке ЭС больших водоемов, шкала потенциальной устойчивости будет изменяться от устойчивого класса (I класс) до неустойчивого класса (V класс). Гипотеза построена на предположении о том, что большие по площади и объему воды озера, а также глубокие водоемы, как правило, являются более устойчивыми к изменению параметров естественного режима (потенциальная устойчивость).

Гипотеза 3.3. *A priori* принимается предположение о том, что при оценке ЭС и ЭБ для любых водоемов, устойчивость будет изменяться, аналогично гипотезе 3.2, от устойчивый (I класс) до неустойчивый (V класс). В этом случае большая устойчивость водоема всегда будет свидетельствовать о его высоком ЭБ. При этом на второй план уходит то, что малые водоемы по результатам оценки, скорее всего, никогда не смогут характеризоваться I-м (наиболее устойчивым) классом.

Гипотеза 3.4. Интегральные оценки эмерджентных свойств и системных эффектов, выполненные на основе разных моделей-классификаций по одним исходным данным должны давать близкие результаты. Модели-классификации, в которых в качестве наилучшего класса используется близость результата нормирования к «0» и модели-классификации, в которых в качестве наилучшего класса используется близость результата нормирования к «1», должны давать один класс ЭС реального водоема.

Гипотеза 3.5. Учет в оценке ЭС потенциальной устойчивости на основе адаптационного подхода (I тип, непроточный водоем) и регенерационного подхода (II тип, с учетом проточности) не должен приводить к разным результатам.

Гипотеза 3.6. Модель-классификация оценки ЭС, построенная в предположении, что наиболее высокому статусу (I класс) в пределах Северо-Запада РФ должны соответствовать олиго-мезотрофные условия первичного продуцирования органического вещества в водоеме, наилучшее качество воды и наибольшая потенциальная устойчивость (принцип – «высокий статус – высокая устойчивость») и модель-классификация оценки ЭС, построенная в предположении, что наиболее

высокому статусу (I класс) должны соответствовать олиго-мезотрофные условия первичного продуцирования органического вещества в водоеме, наилучшее качество воды и низкая потенциальная устойчивость (на том основании, что чистые и малопродуктивные водоемы уязвимы к загрязнению и антропогенному эвтрофированию) не должны давать противоречивых результатов.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-27-10011, и при финансовой поддержке Санкт-Петербургского научного фонда.

Acknowledgments

The work was supported by Russian Science Fund, grant No. 23-27-10011, and by Saint Petersburg Science Fund.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства РФ от 27.08.2009 N 1235-р (ред. от 17.04.2012) "Об утверждении "Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года" <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-pravitelstva-rf-ot-27082009-n-1235-r/>
2. Указ Президента РФ от 1 декабря 2016 г. N 642 "О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации" (с изменениями и дополнениями). Указ Президента РФ от 1 декабря 2016 г. N 642 "О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации" <https://base.garant.ru/71551998/>
3. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy Official Journal L 327, 22/12/2000. P. 1-73.
4. Brousmichea D., Occellia F., Geninb M., Cunya D., Derama A., Lanier C. Spatialized composite indices to evaluate environmental health inequalities: Meeting the challenge of selecting relevant variables. Ecological Indicators. 111 (2020) 106023. URL.: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106023>. (дата обращения: 03.02.2020).
5. Dmitriev V. V., Terleev, V. V., Nikonorov, A. O., Ogurtsov, A. N., Osipov, A. G., Sergeyev, Y. N., Kulesh, V. P., Fedorova, I. V. (2020). Global Evaluation of the Status and Sustainability of Terrestrial Landscapes and Water Bodies. Landscape Modelling and Decision Support, 231–253. doi:10.1007/978-3-030-37421-1_12
6. Александрова, Л. В., Васильев, В. Ю., Дмитриев, В. В., Мякишева, Н. В., Огурцов, А. Н., Третьяков, В. Ю., Хованов, Н. В. Многокритериальные географо-экологические оценки состояния и устойчивости природных и урбанизированных систем. ВИНТИ 2342V00, 2000 г. [Электронный ресурс].URL: <https://clck.ru/G5sC2> (дата обращения: 17.05.2019).
7. Седова С.А., Дмитриев В.В. Интегральная оценка экологического статуса водоема и нормы воздействия на его водную экосистему: Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод. Сборник статей, посвященный 100-летию со дня образования Гидрохимического института. Ростов-на-Дону, 2020. С. 254-259.
8. Седова С.А., Дмитриев В.В., Третьяков В.Ю., Глушко А.А., Пленкина А.К. Оценка воздействия на водную экосистему и ее эмерджентные свойства на основе результатов имитационного моделирования и построения композитных индексов. Успехи современного естествознания. 2021. № 6. С. 132-142. DOI: 10.17513/use.37652
9. Архипов Д.Э., Едемский К.Е., Кожевникова С.И., Дмитриев В.В. Развитие мониторинга водных объектов на основе интегральной оценки экологического статуса и моделирования экологических функций. European Journal of Natural History. 2022. №2. С. 31-37.

Гидрологические аномалии и закономерности донских половодий текущего столетия

В.А. Дмитриева^{1*}, А.И. Сушков²

¹*Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия*

²*Воронежский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, г. Воронеж, Россия.
verba47@list.ru*

Аннотация. Цель исследования заключается в выявлении причин возникновения гидрологических аномалий и обусловленной ими закономерности процесса. Водный режим реки Дон и ее притоков в текущем столетии существенно меняется в ответ на климатические вызовы. Наибольшей трансформации подвержена фаза снегового половодья. При общей устойчивой тенденции снижения объемов и экстремумов половодья формируются гидрологические аномалии половодного стока, которые не согласуются с ведущими факторами процесса: высотой снега и запасом воды в снеге к началу снеготаяния. Доминирующую роль в этом процессе играет состояние подстилающей поверхности, а именно, глубина промерзания и осеннее увлажнение почвы. Небольшая глубина промерзания почвы (5-31 см) в зиму 2019-2020 и 2021-2022 годов по Воронежской области и высокая инфильтрация воды в почву весной, особенно при низком осеннем увлажнении почвы 2019 года, сформировали очень низкие половодья, аномально низкое в 2020 году. При этом доминирующим фактором весенней гидрологической аномалии является малая глубина промерзания почвы в осенне-зимний период. При данных природно-климатических условиях гидрологическая аномалия становится закономерной неизбежностью. Атипичный осенний дождевой паводок на реках Верходонья, исключительно высокое насыщение почвы в этот период влагой и промерзание почвы способствовали образованию половодья 2023 года, по объему и максимуму стока превосходящее среднее. Таким образом, гидрологическая аномалия рассматривается закономерным событием при определенных природно-климатических условиях.

Ключевые слова: Донской бассейн, снеговое половодье, гидрологическая аномалия, географическая закономерность.

Hydrological anomalies and regularities of the Don floods of the current century

V.A. Dmitrieva^{1*}, A.I. Sushkov²

¹*Voronezh State University, Voronezh, Russia*

²*Voronezh Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Voronezh, Russia*

Abstract. The purpose of the study is to identify the causes of hydrological anomalies and the regularities of the process caused by them. The water regime of the Don River and its tributaries is changing significantly in the current century in response to climate challenges. The snow flood phase is subject to the greatest transformation. With a general steady downward trend in flood volumes and extremes, hydrological anomalies of flood runoff are formed that are not consistent with the leading factors of the process: snow depth and water content in snow

by the beginning of snowmelt. The dominant role in this process is played by the state of the underlying surface, namely, the depth of freezing and autumn soil moisture. A small depth of soil freezing (5-31 cm) in the winter of 2019-2020 and 2021-2022 in the Voronezh region and high water infiltration into the soil in spring, especially with low autumn soil moisture in 2019, formed very low floods, anomalously low in 2020. At the same time, the dominant factor of the spring hydrological anomaly is the shallow depth of soil freezing in the autumn-winter period. Under these natural and climatic conditions, a hydrological anomaly becomes a natural inevitability. An atypical autumn rain flood on the Upper Don rivers, exceptionally high soil saturation with moisture during this period and soil freezing contributed to the formation of a flood in 2023, which exceeds the average in terms of volume and maximum runoff. Thus, a hydrological anomaly is considered a natural event under certain natural and climatic conditions.

Keywords: Don basin, snow flood, hydrological anomaly, geographical regularity.

Введение

Весеннее снеговое половодье – фаза водного режима, закономерно повторяющаяся на реках европейской части страны преимущественно в сезон весны со сдвижкой по месяцам ее начала. Однако, климатические изменения текущего столетия, характеризующиеся постоянным и неуклонным прогреванием атмосферы и повышением как глобальной, так и региональной температуры воздуха [9], вызывают реакцию в природных процессах, в том числе и гидрологических. Многочисленные исследования водного режима рек Восточно-Европейской равнины указывают на сокращение объемов снегового половодья, увеличение его продолжительности, снижение максимальных экстремумов водности, смещение дат наступления максимального наполнения русла водой. В тоже время в новых климатических реалиях появляются особые черты половодья, которые можно одновременно рассматривать и как гидрологические аномалии, и как географическую закономерность.

Целью настоящего исследования является изучение ситуаций нетипичного формирования половодья на реках Верхнедонского бассейна в текущем столетии.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования являются речные потоки бассейна Верхнего Дона, граница которого оконтуривается нами рубежами Воронежской области на юге и востоке, а на западе и севере совпадает с естественными линиями водоразделов притоков Дона [2]. Общая площадь Верхнедонского бассейна составляет 143 500 км². Следует заметить, что граница Верхнего Дона у авторов различных направлений исследования не совпадает, при этом ее проведение не аргументируется какими-либо критериями.

Речную систему Верходонья образуют собственно Дон, а также многочисленные притоки, впадающие непосредственно в реку Дон: Красивая Меча, Сосна (Быстрая Сосна), Девица (Красная Девица), Воронеж, Икорец, Битюг, Тихая Сосна, Черная Калитва, Толучеевка с Подгорной, Богучарка. В рассматриваемую часть речного бассейна входит река Хопер с притоками Ворона, Савала, Елань наиболее значительными из водотоков в верхнем и среднем течении реки. В гидрологическом отношении река Дон и ее притоки хорошо изучены, поскольку на них функционируют или ранее действовали гидрологические стационарные пункты [6]. Следует заметить, что гидрологическая сеть сильно поредела с конца 1980-х годов по объективным причинам (реки обмелели, местами заросли травой, что сократило проточность и изменило режим реки и создало препятствия для применения стандартных методов измерения и наблюдения), а также в связи с оптимизацией гидрологической сети и сокращением числа действующих постов.

В настоящее время на реках бассейна функционируют 26 гидрологических (стоковых) постов, имеющих различную продолжительность наблюдений, от максимальной 128 лет (р. Дон – г. Лиски) до минимальной 49 лет (р. Воронеж – с. Чертовицкое). К рассмотрению принимались все реки, на которых ведутся систематические наблюдения, реки разных размеров по длине, площади водосбора, водности, например, р. Дон – Лиски с $A=69500 \text{ км}^2$ и р. Сосна – с. Ивань-2-я с $A=276 \text{ км}^2$.

Массив исходной информации включает максимальные суточные расходы воды весеннего снегового половодья, сформированный за весь период наблюдений на гидрологических постах Верходонья. Анализ временной изменчивости фазы половодья выполняется на фоне инструментальных наблюдений за период мониторинга с акцентом на события текущего столетия.

Сравнительный анализ, географо-гидрологический, графический, аналитический – методы, которые использованы при анализе гидрологических характеристик речного стока.

Результаты и обсуждение

Образование и ход весеннего снегового половодья в Донском бассейне обуславливают главные природно-климатические факторы, и в первую очередь, наличие и высота снежного покрова, запасы воды в снежной массе к началу половодья, условия инфильтрации воды в почву, метеорологические условия в период снеготаяния и образования талой воды. К важным причинам, определяющим характер весеннего половодья и его прохождение, относятся состояние почвы в осенне-зимний период, глубина промерзания к моменту снеготаяния весной и, наконец, метеорологические и погодные условия в начале и в ходе снеготаяния. Низкое промерзание почвы осенью, слабая ее увлажненность и высокая скважность – создают предпосылки для формирования нетипичного снегового половодья. В современных условиях образования максимального стока роль состояния почвенного слоя может преобладать над всеми остальными [3].

В анализе причин специфичного хода половодья необходимо учитывать и иные условия образования, например, особенности рельефа, изрезанность склонов балками и оврагами, наличие микропонижений (западин), а также присутствие или отсутствие леса, лесных полос на водосборе, меняющих процессы снегонакопления, продолжительность залегания и схода снега, условия образования склонового стока и интенсивность поступления его в русловой поток. Снижение склонового стока [4] является важным условием трансформации максимального весеннего стока, а для малых водотоков, имеющих преимущественно поверхностное питание от талого снега и дождевой влаги, оно является решающим фактором в сохранении их как элементов гидрографической сети. Отсутствие достаточного поверхностного питания стало причиной деградации и исчезновения очень малых водотоков в бассейне реки Дон, особенно усиливающихся по направлению течения главной реки в Липецкой, Воронежской, Белгородской областях.

Современные преобразования речного стока происходят под воздействием климатических изменений. Повышение температуры приземного слоя атмосферы является мощным генератором природных процессов на земной поверхности. Рост температуры воздуха на региональном уровне сопоставим со средним значением по европейской части России, равным $0,51 \text{ }^\circ\text{C}$ за каждое десятилетие 1976-2020 гг. [9] и составляет $0,05 \text{ }^\circ\text{C}/\text{год}$.

Несмотря на то, что температура воздуха не относится к прямым факторам стокообразования, с ее динамикой активизируются процессы, непосредственно определяющие ход половодья. К ним относится повышение температуры воздуха в зимний сезон, более вариативное, чем в другие сезоны года. Рост зимней температуры способствует преждевременному сходу снегового покрова и образованию

многочисленных зимних паводков, сокращающих долю объема стока снегового половодья [5; 7; 8].

Максимальные расходы воды весеннего половодья заметно уменьшились, особенно в текущем столетии (Рис. 1).

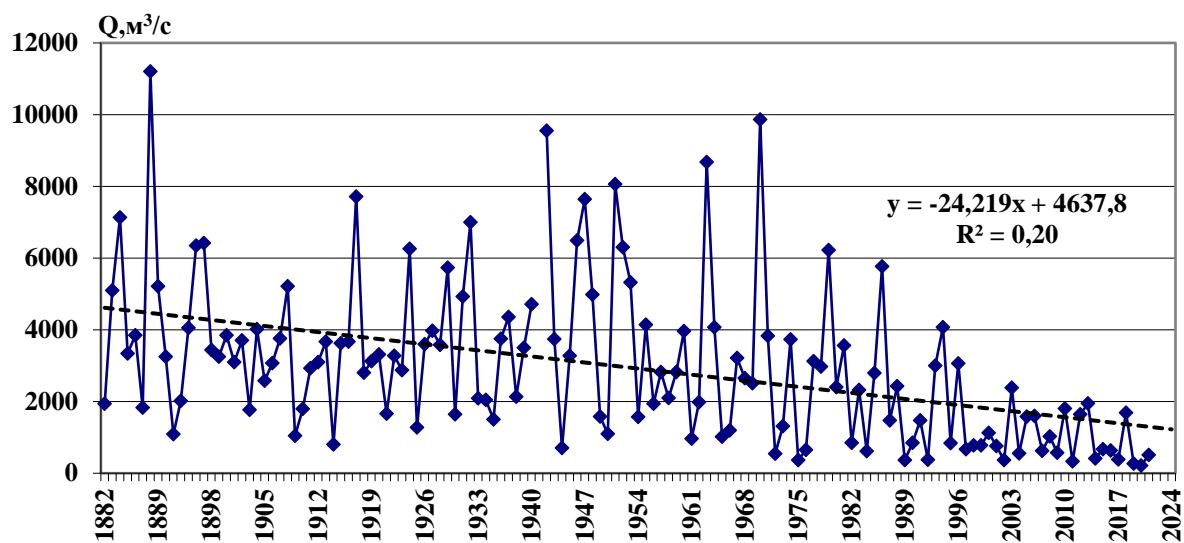


Рис. 1 Максимальные расходы воды весеннего половодья р. Дон – г. Лиски (1882-2021 гг.).

Наибольший расход воды весеннего половодья зафиксирован в 2003 году, равный 2380 м³/с. В сравнении с историческим максимумом, отмеченным в 1888 году со значением 11200 м³/с, он оказался меньше в 4,7 раза. В последующие после 2003 годы максимальные расходы приближались к этой величине лишь в 2010 (1800 м³/с) и 2013 (1950 м³/с) годах. Второе десятилетие завершилось исторически низким половодьем 2020 года с катастрофически малым максимальным расходом – 211 м³/с. Сформировалась историческая гидрологическая аномалия исключительно низкого половодья, которая обусловлена изменившимся генезисом.

В зиму 2019-2020 года по метеостанции Лиски высота снежного покрова к началу февраля составляла 49 см, что выше нормы, а запас воды в снеге 113 мм, что почти в 4 раза выше нормы. Но глубина промерзания почвы составила 27 см, что ниже нормы в 3,5 раза (Рис. 2).

Значительный приток солнечного тепла в начале февраля вызвал раннее половодье, вследствие чего пик половодья зарегистрирован 18 февраля 2020 года. За весь период наблюдений на гидропосту Лиски, начиная с 1885 по 2023 год, это самое раннее половодье от таяния снега. Продолжительность его также исторически короткая – 25 суток. Таким образом, факторы стока в сочетании с особыми метеорологическими и погодными условиями стали причиной формирования аномального гидрологического события, которое при данных природно-климатических условиях стало неизбежным и закономерным.

Вызывает интерес половодье 2023 года. По основным факторам формирования оно должно было быть среднестатистическим. Но фактически оно оказалось выше среднего за счет гидрологической аномалии осеннего сезона и зимнего промерзания почвы. Обильные и продолжительные дожди увеличили годовую сумму осадков по метеостанции Лиски до 760 мм при норме 517 мм, причем 283 мм выпало за сентябрь-октябрь месяцы. Благодаря этому образовался совершенно нетипичный для Донского

бассейна осенний паводок на реках, превысивший по уровню и расходу воды максимальные значения весеннего половодья. Так, максимальный уровень воды половодья на гидропосту Лиски составил 53 см, а максимальный уровень осеннего паводка 250 см, максимальный расход половодья 127 м³/с, а паводка 19 декабря 576 м³/с, продолжительность половодья от начала (12.03) до конца (19.04) составила 39 суток, а паводка 106 суток, начиная с 18 сентября по 31 декабря 2022 года. Фактически паводок завершился только в начале 2023 года. Осенняя инфильтрация воды была исключительно высокой. Промерзание почвы было тоже более значительное, чем в предыдущий осенне-зимний период (Рис. 2). Перенасыщенная влагой и промерзшая почва не впитывала в себя талую весеннюю воду 2023 года, и образовавшая снеговая вода стекала по склонам речной долины в русло реки. Благодаря этому сформировалось половодье, с одной стороны, атипичное, а с другой – закономерное, соответствующее природно-климатическим условиям данного сезона.

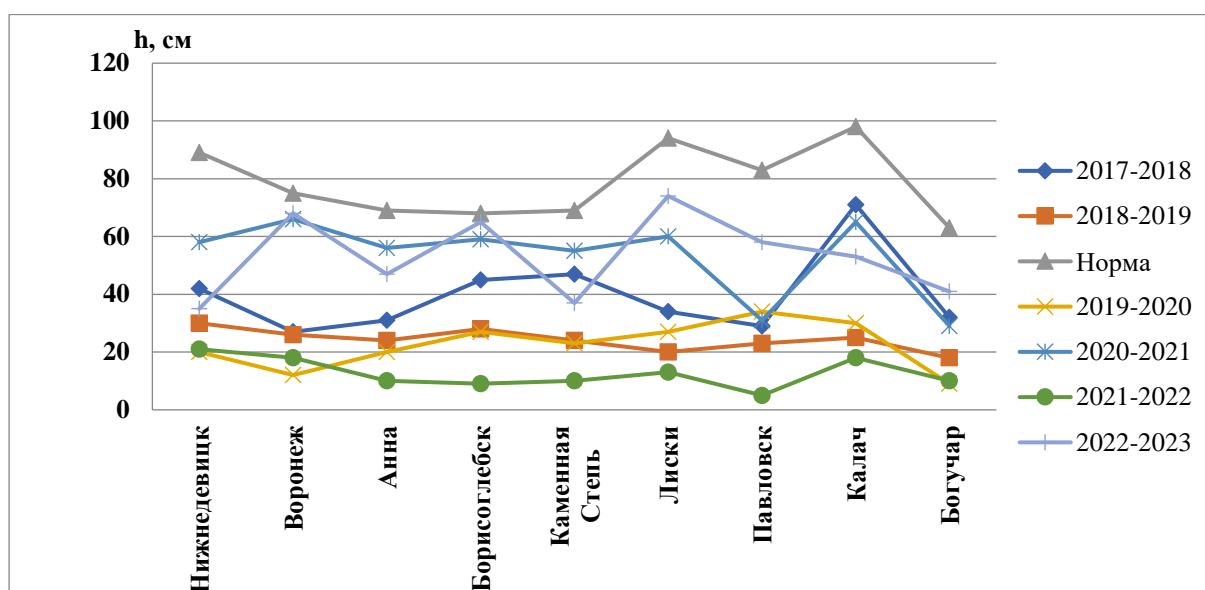


Рис. 2 Максимальная глубина промерзания почвы к началу снеготаяния.

Значительные колебания водности имеют и позитивные, и негативные последствия. Для аграрного сектора экономики, использующего аккумулированную прудовую воду, снижение объемов весеннего половодья вызывает большие сложности заполнения емкостей прудов водой для последующего ее использования по мере необходимости летом и предотвращения сезонного дефицита в воде.

Со снижением объемов половодья связано сокращение разбавляющей способности рек, поскольку они, в частности, реки Дон, Воронеж, Битюг, а также Воронежское водохранилище, являются приемниками сточных городских и промышленно-коммунальных вод. Недостаточный объем воды и прогревание ее летом с увеличивающейся температурой воды ведет к развитию водной растительности и зарастанию речных русел, особенно малых водотоков. При этом уменьшаются проточность рек и качество воды в них.

С уменьшением водности половодья снижаются риски неблагоприятных последствий от разлива рек, а затопление и подтопление территорий происходит лишь эпизодически, как, например, в 2018 году, и не носят катастрофический характер. С этих позиций экологическая и гидрометеорологическая безопасность повышается [1]. Однако, все чаще возникает вопрос об обмелении рек и исчезновении малых водотоков,

питающихся, преимущественно, от талой снеговой воды. Достаточно заметить, что по этой причине в районе расположения Нижнедевицкой воднобалансовой станции, в бассейне реки Девица, исчезли малые водотоки и вследствие этого прекращены уникальные гидрологические наблюдения, проводившиеся на логах с 1948 года.

Выводы

Анализ экстремальных половодий текущего столетия показывает, что их формирование может рассматриваться, с одной стороны, как гидрологическая аномалия, а с другой стороны, как закономерность, отвечающая современным климатическим вызовам. При этом прямые и косвенные факторы генезиса половодий могут меняться местами по роли их доминирования.

Список литературы

1. Бедрицкий А.И., Куролап С.А., Вильфанд Р.М., Дмитриева В.А. Стратегические направления обеспечения экологической и гидрометеорологической безопасности России в условиях современных климатических изменений // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. География. Геоэкология. 2019. №4. С. 5-14.
2. Дмитриева В.А. Современные изменения водного режима и морфометрии рек Верхнедонского бассейна // Известия РАН. Серия географ., 2020, № 1, С. 103–113.
3. Дмитриева В.А. Гидрологическая роль промерзания почвы в формировании стока весеннего снегового половодья // Вопросы степеведения. 2023. №1. С. 16-23.
4. Кашутина Е.А. Ясинский С.В., Коронкевич Н.И. Весенний поверхностный склоновый сток на Русской равнине в годы различной водности. Изв. РАН. Сер. географическая. 2020. № 1, С. 37 – 46.
5. Кумани М.В., Шульгина Д.В., Киселев В.В. Многолетняя динамика основных элементов стока рек в пределах Центрального Черноземья // Региональные геосистемы, 2021, 45 (4), С. 617–631.
6. Лурье П.М. Река Дон: гидрография и режим стока. Научное издание / П.М. Лурье, В.Д. Панов. Ростов-на-Дону: Донской издательский дом, 2018. 592 с.
7. Магрицкий Д.В., Сивохиц Ж.Т., Павлейчик В.М., Кисебаев Д.К. Научно-прикладное изучение стока рек в бассейне Урала в XX в. – начале XXI в. Часть 1. Сток и водный режим. Многолетние изменения // Вопросы степеведения. 2023. №1. С. 24-44.
8. Паводочный сток на реках Европейской территории России и его роль в формировании современного водного режима / М.Б. Киреева, Н.Л. Фролова, Е.П. Рец, Т.Е. Самсонов, Е.А. Телегина, М.А. Харламов, Н.Н. Езерова, О.М. Пахомова // Водное хозяйство России. 2018. № 4. С. 49-68.
9. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научное издание, 2022. 124 с.

О регулирующей роли подземного питания рек в формировании речного стока при изменении климата

С.А. Журавин, Е.В. Гуревич, М.Л. Марков*

*Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия
2014mml@gmail.com*

Аннотация. На основе данных наблюдений на водно-балансовых станциях, сети гидрологических постов в бассейнах рек среднего Дона, Северной Двины и Колымы установлено, что климатические изменения приводят к изменению регулирующей роли зоны интенсивного водообмена в формировании водного режима рек. Эта зона, охватывает верхнюю часть разреза бассейна и определяет балансовую и пространственную структуру водных потоков. Изменение регулирования потоков происходит как за счет ослабления роли криогенных процессов и явлений в речных бассейнах и руслах рек, так и за счет несинхронной реакции на эти изменения в разных звеньях гидрографической сети. В целом, это приводит к постепенной сработке водных ресурсов и запасов подземных вод зоны интенсивного водообмена. Происходит снижение сезонного и многолетнего регулирования речного стока подземными водами, которое может сказаться на увеличении частоты экстремальных маловодий и росте потерь талых вод весеннего половодья на инфильтрацию.

Ключевые слова: изменение климата, гидрографическая сеть, взаимодействие поверхностных и подземных вод.

On the regulatory role of underground river feeding in the formation of river runoff under climate change

S.A. Zhuravin, E.V. Gurevich, M.L. Markov*

*State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia
2014mml@gmail.com*

Abstract. On the basis of observations at water-balance stations and a network of hydrological posts in the basins of the middle Don, Northern Dvina and Kolyma rivers, it has been established that climatic changes lead to changes in the regulatory role of the zone of intensive water exchange in the formation of the water regime of rivers. This zone covers the upper part of the basin section and determines the balance and spatial structure of water flows. Changes in the regulation of flows occur due to weakening of the role of cryogenic processes and phenomena in river basins and river channels, as well as due to non-synchronous reaction to these changes in different parts of the hydrographic network. In general, this leads to gradual depletion of water resources and groundwater reserves in the zone of intensive water exchange. Seasonal and multi-year regulation of river flow by groundwater decreases, which may affect the frequency of extreme low-water events and the growth of spring melt water losses for infiltration.

Keywords: climate change, hydrographic network, surface and groundwater interactions.

Введение

В настоящее время возросла необходимость в оценке рисков для объектов экономики, связанных с изменениями климата. Третий оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях обращает внимание на то, что «оценки прикладных климатических показателей, в том числе характеристик экстремальности, по данным наблюдений и результатам моделирования наглядно показывают, что обновление нормативных параметров, основанное только на исторических данных, не может считаться достаточной мерой для адаптации к изменениям климата, особенно если речь идет о строительстве объектов с длительным сроком эксплуатации». Возникает вопрос, а что мы должны или можем добавлять к нашим знаниям, основанным только на исторических данных, чтобы более точно оценивать климатические риски. Цель настоящей работы показать те процессы во взаимодействии поверхностных и подземных вод, которые ранее не учитывались, но в условиях изменения климата их учет важен.

Материалы и результаты исследования

Пространственно-временные изменения взаимодействия поверхностных и подземных вод при потеплении климата рассмотрены на основе данных наблюдений на водно-балансовых станциях Нижнедевицкая, Каменная степь и Валдайский филиал ГГИ, сети гидрологических постов в бассейнах рек среднего Дона, Полонета и гидрогеологических наблюдений в бассейне реки Колымы.

Одна из главных причин возникновения нестационарности в водном режиме при потеплении климата связана с уменьшением криогенного регулирования питания и разгрузки подземных вод. Под криогенным регулированием формирования стока воды мы понимаем весь комплекс процессов, обусловленных фазовыми переходами влаги в снег и лед и протекающих в системе «снег – ледяная корка – ледовые образования в почво-грунтах при их промерзании – ледовый покров на водотоках».

Объективным показателем подземного питания рек является их минимальный сток. Многолетний ход изменений минимального зимнего стока малых и средних рек бассейна Дона свидетельствует, что рост подземного питания малых рек начался с начала повышения температуры воздуха, то есть с конца 1970-х – начала 1980-х годов и продолжался примерно до 2005-2007 гг. Далее наметилась тенденция на снижение минимального 30-суточного зимнего стока. За период наблюдений условно в этом режиме можно выделить четыре фазы: 1 – первый квазистационарный период до 1978 года; 2 – период роста минимального стока до 2010 года; 3 – период его снижения после 2010 года; далее 4 – гипотетический новый равновесный период [1-3].

Первая фаза характеризуется как стационарный режим, при котором десятками лет сохраняется баланс питания и разгрузки подземных вод при изменчивых метеорологических условиях. В этот период сохранялись относительно холодные зимы. Криогенные явления на водосборах и в руслах рек способствовали удержанию влаги в бассейнах рек. Это происходило в результате зимней миграции влаги к фронту промерзания, возникновения разницы давления воздуха в атмосфере и почво-грунтах ниже фронта промерзания, низкой пропускной способности русел ручьев и малых рек при формировании ледяного покрова и т.д. [4; 5]. В совокупности криогенные процессы, способствующие удержанию влаги в речных бассейнах назовем условно «криогенным барражем» (КБ).

Вторая стадия связана с ростом температуры воздуха, особенно в зимний период. Промерзание почво-грунтов снизилось, увеличилась инфильтрация осадков и питание подземных вод, в результате чего возросли уровни подземных вод и минимальный зимний сток рек. В этот период питание подземных вод превосходило их разгрузку. Криогенный барраж ослабевает. Растут увлажненность зоны аэрации, испарение с

почвы, поверхностный сток. Это происходит вследствие роста температуры воздуха, увеличения продолжительности тёплого периода, частых оттепелей.

При дальнейшем росте температуры воздуха криогенные явления в почве и водотоках стали менее выражены. Питание подземных вод за счет инфильтрации стабилизировалось, так как практически нет промерзания почво-грунтов. Вместе с тем, произошло ослабление КБ, ранее снижавшего разгрузку подземных вод. В результате в годы с атмосферными осадками, близкими к норме или меньше нее, при отсутствии влияния КБ расходная часть подземных вод становится больше их питания. Происходит снижение уровней грунтовых вод и меженного стока рек не только в зимний, но и в летний период года. Это третья стадия формирования водного режима в условиях потепления климата, характеризующаяся снижением ресурсов подземных вод в верхних звеньях гидрографической сети, дренирующих преимущественно грунтовые воды и, частично, подземные воды верхнего горизонта.

В зоне распространения многолетних мерзлых пород ослабление криогенного барража проявляется в сохранении в течение всей зимы подруслового стока. В таликах, гидравлически связанных с рекой, происходит постепенное истощение водных ресурсов. В холодные зимы подрусловой сток может прекращаться из-за промерзания русловых отложений. Происходит локализация стока на отдельных участках рек. Так, например, на реке Баимке (бассейн р. Колымы) в относительно теплые зимы 2017 и 2018 гг. уровень режим подземных вод в двух таликах, расположенных на расстоянии около 2 км, имел сходный режим с истощением стока в реке. В более холодные зимы 2019 и 2020 гг. русло между таликами промерзло и в верхнем по течению талике уровень поднялся из-за подпора и прекращения стока вниз по течению на 1,5 м, а в нижнем талике он опустился на 3 м (по данным наблюдений за уровнем подземных вод АО «ГИДЭК» в течение 2016-2021 гг.). То есть, можно сказать, что холод удерживает воду в речных бассейнах криолитозоны. Некоторые поселения здесь используют воду таликов для водоснабжения. При потеплении режим этих таликов может существенно измениться.

В отношении четвертой стадии в эволюции формирования водного режима территорий при потеплении климата можно пока только предположить для лесостепной и степной зоны, что на питание и разгрузку подземных вод уже не будут влиять криогенные явления и процессы из-за их отсутствия. Для этой стадии на баланс между питанием и разгрузкой подземных вод будут влиять ход атмосферных осадков и испарение. Так как испарение с ростом температуры может вырасти, то рассматриваемый баланс может наступить при более низких уровнях подземных вод, чем это было в предыдущий стационарный период. Произойдет снижение общей обводненности речных бассейнов, о чем уже начали свидетельствовать данные зондирования земли с помощью спутниковых данных GRACE [6]. Также об увеличении разгрузки подземных вод по сравнению с их питанием косвенно указывает преобладание нисходящих потоков влаги в зоне аэрации [7].

Исследование многолетней изменчивости разгрузки подземных вод в реки и оценки в этом роли изменения климата выполнено по материалам многолетних наблюдений на экспериментальных водосборах ВФ «ГГИ» [8].

В основе расчетов была использована методика, которая позволяет оценить вклад разных звеньев гидрографической сети в стоке реки в замыкающем створе [9]. В расчетах использованы данные о стоке по постам на логе Таежном ($F=0,45 \text{ км}^2$), рекам Соменке ($F=33,9 \text{ км}^2$), Лоннице ($F=48,3 \text{ км}^2$); постами на р. Полометь: д. Дворец ($F=432 \text{ км}^2$) п. Яжелбицы ($F=631 \text{ км}^2$), д. Ермошкино ($F=1180 \text{ км}^2$) и д. Лычково ($F=2200 \text{ км}^2$).

Установлено, что годовой сток в реке Полометь у д. Лычково незначительно вырос в последние 40 лет (примерно с 19 до 23 м³/с). Годовые осадки в последние четыре десятилетия выросли почти на 90 мм, что увеличило сток реки на 40 мм. Рост

температуры воздуха, снижение промерзания почвы, увеличение осадков приводят к росту питания подземных вод. Но это пока почти не нашло отражения в многолетней динамике среднего годового подземного питания реки. Изменился только относительный вклад подземного питания в речном стоке (Рис. 1).

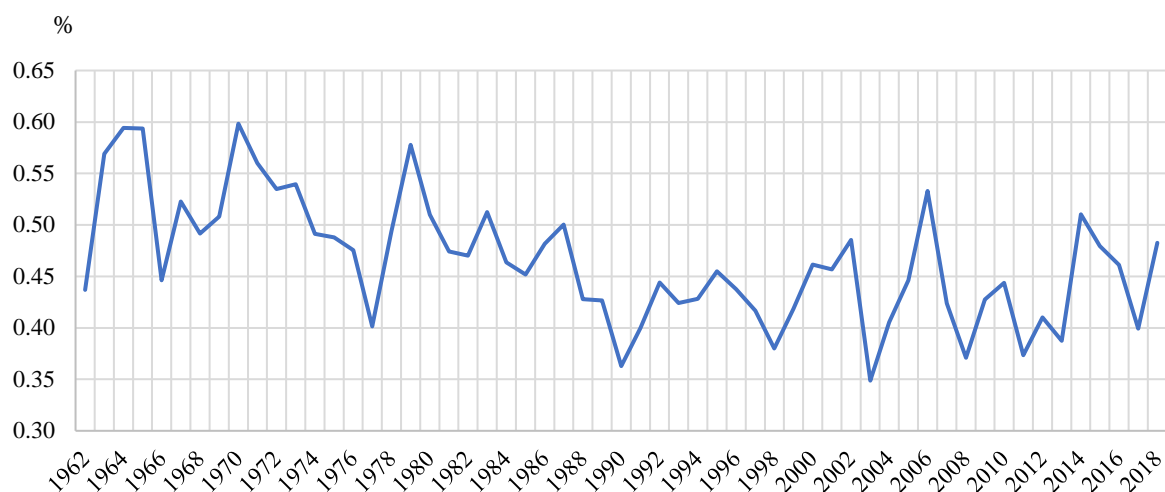


Рис. 1 Доля питания подземными водами в речном стоке.

Основные климатообусловленные изменения в годовом стоке произошли в его пространственном режиме. На Рис. 2 показано изменение среднего многолетнего за два периода линейного модуля стока, сформированного на разных, равноудаленных от истока, участках гидрографической сети. По рисунку видно, что за последние четыре десятилетия годовое питание верхних звеньев гидрографической сети выросло почти на 40% и незначительно (на 9 %) сократилось в нижних. Это объясняется тем, что на Валдае уровни грунтовых вод в моренных отложениях находятся близко к поверхности (в среднем 0,5-3 м). При высоких уровнях стояния грунтовых вод, особенно в зонах транзита и разгрузки, малой свободной емкости зоны аэрации в периоды снеготаяния и выпадения значительных по слою и/или интенсивности осадков возникает эффект «подпертого стока», который повышает долю поверхностного и внутрипочвенного стока на малых водотоках, но, соответственно, снижает долю питания подземных вод более глубоких горизонтов [1].

Выводы

Криогенные явления и процессы в речных бассейнах и руслах рек участвуют в регулировании баланса между питанием и разгрузкой подземных вод. Произошедшее потепление климата приводит к нарушению этого баланса, сложившегося до 80-х годов XX века. В зависимости от гидрогеологических и мерзлотных условий могут наблюдаться различные изменения в соотношении приходной и расходной части подземного стока в зоне интенсивного водообмена. В одних районах начинает преобладать питание подземных вод, в других, особенно с длительным зимним периодом, их разгрузка. При этом нарушение баланса отличается в разных звеньях гидрографической сети из-за различий во взаимодействии поверхностных и подземных вод. В верхних звеньях быстрее происходит рост разгрузки подземных вод с постепенным снижением их уровней и ресурсов. А в нижних, наоборот, в начальный период потепления преобладает питание над разгрузкой подземных вод. Здесь могут расти уровни грунтовых вод, происходит активизация экзогенных процессов, оврагообразования и подтопление территорий.

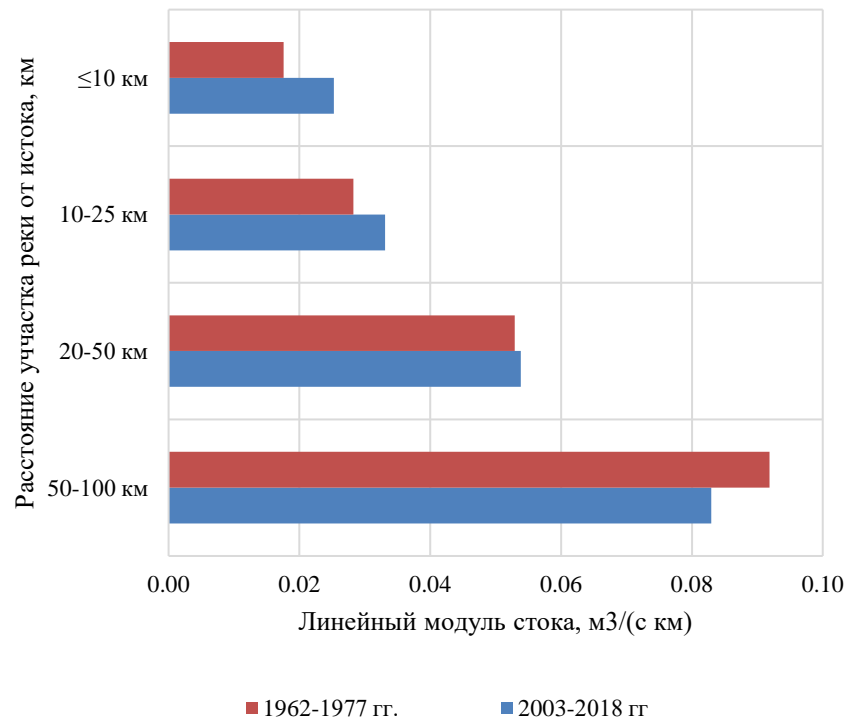


Рис. 2 Изменение осреднённого за два периода годового питания разных, равноудаленных от истока, участков гидрографической сети (р. Полометь – д. Лычково).

При сохранении тенденции изменения климата следует ожидать, что более интенсивная разгрузка подземных вод в верхних частях речных бассейнов постепенно будет охватывать и ниже расположенные звенья гидрографической сети. В целом, происходящее снижение роли криогенных явлений и процессов в формировании гидрологического режима рек приводит к постепенной сработке водных ресурсов зоны интенсивного водообмена. Снижение ресурсов и запасов подземных вод уменьшит их сезонную и многолетнюю регулирующую роль в речном стоке. Следствием этого будет увеличение частоты экстремальных маловодий и рост потерь талых вод весеннего половодья на инфильтрацию с существенным изменением внутригодового распределения стока.

Существующие в настоящее время методы определения расчётных гидрологических характеристик в инженерной практике основаны преимущественно на исторических данных и выявленных статистических и динамико-стохастических закономерностях в процессах формирования стока в условно «стационарный» климатический период. Эти закономерности не подходят для современного нестационарного климатического периода на территориях, где большую роль в водном режиме играют криогенные процессы. Поэтому необходима корректировка нормативных документов, особенно если речь идет о строительстве объектов с длительным сроком эксплуатации. Эта корректировка должна учитывать существование длительного нестационарного периода. Как показали результаты исследований на воднобалансовых станциях лесостепной зоны, переходный период здесь от одного «квазистационарного» режима к следующему составляет не менее полувека. Вероятно, в северных районах он будет длиться гораздо больше (если сохранится современная тенденция изменения климата). Для исследований формирования стока в нестационарных климатических условиях необходимы

комплексные наблюдения за всеми элементами тепловлагооборота в разных природных зонах. Основная научная цель этих исследований – понять механизм, пределы и эволюцию адаптации водного режима территорий к изменениям климата с учетом роли смены ландшафтов.

Список литературы

1. Журавин С.А. Исследование процессов влагооборота на воднобалансовых станциях в России. Монография. – СПб, 2022. – 224 с.
2. Журавин С.А., Гуревич Е.В., Марков М.Л. Многолетние изменения процессов влагооборота по данным воднобалансовых станций в центральной части бассейна р. Дон // Водные ресурсы. -2020.- Т. 47. -№ 6. С. 729-741.
3. Многолетние изменения элементов водного баланса на воднобалансовых и болотных станциях. Научно-прикладной справочник под ред. М.Л. Маркова (электронный). —Санкт-Петербург, 2020. Электронный ресурс: http://www.hydrology.ru/ru/izdaniya_ggi_New.
4. Лавров С.А., Марков М.Л. Оценка влияния атмосферного давления на уровень и сток грунтовых вод. // Инженерные изыскания. Том XII №11-12/2018. С.44-51.
5. Марков М.Л., Гуревич Е.В. О влиянии ледяного покрова на подземную составляющую речного стока. Гидросфера. Опасные процессы и явления. -Том 1. -Вып.4. -2019. С.477-489.
6. Савин И.Ю., Марков М.Л., Овечкин С.В., Исаев В.А. Тренд общей обводненности европейской части России, выявленный по спутниковым данным GRACE // Бюллетень Почвенного института им. В.В.Докучаева. -Вып. 82. -2016 г. С.28-40.
7. Лавров С.А. Влияние климатических изменений на вертикальный влагообмен в почвах (на примере бассейна реки Волги) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. -2021. -№ 4. С. 47–66.
8. Научно – прикладной справочник: Многолетние изменения элементов водного баланса на воднобалансовых и болотных станциях. [Электронный ресурс]– СПб.: ООО "РИАЛ". -2021. - 202 с.
9. Марков М.Л. Пространственно-временная динамика взаимосвязи поверхностных и подземных вод. Сборник по гидрологии. Вып.25. СПб: Гидрометеиздат, 2002. С.90-104.

Моделирование стока с верхового болота с использованием сценариев изменения климата до 2060 года (на примере болота Ламмин-Суо)

А.Д. Журавлева*, Т.В. Скороспехова, Л.С. Курочкина, Е.Н. Грек

*Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург
a.d.zhuravleva@gmail.com*

Аннотация. В работе произведена оценка изменений гидрологического режима верхового болота на основе различных климатических сценариев. В качестве объекта исследования было выбрано репрезентативное для Северо-западного региона России верховое болото Ламмин-Суо, на котором ведутся непрерывные гидрометеорологические наблюдения с 1950 года. Моделирование формирования стока для болота Ламмин-Суо было произведено с помощью модели HBV с использованием различных климатических сценариев с 2021 г. по 2060 г. Значения параметров модели были определены в процессе моделирования стока за стационарный период с 2006 г. по 2022 г. Оценка будущих изменений климата для исследуемой территории была выполнена на основе данных климатического моделирования проекта CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6). Представлены расчеты по 2-м сценариям socio-экономического развития SSP2-4.5 и SSP5-8.5. На основе смоделированных данных об объемах стока с верхового болота была произведена оценка уровня режима болота, а также дан прогноз ландшафтных изменений.

Ключевые слова: гидрологическое моделирование, сток с болот, изменение климата, HBV, уровень болотных вод.

Simulation of runoff from the ombrotrophic mire based on climate change scenarios up to 2060 (using the example of the Lammin-Suo peatland)

A.D. Zhuravleva*, T.V. Scorospekhova, L.S. Kurochkina, E.N. Grek

*State Hydrological Institute, Saint-Petersburg
a.d.zhuravleva@gmail.com*

Abstract. The paper evaluates the changes in the hydrological regime of the upper swamp on the basis of various climatic scenarios. The Lammin-Suo peatland, representative of the Northwestern region of Russia, was chosen as the object of the study, where continuous hydrometeorological observations have been conducted since 1950. Modeling of the flow formation for the Lammin-Suo peatland was carried out using the HBV model using various climatic scenarios from 2021 to 2060. The values of the model parameters were determined in the process of modeling the runoff for the stationary period from 2006 to 2022. The assessment of future climate changes for the study area was carried out on the basis of climate modeling data from the CMIP6 project (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6). Calculations on the 2nd scenarios of socio-economic development SSP2-4.5 and SSP5-8.5 are presented. Based on the simulated data on the volume of runoff from the ombrotrophic mire, the level regime of the swamp was assessed, as well as a forecast of landscape changes was given.

Keywords: hydrological modeling, peatland runoff, climate change, HBV, peatland water level

Введение

Болотные экосистемы под воздействием изменения климата активно трансформируются [6]. Климатические изменения влияют прежде всего на сток и уровни болотных вод, которые в свою очередь изменяют состав растительности на болоте. Изменения в болотных фитоценозах на болотах Северной Европы отмечаются все чаще [5], преимущественно регистрируется увеличение доли древесной растительности на верховых болотах. Климатические и гидрологические модели позволяют оценить степень изменчивости гидрологического режима болот. Для оценки будущих изменений использовались сценарии SSP2-4.5 (Shared Socioeconomic Pathway 2-4.5) и SSP5-8.5 (Shared Socioeconomic Pathway 5-8.5) проекта CMIP6, которые являются двумя различными проекциями будущего, разработанными для описания возможных траекторий развития мировой экономики, социальных структур и энергетического потребления. Основное различие между этими сценариями заключается в уровне эмиссий парниковых газов и глобальной экономической динамике. SSP2-4.5 представляет собой умеренный сценарий с устойчивым развитием и снижением выбросов парниковых газов. SSP5-8.5 представляет собой сценарий быстрого экономического роста и значительных выбросов парниковых газов, основанный на использовании ископаемого топлива [7].

Целью исследования является оценка гидрологического режима верхового болота в условиях изменения климата и прогноз ландшафтных изменений на основе анализа связи уровней болотных вод и расходов воды.

Материалы и методы

Болото Ламмин-Суо располагается на Карельском перешейке, в 8 км от Зеленогорска (60.243541 с.ш., 29.815533 в.д.). Болото Ламмин-Суо является типичным примером верховых болот Карельского перешейка, расположенных в межкамовых котловинах, достигших грядово-мочажинной стадии развития. Превышение купола над окрайками болота составляет 2,5–3 м. Болотный массив имеет вытянутую форму, длина его составляет 2 км, ширина около 1 км, площадь около 2 км². Растительные сообщества сменяются в направлении от купола болота к его краям, в соответствии направлению линий стока (Рис.1).

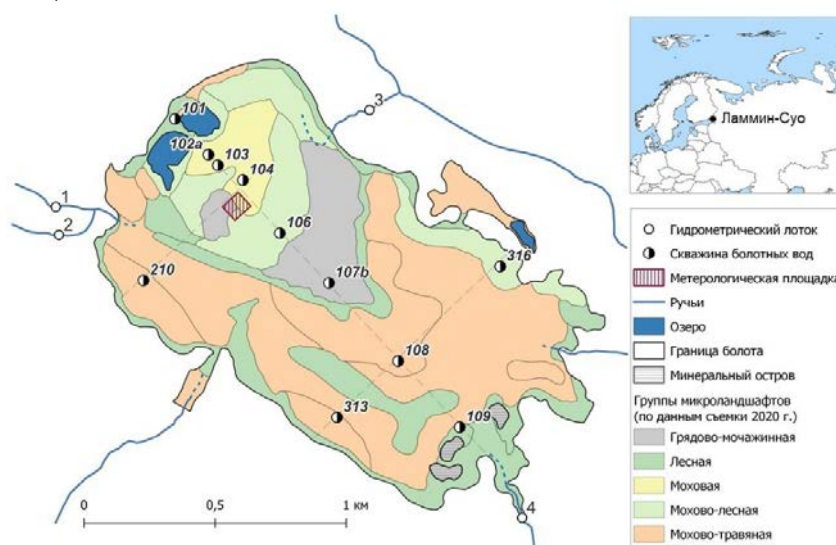


Рис. 1 Расположение пунктов наблюдения на болоте Ламмин-Суо.

Болото относится к верховому (олиготрофному) типу, основная влага поступает на болото с атмосферными осадками. Помимо этого, существует небольшой приток воды за счет склонового стока с камово-озовой гряды, расположенной на северо-западной окрайке болота. Сток с болота происходит через ручьи: 4 постоянных и 2 временных.

С 1950 года на болоте Ламмин-Суо располагается экспериментальная болотная станция Государственного гидрологического института. Одной из задач станции является изучение водного режима верхового болота, типичного для Карельского перешейка. Более 70-ти лет здесь ведутся непрерывные наблюдения за гидроклиматическими характеристиками, включая стандартные метеонаблюдения на болоте и прилегающем суходоле, и элементами водного баланса (испарение, уровни болотных вод, сток болотных ручьев) [1].

Оценка будущих изменений климата для исследуемой территории была выполнена на основе данных климатического моделирования проекта CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6). Расчёты проводились по 2-м сценариям социально-экономического развития SSP2-4.5 и SSP5-8.5.

Для прогнозирования стока воды с верхового болота Ламмин-Суо была использована водно-балансовая концептуальная модель с сосредоточенными параметрами HBV (версия программы HBV-light 4.0.0.16). Модель преобразует осадки в сток воды через расчет снегонакопления и снеготаяния, изменения влажности почвы и испарения, трансформации стока [4]. Параметры модели определяются вручную и в процессе калибровки, в соответствии с лучшими значениями критериев качества (коэффициента Нэша-Саттклифа (NSE), критерия Клинга-Гупты (KGE), коэффициента детерминации (R^2)). Для расчета использовались ежедневные данные о температуре воздуха и осадках, а также значения потенциальной эвапотранспирации, полученные на основе измеренных значений испарения на болотной станции. В качестве проверочных данных использовались ежедневные расходы воды в замыкающих створах на трех болотных ручьях (ручьи Южный (1,18 км²), Северный (0,37 км²) и Западный (0,32 км²)). Калибровка и верификация модели HBV для болота Ламмин-Суо проводились за период 2006-2022 гг., выделенный как последний стационарный период в процессе анализа однородности рядов данных [2]. Оценка будущего стока с болота Ламмин-Суо за период с 2021 по 2060 г проводилась на основе определенных значений параметров модели за стационарный период и данных климатического моделирования.

Для оценки уровней болотных вод на болоте Ламмин-Суо за 2021-2060 гг. были использованы результаты моделирования стока по болотным ручьям за аналогичный период. Согласно Иванову [3], положение среднегодовых уровней болотных вод определяет гидрологический режим болота и в том числе сток с болота через водотоки. Для выявления тесноты связи между уровнями болотных вод и расходами воды были рассчитаны коэффициенты корреляции за период 2006-2022 гг. с пороговым значением 0,6. При значении коэффициента корреляции 0,6 и выше статистическая взаимосвязь двух величин определялась как надежная с возможностью применения уравнения регрессии.

Результаты

Климатический прогноз по сценариям (SSP2-4.5 и SSP5-8.5)

В качестве климатических характеристик для оценки изменения климата использовались среднемесячные температура воздуха и количество осадков. Месячные отклонения климатических характеристик были получены по ансамблю из 33-х глобальных климатических моделей от базового исторического периода 1995-2014 гг. для 2-х будущих периодов: 2021-2040 гг. и 2041-2060 гг. [8]. В качестве обобщающей величины по ансамблю моделей использовалось значение медианы.

Отклонения температуры воздуха ожидаются преимущественно положительными. Наибольшее увеличение температуры отмечается для зимнего периода (до 3,1°C по сценарию SSP5-8.5 и 2,7°C по сценарию SSP2-4.5 к 2041-2060 гг.). Осенний и летний сезоны характеризуется более низкими значениями отклонений температуры воздуха в пределах 1,8 и 2,5°C к середине столетия по сценариям SSP2-4.5 и SSP5-8.5 соответственно.

Распределение отклонений сумм осадков по сезонам характеризуется наибольшими значениями также в зимний период (до 10% по сценарию SSP2-4.5 и 13% для SSP5-8.5 к 2060 году). В весенний и осенний сезоны также отмечается рост количества осадков по всем сценариям социальноэкономического развития. Осадки летнего периода по всем сценариям радиационного воздействия прогнозируются с большой неопределенностью.

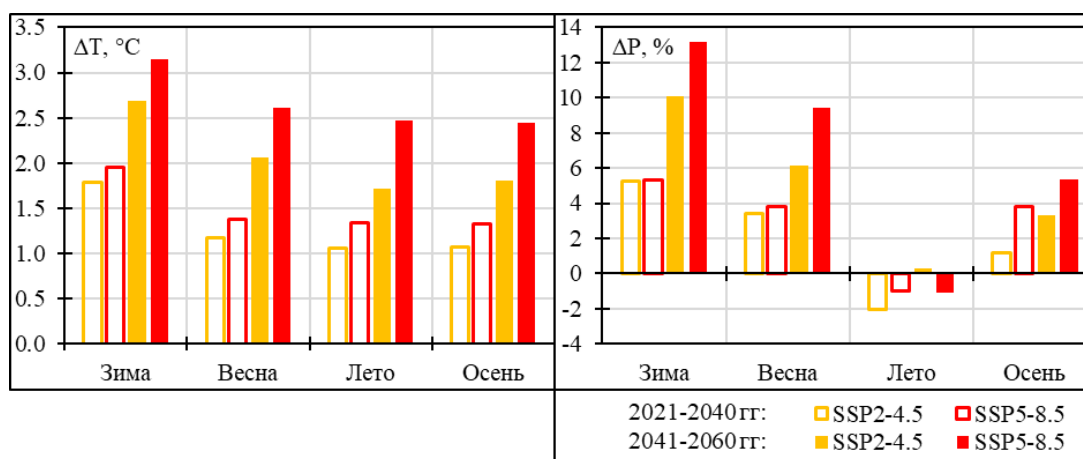


Рис. 2 Отклонения сезонной температуры воздуха и количества осадков от исторического периода для 2-х сценариев радиационного воздействия SSP2-4.5 (оранжевый) и SSP5-8.5 (красный).

Моделирование стока по климатическим сценариям

На первом этапе моделирования стока с болота Ламмин-Суо была проведена калибровка параметров модели за период 2006-2016 гг. Полученные значения параметров модели использовались в процессе верификации за период 2017-2022 гг. Количественная оценка точности расчетов речного стока проводилась с применением критериев NSE, KGE, R². Величины критериев качества за периоды калибровки и верификации в среднем составили NSE – 0.68, KGE – 0.7, R² – 0.7. Наилучшие результаты были получены для руч. Западного, из 17 расчетных лет для 10 критериев NSE был больше 0.8, а максимальная величина составила 0.89, минимальная 0,41. По ручью Южному максимальное значение критерия NSE составило 0.84, минимальное – 0.33. При моделировании стока ручья Северный в 1 год из 17 расчетных значение критерия NSE оказалось отрицательным (-0,55), при этом среднее значение за весь период расчета составило 0,59, а максимальное значение – 0.88. Поэтому полученные результаты моделирования могут трактоваться как удовлетворительные для всех исследуемых болотных водосборов.

Значения параметров модели за стационарный период (2006-2022 гг.) использовались для прогнозирования стока болотных ручьев до 2060 года. Среднегодовые расходы воды на ручьях Южный и Северный показали положительную динамику в периоды 2021-2040 гг. и 2041-2060 гг. в сравнении с расходами за стационарный период. На ручье Западном отмечается уменьшение среднегодовых

расходов воды в период 2021-2040 гг., а затем незначительное увеличение в период 2041-2060 гг. (Табл. 1).

Табл. 1 Среднегодовые расходы воды по ручьям болотного массива Ламмин-Суо за стационарный период наблюдений (2006-2020 гг.) и за периоды климатических проекций по сценариям SSP2-4.5 и SSP5-8.5.

Ручей	Qср. 2006-2020 гг.	Qср. 2021-2040 гг.		Qср. 2041-2060 гг.	
		SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
Южный	15250	18228	18627	19435	19995
Северный	3952	5807	5911	6139	6306
Западный	5111	4920	5028	5220	5371

Анализ уровня режима

За период 2006-2022 гг. были проанализированы среднегодовые значения уровней болотных вод и расходов воды в ручьях. Значимая связь между значениями расхода воды и отметками уровня болотных вод была определена для 4 из 11 скважин (коэффициент корреляции выше 0,6).

На водосборе ручья Северного скважины болотных вод отсутствуют. Самый большой по площади водосбор ручья Южного (1,18 кв²) не был использован для прогноза изменения уровней из-за недоучета стока с данной части болота. В восточной части водосбора ручья Южного с болота вытекает временный водоток, сток из которого ранее наблюдался только в период весеннего половодья. В последнее десятилетие водоток выработал русло и превратился в постоянный. Помимо этого, севернее устья ручья Южного сформировался дополнительный водоток. Недоучет стока с болота, через сформировавшиеся водотоки не позволил установить надежную связь между стоком воды с болота и уровнями болотных вод на скважинах водосбора ручья Южного.

Для прогноза изменения уровней болотных вод в период 2021-2060 гг. был выбран водосбор ручья Западного, расположенного в северо-восточной части болота Ламмин-Суо и занимающего площадь 0,32 кв². На данном водосборе расположены пять скважин, для четырех из которых была определена значимая связь между значениями расхода воды ручья Западного и отметками уровня болотных вод. Рассчитанные значения среднего, максимального и минимального уровней болотных вод за период 2021-2060 гг. приведены в Табл. 2.

Табл. 2 Уровни болотных вод на водосборе ручья Западного (измеренные и рассчитанные на период 2021-2060 гг.)

Вид данных	Тип микроландшафта / скважина	Средние годовые уровни болотных вод, см		
		макс	ср	мин
Измеренные	101 (лесной)	-12	-18	-23
	102a (моховой)	-12	-21	-34
	103 (моховой)	-11	-20	-34
	104 (моховой)	-8	-20	-34
Прогноз на период 2021-2060 по модели SSP2-4.5	101	-15	-19	-22
	102a	-17	-21	-25
	103	-12	-16	-20
	104	-10	-15	-20

Обсуждение и выводы

Анализ результатов климатического и гидрологического моделирования показывает несущественную разницу между сценариями SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Разница среднегодовых расходов воды по исследуемым болотным ручьям составила 2-2,5%. Поэтому для оценки уровня режима болота до 2060 года использовались данные моделирования только по сценарию SSP2-4.5.

По данным моделирования на скважинах 101 и 102а, расположенных вблизи озер, значительных изменений уровня режима не ожидается. На скважинах 103 и 104, расположенных вблизи купола болота, средний годовой уровень болотных вод вырастет на 4-5 см, при этом минимальный уровень повысится на 14 см. Такие изменения положения болотных вод могут привести к смене растительности с моховой на мохово-травяную. Ожидаемый подъем уровня болотных вод на данном участке болота, может неблагоприятно сказаться на древостое, и привести к постепенной гибели растущих здесь сосен. При этом продолжение облесения прогнозируется для краевых частей болота, особенно на водосборе Южного ручья, где сформировавшиеся за последние десятилетние водотоки будут увеличивать разгрузку болота и снижать уровень болотных вод.

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод, что верховые болота остаются достаточно устойчивыми к будущим изменениям климата, изменения стока на болоте происходят неравномерно, но, в целом, показывают положительную динамику.

Список литературы

1. Батуев В.И., Новиков С.М. Гидрометеорологический режим и водный баланс верховых болот Северо-Запада России, СПб: Свое Издательство, 2019, 448 с.
2. Журавлева А.Д., Скороспехова Т.В. Математическое моделирование стока с олиготрофных болот в условиях нарушения стационарности временных рядов (на примере болота Ламмин-Суо) //Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития», Санкт-Петербург, 21-23 марта 2023. С. 203-207.
3. Иванов К.Е. Водообмен в болотных ландшафтах, Ленинград, Гидрометеиздат, 1975, 280 с.
4. Bergstrom, S. The HBV Model. In: Singh, V.P., Ed, Computer Models of Watershed Hydrology // Water Resources Publications, Highlands Ranch, 1995, P. 443-476.
5. Edvardsson, J., Hansson, A. Multiannual hydrological responses in Scots pine radial growth within raised bogs in southern Sweden. //Silva Fennica, Vol. 49 №4, article id 1354.
6. Nancy, B.D. Peatland Response to Global Change // Science, 2009, P. 810-811.
7. IPCC (2021a) Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change/ Masson-Delmotte. V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Phan, S. Berger, N. Caud. Y. Chen, L. Gold-farb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. May-cock, T. Waterfield, O. Yeleki, R. Yu, and B. Zhou (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, 39 p.
8. IPCC WGI Interactive Atlas: <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>

Использование спутниковой альтиметрии в задачах гидродинамического моделирования уровня режима арктических рек

Е.А. Захарова^{1*}, И.Н. Крыленко¹, П.П. Головлев², А.А. Лисина¹, А.А. Сазонов¹,
Н.К. Семенова¹

¹*Институт Водных Проблем РАН, г. Москва, Россия*

²*Московский Государственный Университет, г. Москва, Россия*
zavocado@gmail.com

Аннотация. Гидродинамические модели позволяют воспроизводить характеристики водного режима и затопления на протяженных участках рек с большой детальностью. В последнее время для обеспечения точности моделирования стали широко использоваться спутниковые наблюдения, в частности, оптические и радиолокационные снимки – для валидации площадей затопления. Реже проводится сравнение смоделированных уровней воды с данными измерений альтиметрических спутников. В работе проведено сопоставление результатов моделирования уровней воды на основе одномерной гидродинамической модели MIKE11 DHI для участка р. Колымы (от села Колымское до поселка Черский) и на основе двумерной гидродинамической модели STREAM_2D для р. Лены у г. Якутск с данными альтиметрических спутниковых измерений в разные фазы водного режима. При валидации одномерной гидродинамической модели на р. Колыма коэффициент корреляции между модельными и спутниковыми рядами уровней варьировал от 0.80 до 0.91 в зависимости от выбранного створа, на р. Лена при валидации двумерной модели составил 0.94-0.95. Для зимнего периода сравнивались альтиметрические и модельные уровни воды с подключением и без подключения ледового блока гидродинамической модели, что позволило проанализировать особенности отражения сигнала альтиметрического спутника в различных природных условиях с учетом типа поверхности льда (гладкий лед, торосы, шуга в русле). Было показано, что в условиях гладкого льда на р. Колыма спутниковый сигнал воспроизводит высотные отметки положения водной поверхности подо льдом, т.е. отражение происходит от поверхности раздела “лед-вода”. В условиях шугохода и ледостава с большим количеством торосов на р. Лена спутниковый сигнал отражается от поверхности льда.

Ключевые слова: гидродинамическое моделирование, спутниковая альтиметрия, арктические реки.

Use of satellite altimetry in hydrodynamic modeling of water level regime of the Arctic rivers

E. Zakharova¹, I. Krylenko¹, P. Golovlev², A. Lisina¹, A. Sazonov¹, N. Semenova¹

¹*Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*
zavocado@gmail.com

Abstract. Hydrodynamic models have been successfully used for simulation of river water level regime and flooding events. Satellite observations, in particular optical and radar images, have demonstrated high potential for validation of modelled flooded areas. Less common practice is to compare modelled water levels with altimetric satellite measurements of water height. In this study the results of water level modelling based on the one-dimensional hydrodynamic model MIKE11 DHI for the Kolyma River low reaches (from Kolymskoye to Chersky) and on the two-dimensional hydrodynamic model STREAM_2D for the Lena River near Yakutsk were compared with altimetric satellite measurements for different hydrological phases. Validation of results obtained with one-dimensional

hydrodynamic model on the Kolyma River, demonstrated the high correlation between the modelled and satellite water level time series (0.80 - 0.91); on the Lena River, the modelled water levels correlated with satellite-built series with correlation coefficient of 0.94-0.95. For the winter period, altimetric and modelled water levels obtained using or not the ice module of the hydrodynamic models allowing to suggest that altimetric satellite signal in different river ice conditions (smooth ice, hummocks, shouga accumulation) is reflected from different ice surfaces - air-ice or water-ace interfaces. It was shown that at smooth ice on the Kolyma River the satellite signal reproduces the altimetric elevations of the ice position, while on hummocking ice of the Lena River the winter altimetric levels correspond better to the ice surface.

Keywords: hydrodynamic modelling, satellite altimetry, Arctic rivers.

Введение

Спутниковая альтиметрия, предназначенная изначально для наблюдений за уровнем океанов и морей, в последнее десятилетие с улучшением качества и частоты наблюдений начинает активно использоваться при исследованиях водного режима рек. При этом большая часть мировых работ, основанных на методах спутниковой альтиметрии, посвящена водным объектам, расположенным вне зоны сезонного замерзания, т.к. наличие ледостава затрудняет интерпретацию альтиметрических измерений и расчеты уровней воды. Еще один современный метод оценки уровней воды – гидродинамическое моделирование. При наличии достаточного количества исходной информации гидродинамические модели позволяют воспроизводить характеристики уровня режима и затопления на протяженных участках рек с большой детальностью. В последнее время для обеспечения точности моделирования стали широко использоваться спутниковые наблюдения, в частности, оптические и радиолокационные снимки – для валидации площадей затопления. Реже используется валидация отметок модельных уровней воды с использованием измерений альтиметрических спутников. Мы представляем результаты совместного использования одномерных и двумерных гидродинамических моделей и альтиметрических спутниковых измерений для участков рек Колымы и Лены с учетом периода ледостава.

Материалы и методы исследования

В работе использовались данные наблюдений альтиметрических спутников Sentinel-3A и -3B и Jason-3. Расчеты уровней воды по данным альтиметрических измерений включают точную географическую выборку 20 Гц вдольтрековых радарных измерений на частотах 13.6 Гц, пространственную интерполяцию 1 Гц геофизических коррекций к 20 Гц координатам и их суммирование с радарными измерениями, а также фильтрацию выбросов, полученных в результате влияния: а) водных поверхностей в непосредственной близости от русла реки, дающих доминирующий обратный сигнал или б) высоких берегов.

Для участка р. Лены гидродинамическое моделирование выполнялось с использованием отечественного программного обеспечения (программный комплекс STREAM_2D, авт. Беликов В.В. и др.). В основу математической модели течения положены двумерные уравнения Сен-Венана в приближении “мелкой воды”. Дискретизация двумерных уравнений производится на гибридной треугольно-четырёхугольной сетке с переменным шагом (от 15-30 м в руслах до 100-300 м на поймах). В качестве входных данных для моделирования используется детальная информация о рельефе территории, включая батиметрические съемки русла. Двумерная модель STREAM_2D для широкопойменного участка р. Лены у г. Якутск протяженностью 75км (от г.п. Табага до в.п. Якутск) адаптирована ранее и применяется

для решения широкого круга научных и практических задач [1; 2]. Гидродинамическая модель STREAM_2D позволяет учитывать особенности движения водного потока при наличии ледовых явлений за счет двух дополнительных параметров, толщины льда и дополнительной шероховатости при наличии ледового покрова.

Для нижнего течения реки Колымы (участок от в.п. Колымское до п. Черский протяженностью 167 км) была впервые адаптирована одномерная гидродинамическая модель MIKE11 DHI. Одномерная схематизация потока в данном случае была выбрана ввиду ограниченных данных о рельефе – рельеф русла задавался схематично по данным о средней глубине и ширине с топографических карт, только на участке у п. Черский использовались данные лоцманской карты. Для получения высотных отметок поверхности поймы использовались цифровая модель рельефа ArcticDEM. Для учета ледовых явлений в модели MIKE 11 использовался упрощенный подход и на зимний период вводился повышенный коэффициент шероховатости на русловых участках.

В качестве граничных условий при моделировании на обоих ключевых участках использовались данные о входных расходах воды и уровнях на нижней границе моделируемой области, сведения о периодах с ледовыми явлениями при подключении ледового блока уточнялись по данным наблюдений гидрологических постов. В результате моделирования был получен временной ход характеристик водного потока в каждой ячейке модельной области при расчетах по двумерной модели и в выбранных створах при расчетах по одномерной модели.

В работе была проведена валидация модельных уровней в период открытой воды на участке между гидрологическими постами. Для зимнего периода проводилось сравнение альтиметрических и модельных уровней с подключением и без подключения ледового блока гидродинамической модели, что позволило проанализировать особенности отражения сигнала альтиметрического спутника в различных природных условиях с учетом типа поверхности льда.

Результаты и выводы

Для кроссвалидации адаптированных гидродинамических моделей и данных спутникового мониторинга было проведено сравнение уровней воды в местах пересечения спутниковых треков и речных русел за наиболее обеспеченный альтиметрическими данными период с 2019 по 2021гг. для р. Колыма (7 створов) и за 2020-2021гг. для р. Лена у г. Якутск (2 створа). Численные эксперименты для р. Колымы показали, что модельные уровни воды, полученные без учета шероховатости льда в зимний период, хорошо совпадают с уровнями воды по данным спутникового альтиметра. При валидации одномерной гидродинамической модели на р. Колыма коэффициент корреляции между модельными и спутниковыми рядами уровней варьировал от 0.80 до 0.91 в зависимости от выбранного створа. Среднее отклонение временных серий летом изменялось в диапазоне 0.20-2.63 м, а среднеквадратическая ошибка составляла 0.77-2.75 м (или 13-62% от сезонной амплитуды уровня). Полученное сравнение свидетельствует о том, что использование альтиметрических уровней, рассчитанных с использованием ретрекинга «SAMOSA», позволяет воспроизвести высотные отметки положения водной поверхности р. Колымы подолдом (Рис. а).

Для ключевого участка р. Лены у г. Якутск при сопоставлении результатов моделирования уровней воды с данными альтиметрии было выявлено, что альтиметрические данные, как в осенний период шугохода, так и при ледоставе наилучшим образом совпадают результатами моделирования при подключении ледового блока гидродинамической модели STREAM_2D (Рис. б). Коэффициент корреляции между спутниковыми и модельными рядами уровней (при подключении ледового блока) составляет 0.93–0.94, а среднеквадратическая ошибка 0.74–0.79 м.

Т.к. лед на р. Лене на участке от г.п. Табага до г. Якутск характеризуется высокой торосистостью, то наиболее вероятно, что спутниковый сигнал не способен проникать через такой тип льда. Единственным моментом, когда спутниковый сигнал показывает поверхность раздела вода-лед на р. Лена – период вскрытия реки Лены и начало ледохода. В этот момент при нарушении сплошности ледового покрова (более 50% закраин по данным г.п. Табага) уровни по данным альтиметра совпадают со смоделированными уровнями воды без учета ледового покрова.

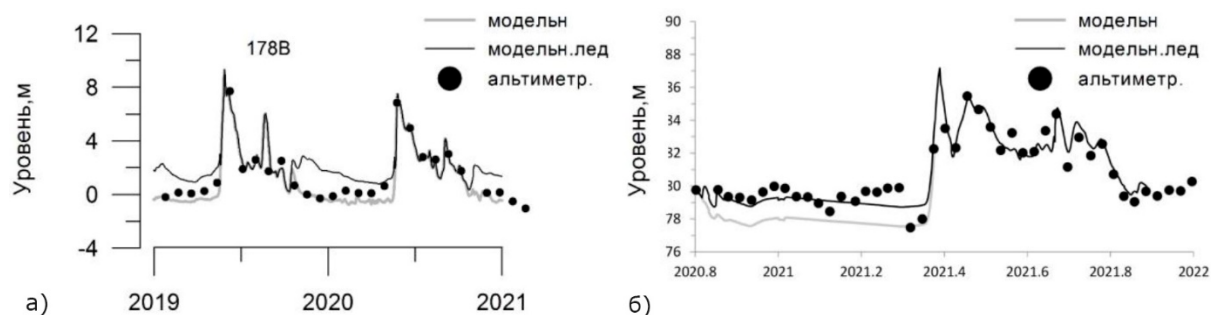


Рис. Уровни воды на р. Колыма (а) и р. Лена (б) рассчитанный по моделям (линии) и по спутниковым наблюдениям (точки).

Применение вышеописанного подхода для моделирования режима уровней воды для рек с сезонным ледоставом показало, что данные спутниковой альтиметрии могут служить для верификации гидродинамических моделей на малоизученных участках в условиях недостатка данных наземных наблюдений, а также в дальнейшем могут быть адаптированы для дополнительной настройки параметров ледового блока гидродинамической модели.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 22-27-00633 "Исследование уровня режима рек методами спутниковой альтиметрии и гидродинамического моделирования".

Acknowledgments

The work is carried out in the framework of the Russian Science Foundation project 22-27-00633 "Use of satellite altimetry and hydrodynamic modelling for investigation of river level regime".

Список литературы

1. Чалов Р.С., Завадский А.С., Ботавин Д.В., Головлев П.П., Морозова Е.А., Сурков В.В. Покровско-Якутский водный узел на реке Лене: современные деформации и управление русловыми процессами. Известия РАН. Серия географическая, 6(2019), с. 83-96. doi: 10.31857/S2587-55662019683-96
2. Golovlyov P., Kornilova E., Krylenko I., Belikov V., Zavadskii A., Fingert E., Borisova N., Morozova E. Numerical modeling and forecast of channel changes on the river Lena near city Yakutsk. // Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. 2019. Vol. 381, P. 65–71. DOI: 10.5194/piahs-381-65-2019

Результаты исследований на научном стационаре Магаданской области

А.А. Землянскова^{1,2*}, О.М. Макарьева^{1,2}, А.Н. Шихов⁴, А.А. Осташов^{1,3}, Н.В. Нестерова^{1,3}

¹Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

³Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия

⁴Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия
a.zemlyanskova@spbu.ru, anastasiazemlanskova@gmail.com

Аннотация. Междисциплинарный научно-исследовательский стационар был создан в 2020 г. В него вошли два основных объекта исследований, расположенных на Тенькинской трассе: Колымская водно-балансовая станция (основана в 1948 г.) и Анмангындинская наледь (исследования 1962–1992 гг.), а также геокриологическая сеть мониторинга в различных условиях Магаданской области и другие объекты. Цель создания стационара – исследования динамики состояния многолетнемерзлых пород и их влияния на природные процессы Северо-Востока России в меняющемся климате. В работе представлены краткие результаты за период 2020–2023 гг.

Ключевые слова: Колымская водно-балансовая станция; река Анмангында; междисциплинарные исследования; мерзлота.

Results of research at the scientific observation station of the Magadan region

A.A. Zemlianskova^{1,2*}, O.M. Makarieva^{1,2}, A.N. Shikhov⁴, A.A. Ostashov^{1,3}, N.V. Nesterova^{1,3}

¹North-Eastern State University, Magadan

²St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

³State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

⁴Perm State University, Perm, Russia

* a.zemlyanskova@spbu.ru, anastasiazemlanskova@gmail.com

Abstract. The interdisciplinary scientific observation station was established in 2020. It includes two main objects of research located on the Tenka highway: the Kolyma water balance station (founded in 1948) and the Anmangynda aufeis (data collected 1962-1992), as well as the geocryological monitoring network in various conditions of the Magadan region and other objects. The goal of the research station is to study the dynamics of permafrost and their influence on the natural processes of the North–East of Russia in a changing climate. The paper presents brief results for the period 2020–2023.

Keywords: the Kolyma water balance station; the Anmangynda river; interdisciplinary research; permafrost.

Введение

Магаданская область занимает первое место в России по добыче россыпного золота. В результате горнодобывающего производства нарушается природная система – удаляется почва и растительность, остаются отвалы пустой породы, происходит потеря биологического разнообразия, а также загрязнение рек взвешенными веществами и тяжелыми металлами. Большая площадь нарушенных земель повышает необходимость регулярного спутникового мониторинга и оценки восстановления растительности на ранее добытых территориях.

На территории области, 99% которой находится в зоне распространения многолетнемерзлых пород, формируются наледы, ежегодно причиняющие ущерб инфраструктуре. Последняя каталогизация и систематизация информации о наледных явлениях была проведена в 1958 г. и с тех пор не обновлялась. Режимные наблюдения за динамикой наледей также проводились в прошлом веке.

На территории Северо-Востока России (Магаданская область) расположены уникальные научные стационары и природные объекты, на которых мониторинг гидрологических и криогенных процессов, типичных для всего региона, а также значительных по площади горных территорий Сибири и Северо-Востока, производился на протяжении десятков лет. Это – Колымская Водно-Балансовая станция (КВБС) (пос. Стоковое), функционировавшая в период 1948-1997 гг., а также стационар Анмангындинской наледи (25 км от пос. Усть-Омчуг), на котором проводились наблюдения с 1962 г. до конца 90-х годов.

Колымская водно-балансовая станция (КВБС) располагается в верховьях р. Колымы, в горной местности (перепад высот 830–1690 м), в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты. Материалы станции систематизированы и подробно описаны в [8].

Анмангындинская наледь расположена в бассейне р. Анмангында в районе 155-159 км Тенькинской трассы (Магаданская обл.) в 30 км к юго-востоку от пос. Усть-Омчуг. Высоты водосбора р. Анмангында варьируются от 700 до 1850 м. Территория исследования характеризуется суровой зимой и коротким летом. Водосбор р. Анмангында является репрезентативным для территории Северо-Востока России, а Анмангындинская наледь является единственным объектом в мире с продолжительным рядом наблюдений за процессами наледообразования, в том числе динамикой площади и объема наледного льда. Наиболее подробно результаты исследований на этом объекте изложены в [1; 7].

Целью исследования стало возобновить режимные наблюдения на двух ключевых участках, а также обеспечить получение информации о современном состоянии природной среды Магаданской области.

Материалы и методы исследования

Дистанционные методы зондирования Земли

Оценка современной площади нарушенных при золотодобыче земель выполнялась на основе экспертного анализа космических снимков оптического диапазона Sentinel-2/MSI. Оценка восстановления нарушенных земель также выполнялась на основе расчета индекса NDVI по материалам космической съемки аппаратурой Landsat-5, 7, 8, Sentinel-2. Для визуального контроля привлекались космические снимки с ресурсов Яндекс.Карты и GoogleEarth. Подробно методика изложена в работе [9].

Современная каталогизация наледных явлений выполнялась по данным спутниковых снимков Landsat 2013–2019 гг. Использовались материалы за те даты, когда снежный покров полностью стаял и облачность не препятствует выделению ледового слоя. Для отдельных объектов был собран массив данных спутниковых снимков Landsat, Sentinel-2 за весь период наблюдений 1974–2023 гг., как в теплое время года, так и в зимний период. Подробно методика применения спутникового мониторинга для изучения наледей описана в работах [1; 7].

Метеорологические, гидрологические и геокриологические наблюдения

Восстановлены гидрометеорологические и водно-балансовые наблюдения в бассейне р. Анмангында (Рис. а,е): выполнено оборудование гидропостов (выше, ниже наледи, на ее основных притоках), автоматических метеостанций и осадкомеров в различных частях водосбора, регулярно в различные фазы гидрологического режима ведутся измерения расходов воды, выполнена снегомерная съемка в различных ландшафтах наледной поляны в период максимальных запасов снежного покрова. В октябре 2021 г. установлена снегомерная подушка для наблюдения за характеристиками снежного покрова

На территории Магаданской области в 2021–2023 гг. было пробурено и оборудовано 10 термометрических скважин глубинами от 5 до 30 м в различных ландшафтах (Рис. б),

три гидрогеологические скважины (глубина до 8 м). Наблюдения за температурой грунта ведутся автоматически с помощью логгеров, запись данных каждые 4 часа. В гидрогеологических скважинах установлены автоматические логгеры с часовой записью данных – информация о температуре и глубине воды. Каждая скважина оборудована комплексной системой наблюдения за изменением метеорологических параметров. Установлены метеорологические станции, осадкомеры, информация о динамике снежного покрова получается с помощью ежедневной фотофиксации изменения высоты снега по рейке, во время полевых выездов осуществляются контрольные наблюдения и измерения плотности снега.

Изучение гигантской наледи

Регулярные детальные аэрофотосъемки поверхности наледи и наледной поляны проводятся в целях фиксации и изучения процессов образования наледи, формирования бугров пучения, миграции источников изливающихся вод, а также для определения площади и объемов наледного тела.

Съемки ведутся с помощью квадрокоптера (Рис. ж), оснащенного антенной GNSS, что позволяет с высокой точностью (до 5 см) определять высотные отметки поверхности наледи. При использовании метода с использованием GNSS оборудования (Рис. в) построены объемные модели наледного тела в различные периоды ее формирования и разрушения. Наиболее полный ряд данных получен по Анмангындинской наледи, среди других объектов – наледи пос. Атка, рр. Нелканджа, Правая Хета, Нижняя Анмангында, а также наледь р. Кюбюме (Республика Саха, Якутия).

Специальные методы исследования

Одной из задач полевых работ являлось проведение геофизических исследований для установления мерзлотно-геологического и гидрогеологического строения ключевого участка Анмангындинской наледи, оценка объема наледи в фазу максимального ее развития.

Для решения поставленной задачи были использованы методы зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), георадиолокационный (ГРЛ) метод, электротомография в разных модификациях.

Ведется отбор проб жидких и твердых осадков на изотопный состав (Рис.г) в пос. Кулу, Усть-Омчуг, Мадаун и г. Магадан. Отбор проб речной воды на гидрохимию и изотопы ведется во время полевых выездов. Пробы на изотопы переданы для обработки в ААНИИ (г. Санкт-Петербург). Пробы на гидрохимию переданы для обработки в ИМЗ СО РАН (г. Якутск).

На ключевых участках Колымской водно-балансовой станции и бассейне р. Анмангында были проведены исследования и картирование динамики криогенных ландшафтов, в том числе составлены детальные ландшафтные планы участков.

Краткие результаты за период 2020–2023 гг. и выводы

1. Создана и функционирует круглогодичная сеть мониторинга природных процессов на ключевых участках проекта (гигантская наледь подземных вод в бассейне р. Анмангында и Колымская водно-балансовой станция). Сеть мониторинга включает две автоматические метеорологические станции, несколько сезонных осадкомерных пунктов, десять термометрических и три гидрогеологических скважины, оборудование для наблюдения за динамикой снежного покрова. В теплый период года также проводится мониторинг характеристик речного стока на нескольких гидрологических створах. За период 2020–2022 гг. получены комплексные данные высокого временного разрешения, характеризующие метеорологические, гидрологические, геокриологические и гидрогеологические условия ключевых объектов.

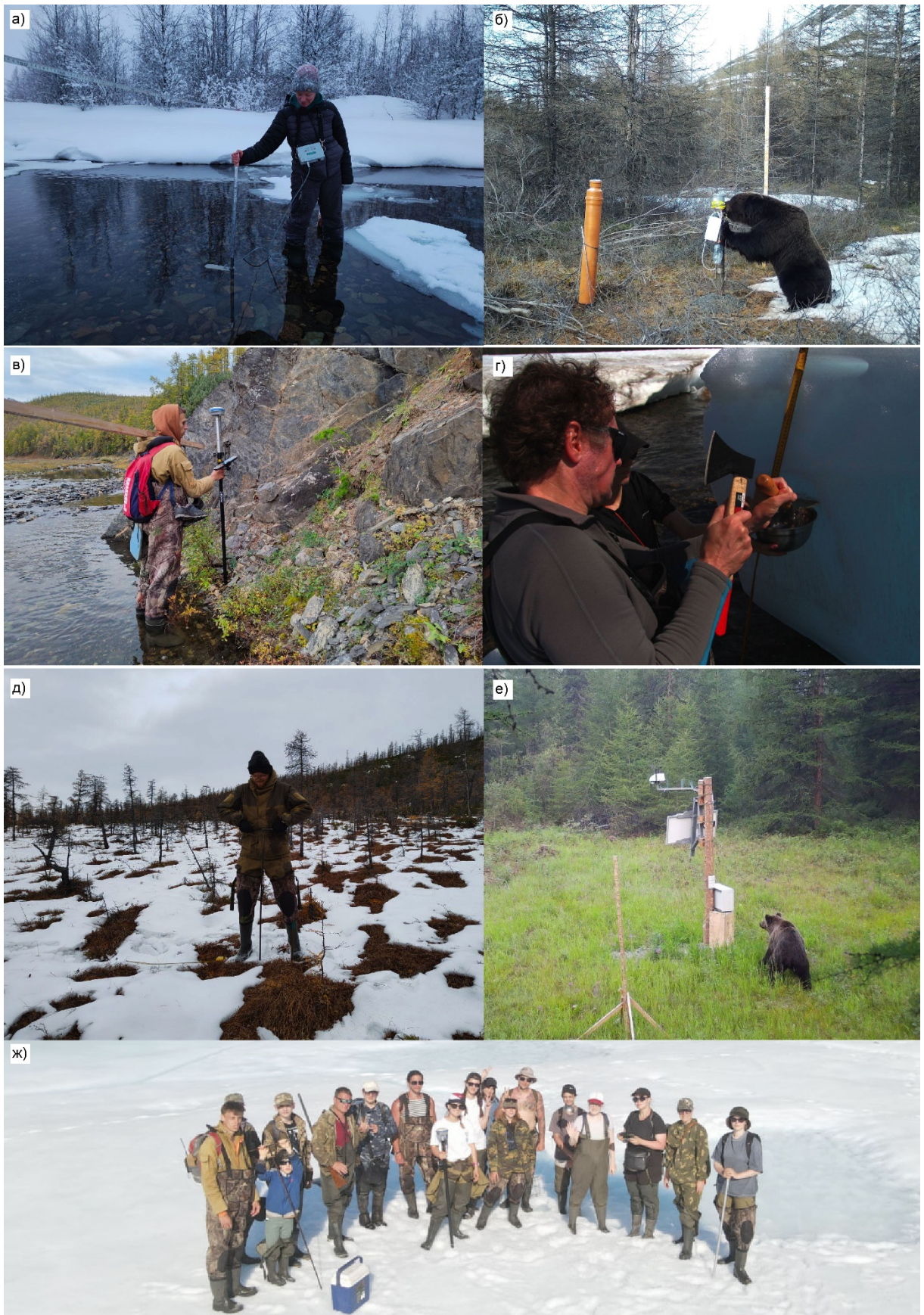


Рис. Междисциплинарные исследования на территории Магаданской области: а) гидрологические работы; б) термометрические и гидрогеологические скважины, фотофиксация снежного покрова; в) геодезические работы; г) отбор проб воды и льда; д) измерения на площадке CALM, октябрь 2022 г.; е) установка метеорологических станций и осадкомеров; ж) проведение полевых лекций.

2. На основе оборудованной сети десяти термометрических скважин глубиной до 15 м, получены актуальные данные о характеристиках мерзлоты для района (2021–2023), в котором такие исследования не проводились уже несколько десятков лет. Среднегодовая температура пород в различных скважинах составила от -0.1 до -3.8°C , глубина СТС изменялась от 0.9 до 2.6 м. Данные по скважине «Наледь» характеризуют процессы теплообмена в толще наледной поляне гигантской наледи подземных вод. Такие результаты получены впервые. В 2022 и 2023 гг. дополнительно оборудованы площадки CALM размером 100 на 100 м для наблюдений за глубиной сезонно-талого слоя (Рис. д). Средняя глубина СТС в лишайниково-сфагновом листовничном редколесье к началу октября 2022 г. составила 46 см в бассейне р. Анмангында.

3. На ключевом объекте «Анмангындинская наледь» проведены геофизические исследования наледной поляны по результатам которых были установлены каналы фильтрации подземных вод из аллювия под лед. Выделена граница сезонно-мерзлого слоя, а также верхняя граница мерзлоты. Георадиолокация совместно с методом бесконтактного электропрофилирования позволила обнаружить в толще льда линзу незамерзшей воды. Установлено наличие крупных и локальных промерзающих подрусовых таликов, из которых выжимается вода на поверхность льда. Предполагается, что некоторые каналы связаны с глубинными источниками в коренных породах. Получены сведения о строении наледной поляны, глубине залегания многолетнемерзлых пород и кровле таликов [4; 5].

4. Получен годовой цикл данных о динамике уровня и температуры подземных вод в трех гидрогеологических скважинах в бассейне р. Анмангында. Динамика уровня подземных вод в разных частях наледной поляны имеет различный характер. В зоне активного формирования наледи наблюдаются резкие колебания уровня воды в зимний период при температуре $+0.01^{\circ}\text{C}$. В части наледной поляны, где в 2021/2022 г. лед не образовывался, годовая амплитуда колебания уровня воды составила всего 40 см, что говорит о транзитном прохождении подземных вод. Данные по третьей гидрогеологической скважине, расположенной за пределами наледной поляны, выявили наличие круглогодичного талика.

5. Проведена оценка динамики площади, объема, мощности гигантской Анмангындинской наледи на основе исторических полевых материалов 1962–1990 гг., дешифрирования спутниковых снимков за 2000–2023 гг., расчетных методов и собственных полевых наблюдений. Анализ внутригодовой динамики показал, что Анмангындинская наледь из категории многолетних перешла в сезонное образование.

6. Для бассейна р. Анмангында (376 км^2) составлена ландшафтная карта масштаба 1:10 000, она дает полную информацию по ландшафтным условиям территории бассейна Анмангындинской наледи [3]. На ключевом участке Колымской водно-балансовой станции проведено исследование и картирование динамики криогенных ландшафтов, составлен детальный ландшафтный план участка масштаба 1:5000 [2]. В связи с репрезентативностью КВБС для горных территорий Северо-Востока данные о мерзлотно-геологических особенностях, почвенном и растительном покровах, особенностях снегонакопления на Колымской водно-балансовой станции в каждом типе ландшафта могут быть использованы на региональном уровне в схожих условиях.

С даты последнего опубликования информации о ландшафте на КВБС прошло больше 20 лет. За этот период район претерпел некоторые изменения. В 2017 году на станции был мощный пожар, в результате которого выгорела растительность на одном из участков водосбора (склоны водосбора руч. Северный), что требует внесения изменений в ландшафтную карту территории.

7. Отобраны более 1000 проб воды подземных источников, рек, ручьев, озер, жидких и твердых осадков, поверхностных емкостей задержания, подземного льда и проведен их анализ для определения содержания стабильных изотопов (дейтерия и кислорода ^{18}O). Изотопный состав осадков в районе исследований изменяется от -4.39% до -42.50% по $\delta^{18}\text{O}$ и от -32.40% до -337.32% по δD . Этот диапазон несколько уже, а значения тяжелее,

чем в районах Восточной Сибири, что обусловлено вкладом осадков, формирующихся в бассейне Охотского моря и Тихого океана [6].

8. На Колымской водно-балансовой станции в 2020–2022 г. проведена серия краткосрочных режимных наблюдений за уровнем и температурой воды, стоком рек на исторических постах руч. Южный, Северный, Контактный-Нижний, Встреча, Морозова. (Нестерова и др., 2022).

9. Проведено картирование нарушенных ландшафтов горной части Магаданской области в результате активного освоения регионов Магаданской области в сфере горнодобывающей промышленности. На территории 82 298 км² по данным снимков спутников Landsat-5,7,8 и Sentinel-2 было выделено 2 072 км² (2.5% от общей площади) нарушенных земель. Анализ снимков за период 2000–2021 гг. позволил выявить, что в последние годы наблюдается существенное увеличение темпов освоения золоторудных месторождений в регионе. За 20 лет появляются лишь локальные очаги растительности на обработанных землях [9].

10. Составлен современный каталог наледей Магаданской области. Определены местоположение объектов, площадь наледей, выполнена оценка вклада наледного стока в сток рек.

Процесс работы и результаты исследований освещаются на информационных площадках: ВК «[Нестандартная гидрология](#)» и Telegram «[Hot North East](#)», а также на сайте <https://coolhydro.ru/>.

Благодарности

Исследования продолжаются с 2021 г. при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках проекта № 94034170; обновление и поддержка полевого оборудования в 2023 г. проводится на средства гранта правительства Магаданской области и Российского научного фонда (проект № 23-17-20011).

Acknowledgments

Research has been ongoing since 2021 with the support of St. Petersburg State University under project No. 94034170; updating and support of field equipment in 2023 is carried out with funds from a grant of the government of the Magadan Region and the Russian Science Foundation (project No. 23-17-20011).

Список литературы

1. Землянкова А.А., Алексеев В.Р., Шихов А.Н., Осташов А.А., Нестерова Н.В., Макарьева О.М. Многолетняя динамика гигантской Анмангындинской наледи на Северо-Востоке России (1962–2021 гг.) // Лед и снег, 2023, Т.63(1), с. 71-84. <https://doi.org/10.31857/S2076673423010167>

2. Васильев, А. И. Ландшафты Колымской водно-балансовой станции / А. И. Васильев // География и краеведение в Якутии и сопредельных территориях Сибири и Дальнего Востока: материалы II Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию Якутской Автономной Советской Социалистической Республики (ЯАССР), г. Якутск, 25–26 марта 2022 г. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2022, 31–36

3. Васильев А.И. Современное состояние ландшафтов водосборного бассейна реки Анмангында // Материалы докладов всероссийской конференции с международным участием, посвященной 150-летию М. И. Сумгина, 2023, 182–186.

4. Оленченко В.В., Макарьева О.М., Данилов К.П., Осташов А.А., Калганов А.С., Землянкова А.А., Христофоров И.И., Нестерова Н.В. Геофизические признаки источников гигантской наледи на р. Анмангында (Магаданская область) // Геодинамика и тектонофизика, 2023, Т.14(3):0702. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-3-0702>

5. Потапов В.В., Макарьева О.М., Оленченко В.В. Геоэлектрическое строение разреза на Анмангындинской наледи (Магаданская область) по данным метода ЗСБ // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2022, Т. 2, №. 3, 59–65.

6. Хомякова В., Землянскова А., Екайкин А., Макарьева О., Нестерова Н., Осташов А., Тебенькова Н. Содержание изотопов кислорода в осадках в Тенькинском районе Магаданской области, 2023, 2, 100–111. 10.52002/0130-2906-2023-2-100-111.

7. Zemlianskova A., Makarieva O., Shikhov, A. et al. The impact of climate change on seasonal glaciation in the mountainous permafrost of North-Eastern Eurasia by the example of the giant Anmangynda aufeis // Catena, 2023, p. 107530. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107530>

8. Makarieva, O., Nesterova, N., Lebedeva, L., and Sushansky, S.: Water balance and hydrology research in a mountainous permafrost watershed in upland streams of the Kolyma River, Russia: a database from the Kolyma Water-Balance Station, 1948–1997 // Earth Syst. Sci. Data, 2018, 10, 689–710, <https://doi.org/10.5194/essd-10-689-2018>

9. Shikhov, A., Ilyushina, P., Makarieva, O., Zemlianskova, A., Mozgina, M. Satellite-Based Mapping of Gold-Mining-Related Land-Cover Changes in the Magadan Region, Northeast Russia // Remote Sensing, 2023, 15, 3564. 10.3390/rs15143564.

Комплексирование геофизических методов при изучении наледей

А.А. Землянскова^{1,2*}, В.В. Оленченко³, О.М. Макарьева^{1,2}, А.С. Калганов³,
А.А. Осташов^{2,4}, Н.В. Нестерова^{2,4}

¹Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

³Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

⁴Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия

a.zemlyanskova@spbu.ru, anastasiazemlanskova@gmail.com

Аннотация. На основе данных георадиолокационной съемки и зондированию методом электротомографии на участке наледной поляны гигантской Анмангындинской наледи (Магаданская область) была проведена оценка глубины сезонно-мерзлого слоя, залегания кровли мерзлых пород. Установлены границы таликовых зон, выделены области разгрузки подземных вод на поверхность наледи. Определены значения удельного сопротивления пород. Сопоставление геофизических данных, полученных разными методами, показали удовлетворительную сходимость результатов.

Ключевые слова: георадиолокация, электротомография, гигантская наледь, сезонное промерзание, река Анмангында, криосфера.

Integration of geophysical methods in the research of aufeis

A.A. Zemlianskova^{1,2*}, V.V. Olenchenko³, O.M. Makarieva^{1,2}, A.S.
Kalganov³, A.A. Ostashov^{2,4}, N.V. Nesterova^{2,4}

¹North-Eastern State University, Magadan, Russia

²St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

³Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

⁴State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

a.zemlyanskova@spbu.ru, anastasiazemlanskova@gmail.com

Abstract. Based on the data of geophysical penetrating radar survey and electrotomography sounding on the key site of the aufeis glade of the giant Anmangynda aufeis (the Magadan region), the depth of the seasonally frozen layer, the occurrence of the permafrost table was assessed. The boundaries of talik zones were established, the areas of groundwater discharge to the surface of the aufeis were highlighted. The values of the resistivity of rocks were determined. Comparison of geophysical data obtained by different methods showed satisfactory convergence of the results.

Keywords: ground penetrating radar sounding; electrical resistivity tomography; giant aufeis; seasonal freeze depth; the Anmangynda river; cryosphere.

Введение

В последние годы изучение наледей с помощью геофизических методов исследования проводится в Канаде, Монголии, на Аляске и России. Работы были проведены с помощью методов георадиолокации, электротомографии с гальваническими и емкостными заземлениями, метода ядерного магнитного резонанса, зондированием поля в ближней зоне и др. [1; 2; 5–7]. Каждый из способов имеет свои ограничения по глубине, а также количество предоставляемой информации. Одни позволяют установить границы слоя, определить его толщину, другие – показать значения удельного сопротивления пород.

Особенностью геофизических методов является то, что необходима заверка результатов с помощью бурения скважин.

В России первые работы, направленные на изучение строения наледных полей, были проведены в 1966 г. под руководством ВСЕГИНГЕО на наледях р. Верина и р. Анмангында (Магаданская область). На последней велись длительные наблюдения за динамикой формирования наледи, изучение ее роли в формировании речного стока и др. [4].

По материалам прошлых лет методом ВЭЗ было установлено наличие многолетнемерзлых пород с удельным сопротивлением 5000–6000 Ом·м, которые подстилаются тальными породами с УЭС 100 Ом·м [3]. Геологическое строение представлено пермскими отложениями, породами верхнего триаса и мела.

В 2021–2022 гг. для определения глубины залегания мерзлоты, распределения толщины сезонного промерзания и изучения строения наледной поляны была выбрана поляна Анмангындинской наледи. Размеры наледи в настоящее время (2000–2022 гг.) могут достигать 5.4 км² по площади и 8.2 млн м³ в объеме, а толщина льда в отдельных точках 5 м [4].

Материалы и методы исследования

В работе применялись методы георадиолокационной съемки (ГРЛ), бесконтактного измерения электрического поля с заземлением через емкостную связь (БИЭП), электротомографии (ЭТ).

В 2022 г. методом ГРЛ была выполнена площадная съемка на ключевом участке размером 70×50 м с помощью георадара ОКО-3 с антенным блоком центральной частоты 250 МГц, разрешающая способность составила до 15 м по глубине. Параллельно выполнялись работы методом БИЭП, результатом которого является информация об электрическом сопротивлении среды. При сопоставлении полученных материалов уменьшилась ошибка интерпретации данных.

Осенью того же года на том же участке, размеры которого были приняты 235×80 м (Рис. 1а), проводились работы методом ЭТ. Разрешающая способность метода составила 80 м по глубине. Измерение электрического поля проводилось с помощью многоэлектродной многоканальной электроразведочной станцией Скала-48к12.

Результаты и выводы

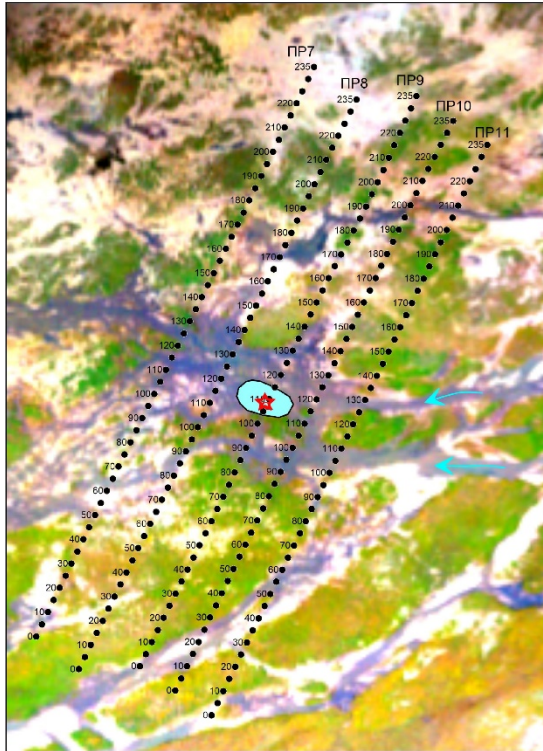
Ключевой участок был выбран в зоне развития ледяного бугра, из которого на поверхность наледи разгружалась вода. Область разгрузки подземных вод в аллювии на радарограмме выделяется повышенной интенсивностью отраженного сигнала. С помощью площадной съемки была построена карта глубины сезонного промерзания грунта (СМС). Было установлено, что в зоне формирования бугра отмечается область пониженного СМС (Рис. 1б). На участках активной разгрузки подземных вод глубина СМС составила 0 м, по руслом реки – до 2.5 м, а на пойме – до 6.5 м.

Сопоставление данных георадиолокации и геоэлектрического разреза показало удовлетворительное совпадение отражающих георадарных границ с границами пород разного УЭС (Рис. 2). Над обводненными таликами, выделенными по УЭС, отмечается увеличение интенсивности отраженного сигнала.

Удельное сопротивление льда находится в пределах 300000–600000 Ом·м, УЭС аллювиальных отложений на участке разгрузки подземных вод на наледь в среднем составляет 1000 Ом·м, местами 500–700 Ом·м (талые породы). Кровля мерзлых сланцев выделяется слоем низкого УЭС.

По материалам, собранным в сентябре 2022 г. методом электротомографии, была построена трехмерная геоэлектрическая модель области развития наледного бугра. Она показала, что бугор развивается над подрусловым таликом. На модели (Рис. 3) он проявляется областью пониженного УЭС трубообразной формы. Ледяной бугор образуется над низкоомными породами, УЭС которых составляет до 300 Ом·м, а на глубину прослеживается вертикальная зона низкого УЭС, интерпретируемая как разлом.

а)



б)

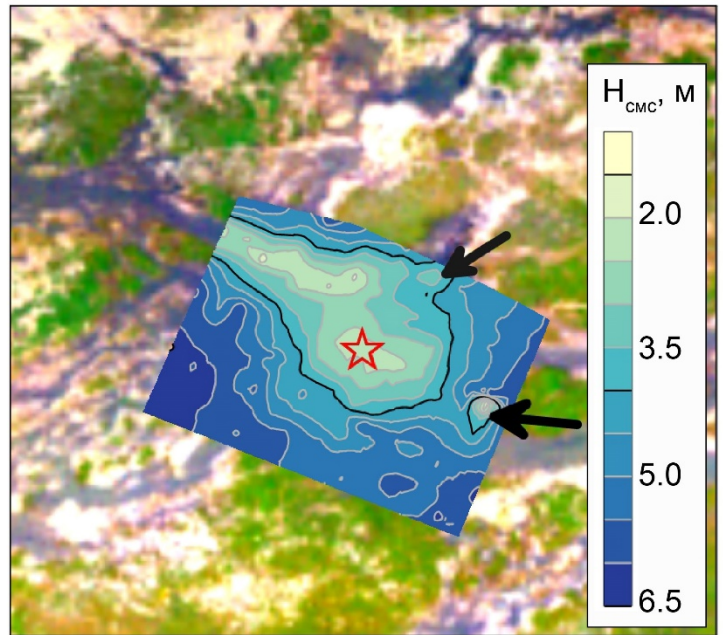


Рис. 1 Схема расположения профилей на площадке (а) и карта глубины сезонного промерзания по данным георадиолокационной съемки 2022 г. (б): 1 – границы образования зимнего ледяного бугра, 2 – скважина во льду; 3 – направление течения реки; 4 – локальные аномалии глубины сезонного промерзания.

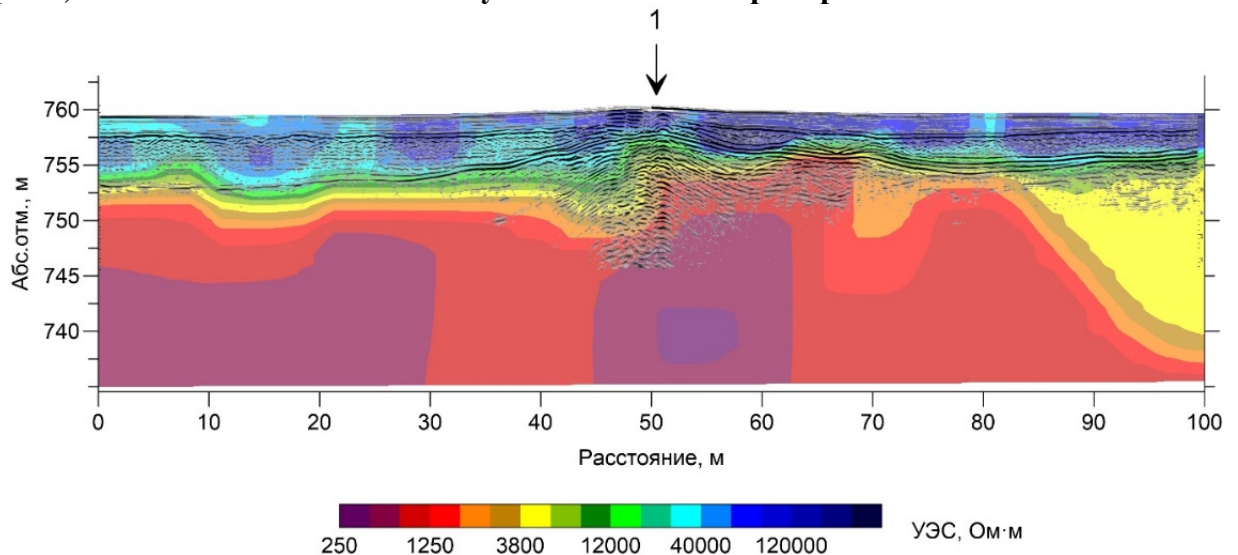


Рис. 2 Сопоставление радарограммы и геоэлектрического разреза по результатам 2-D инверсии данных ДОЗ-БИЭП: 1 – место разгрузки подземных вод из ледяного бугра.

Проведено сопоставление данных «зимней» георадиолокационной съемки и «осенней» электротомографии, выполненной в период максимального оттаивания пород. Оно показало, что талые породы с УЭС 420–1500 Ом·м находятся ниже отражающей границы от подошвы СМС, каналы фильтрации подземных вод выделяются по пониженному УЭС пород (до 1000 Ом·м).

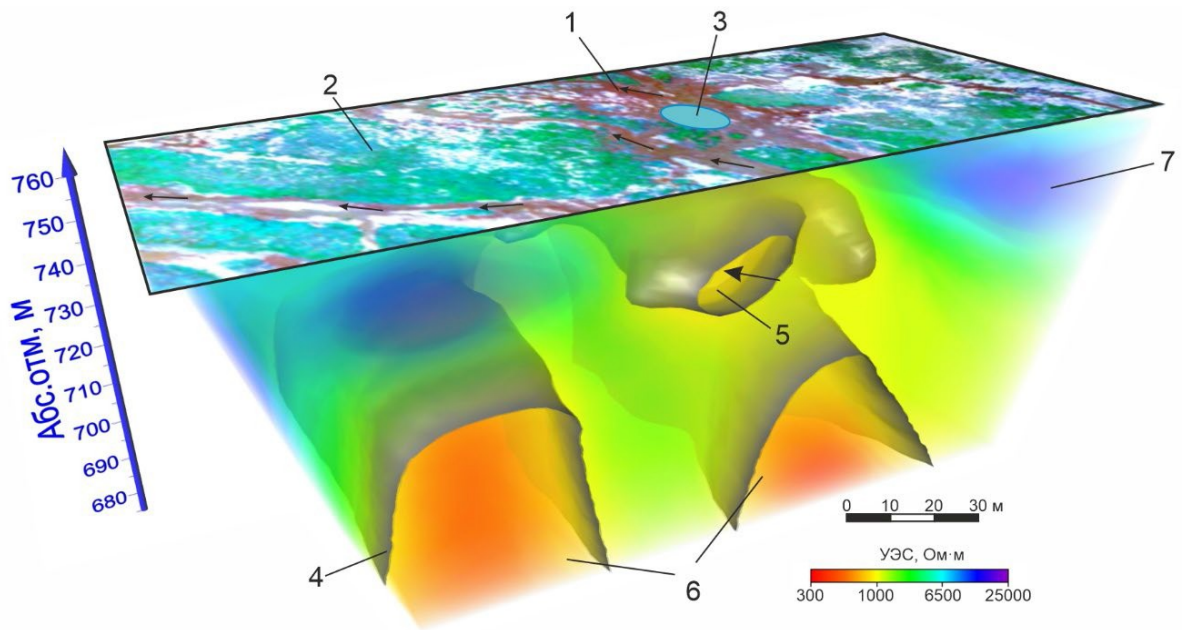


Рис. 3 Трехмерная геоэлектрическая модель площадки: 1 – русло; 2 – низкая пойма; 3 – участок образования наледного бугра; 4 – изоповерхность УЭС 1300 Ом·м; 5 – канал фильтрации; 6 – зоны разломов; 7 – многолетнемёрзлые породы. Стрелками показано направление движения воды.

На интервале профиля 120–130 м (Рис. 4), который находится под протокой, выделяется локальная аномалия низкого УЭС пород (750–1000 Ом·м), интерпретируемая как подрусловый талик. В зимний период он промерзает и подземные воды выжимаются на поверхность по трещине во льду.

Мёрзлые породы по данным георадиолокации выделяются по высокому УЭС от 3500 до 26000 Ом·м, а по данным электротомографии – по границе от 1500 Ом·м и выше.

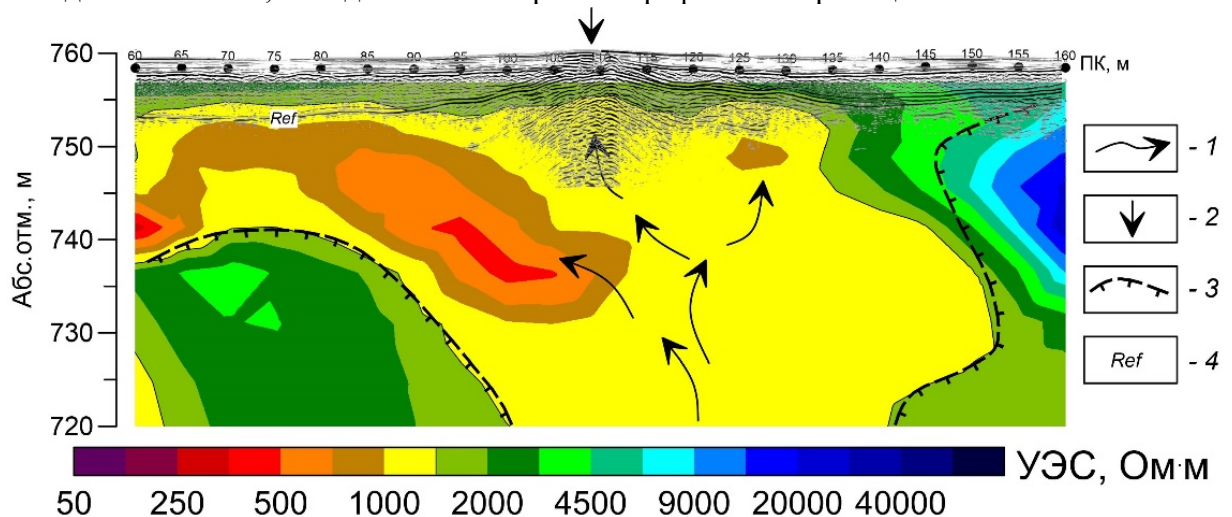


Рис. 4 Вертикальный срез 3D модели по профилю №9 с «зимней» радарограммой: 1 – предполагаемое направление движения воды; 2 – место выхода воды на наледь; 3 – предполагаемая граница ММП; 4 – отражающая граница от подошвы сезонно-мёрзлого слоя в зимний период.

Благодарности

Исследования проводятся при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (проект № 94034170), обработка и анализ данных – в рамках проекта Российского научного фонда № 23-17-20011 и содействия правительства Магаданской области.

Acknowledgments

The field data were collected with the support of St. Petersburg State University (project 94034170). The analysis of the data was conducted with the support of the Government of the Magadan region and Russian Science Foundation (project 23-17-20011).

Список литературы

1. Оленченко В.В., Макарьева О.М., Данилов К.П., Осташов А.А., Калганов А.С., Землянскова А.А., Христофоров И.И., Нестерова Н.В. Геофизические признаки источников гигантской наледи на р. Анмангында (Магаданская область) // Геодинамика и тектонофизика, 2023, Т.14(3) :0702. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-3-0702>
2. Потапов В.В., Макарьева О.М., Оленченко В.В. Геоэлектрическое строение разреза на Анмангындиной наледи (Магаданская область) по данным метода ЗСБ // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2022. Т. 2. №. 3. С. 59–65.
3. Соловьева Г.В. Окончательный отчёт по теме: «Наледное регулирование подземного стока в районах широкого развития многолетнемерзлых пород» (в трех томах). Том I. М.: ВСЕГИНГЕО, Гидрорежимная эксп., 1967. 447 с.
4. Zemlianskova A., Makarieva O., Shikhov, A. et al. The impact of climate change on seasonal glaciation in the mountainous permafrost of North-Eastern Eurasia by the example of the giant Anmangynda aufeis // Catena, 2023, p. 107530.
5. Liu W., Fortier R., Molson J., Lemieux J-M. A conceptual model for talik dynamics and icing formation in a river floodplain in the continuous permafrost zone at Salluit, Nunavik (Quebec), Canada // Permafrost and Periglacial Processes, 2021, Vol. 32, 16.
6. Terry N. et al. Seasonal subsurface thaw dynamics of an aufeis feature inferred from geophysical methods // Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2020, Vol. 125, no. 3, e2019JF005345.
7. Walther, M., Batsaikhan, V., Dashtseren, A., Jambaljav, Y., Temujin, Kh., Ulanbayar, G., Kamp, U. The formation of aufeis and its impact on infrastructure around Ulaanbaatar, North-Central Mongolia // Erforschung biologischer Ressourcen der Mongolei. Exploration into the Biological Resources of Mongolia, ISSN 0440-1298, 2021, 265. <https://digitalcommons.unl.edu/biolmongol/265>

Факторы, влияющие на динамику наледей в меняющемся климате, на примере Анмангындинской наледи

А.А. Землянскова^{1,2*}, О.М. Макарьева^{1,2}, А.Н. Шихов³

¹Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

³Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия
a.zemlyanskova@spbu.ru, anastasiazemlanskova@gmail.com

Аннотация. На основе данных специальных режимных наблюдений за процессами наледеобразования в 1962–1991 гг., анализа спутниковых снимков Landsat и Sentinel-2 (2000–2022 гг.), материалов полевых наблюдений и стандартной сети метеорологических станций и гидрологических постов была проведена оценка динамики характеристик Анмангындинской наледи и установлена зависимость с климатическими факторами. За период 60 лет площадь и объем наледи сократились на 15 и 17% соответственно. Наибольшее влияние на это оказали повышение температуры воздуха и увеличение количества осадков в ноябре–декабре. Для труднодоступных регионов с ограниченным количеством метеорологических и гидрологических данных наледи выступают в качестве индикатора происходящих изменений в природе.

Ключевые слова: река Анмангында, криосфера, изменение климата, наледь.

Factors influencing the dynamics of aufeis in a changing climate, on the example of the Anmangynda aufeis

A.A. Zemlianskova^{1,2*}, O.M. Makarieva^{1,2}, A.N. Shikhov³

¹North-Eastern State University, Magadan, Russia

²St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

³Perm State University, Perm, Russia
a.zemlyanskova@spbu.ru, anastasiazemlanskova@gmail.com

Abstract. The dynamics of the characteristics of the Anmangynda aufeis were assessed and the correlation with climatic factors was established, based on data from special regime observations of aufeis formation processes in 1962–1991, analysis of Landsat and Sentinel-2 satellite images (2000–2022), field observation materials and a standard network of meteorological stations and hydrological gauges. Over the period of 60 years, the area and volume of aufeis decreased by 15 and 17%, respectively. The greatest impact on this was caused by an increase in air temperature and an increase in precipitation in November and December. For hard-to-reach regions with a limited amount of meteorological and hydrological data, aufeis act as an indicator of current changes in nature.

Keywords: the Anmangynda river; cryosphere; climate change; aufeis.

Введение

Наледь – специфическая форма сезонного оледенения, характерная для горных условий вечной мерзлоты. Динамика характеристик наледей тесно связана с сезонными и многолетними изменениями климата. Первое крупное обобщение и систематизация данных о морфометрических характеристиках наледей на Северо-Востоке России была проведена в 1958 г. [3], обновление информации состоялось в 2021 г. на основе анализа спутниковых снимков [1]. Сопоставление двух источников информации показало, что общее количество наледей на этой территории увеличилось с 4642 до 6217. В то же время общая площадь сократилась более чем вдвое – с 7181 до 3579 км². Максимальные изменения наблюдались в бассейне реки Яна, где численность наледей увеличилась в 1.5 раза (с 388 до 583) и на Чукотском полуострове, где площадь наледей сократилась в 2.4 раза (с 2417 до 955 км²). Это может быть связано с тем, что за период с 1966 по 2015 год на Северо-Востоке России произошло значительное повышение температуры воздуха в среднем на +2.2°C. Наибольшие изменения наблюдаются в предзимний период [4].

Аналогичные изменения наблюдаются и в Северной Америке. По данным спутниковых снимков Landsat (1985–2014 гг.) на северо-западной части территории Канады наибольший пик оледенения пришелся на 2002 и 2004 гг., после чего наблюдалось сокращение размеров наледей [5]. Исследователи связывают это с увеличением частоты потеплений в зимний период. Однако отмечают, что для некоторых районов, где наледи формируются за счет речного стока, такие условия будут способствовать увеличению проявления наледных процессов.

Несмотря на общую тенденцию уменьшения объема льдов на земном шаре, влияние изменения климата на наледные процессы не однозначно и требует дальнейших исследований этого феномена.

На примере Анмангындинской наледи, формирующейся в бассейне одноименной реки (приток р. Колыма), был проанализирован ряд исторических данных (1962–1991 гг.), собран массив спутниковых снимков (2000–2022 гг.), а также метеорологические, гидрологические и геокриологические данные с целью определения факторов, влияющих на развитие наледных процессов.

Материалы и методы исследования

Исторические данные

Материалы Колымского управления гидрометеослужбы были собраны, оцифрованы и проанализированы за период 1962–1991 гг. Они включали в себя информацию о динамике площади, объема, толщины льда в разные сезоны года.

Метеорологические, гидрологические и геокриологические данные

Анализ метеорологической информации (температура воздуха, количество осадков) проводился по двум станциям – Усть-Омчуг (576 м над уровнем моря - н.у.м., 1967–2022 гг.) и Сусуман (649 м н.у.м., 1937–2022 гг.). Информация о гидрологическом режиме получена для рек Анмангынды (1962–1987) и Детрин (1956–2020 гг.). Анализ температуры грунта проводился по данным метеорологической станции Сусуман за период 1977–2013 гг. на глубинах 20, 40 и 80 см.

Дистанционные методы зондирования Земли

Оценка современной площади наледи выполнялась на основе анализа космических снимков спутников Landsat (датчики TM, ETM+ и OLI) и Sentinel-2 (датчик MSI) за период 1999–2022 гг. и 2016–2022 гг., соответственно. Оценка площади разлива наледных вод в период формирования наледи проводилась по снимкам в срок 3 октября по 23 декабря, а анализ разрушения льда – с апреля по сентябрь. Всего было обработано 205 сцен.

Полевые методы исследования

С 2020 г. в бассейне р. Анмангынды были возобновлены режимные наблюдения за процессами водообмена в криолитозоне. В данном исследовании использовались данные беспилотного летательного аппарата о площади и объеме наледи (2020–2023 гг.), сведения

о расходе воды на посту выше наледи (2020–2023 гг.), метеорологическая информация (2020–2023 гг.).

Метод расчета характеристик наледи

Данные спутниковых снимков не позволяют оценить объем льда, поэтому используется расчетная формула:

$$W=aS^n, (1)$$

где W – объем льда (тыс. м³), S – площадь льда, тыс. м², a , n – коэффициенты. Значения a и n приняты 0.364 и 1.167 соответственно по результатам анализа связи объема наледи с ее площадью за период 1963–1990 гг.

Результаты исследования и выводы

По данным м/с Усть-Омчуг и Сусуман среднегодовая температура воздуха за последние 20 лет стала выше на 1.4°C по сравнению с периодом до 1990 г. Наибольшие изменения наблюдаются в предзимний период (ноябрь–декабрь). Согласно анализу температуры воздуха в ноябре она повысилась на 3.7 и 3.3°C, а в декабре на 4.0 и 2.1°C, соответственно для станций Усть-Омчуг и Сусуман. В остальные месяцы изменения составили от 0.2 до 3.7°C. Годовое количество осадков увеличилось на 18 и 6% или на 58 и 18 мм соответственно на двух станциях. По данным м/с Усть-Омчуг количество жидких осадков увеличилось на 38%, наибольший вклад внесли осадки за август (+32 мм или 62%), а твердых – на 18%. Наибольшие изменения наблюдались в ноябре и декабре месяцах – на 6.2 и 4.5 мм или 39%. По данным м/с Сусуман изменения менее выражены. Количество жидких и твердых осадков увеличилось на 12 и 5% соответственно. Такие изменения могли оказать влияние на температуру почвы. По данным термометрической скважины возле м/с Сусуман наблюдается повышение температуры почвы на разных глубинах. Между температурой грунта в декабре и суммой осадков за период ноябрь–декабрь, а также средней температурой воздуха за период октябрь–декабрь и температурой грунта в декабре выявлена статистически достоверная корреляционная связь на разных глубинах.

Предзимний период (октябрь–декабрь) связан с началом промерзания почвы, а также началом формирования наледей. Следовательно, климатические условия этих месяцев оказывают наибольшее влияние на процессы наледообразования. Так, повышение температуры воздуха в ноябре–декабре и увеличение высоты снежного покрова способствуют повышению температуры грунта, что не создает дополнительных условий для изливания наледных вод на поверхность земли. То есть вода проходит транзитом за пределы наледной поляны и в конце цикла размеры наледи оказываются меньше.

Выявлены внутригодовые и многолетние изменения характеристик Анмангындинской наледи за период 1963–2023 гг. За последние 60 лет максимальная площадь наледи сократилась на 15% в среднем с 5.5 до 4.7 км², а объем – на 17% с 8.5 до 7.1 млн м³. Подробно анализ динамики представлен в работе [2]. Изменился также и период разрушения льда, в настоящее время он заканчивается на месяц раньше. В начале августа или сентября лед стаивает полностью последние 20 лет. Это связано с тем, что максимальные размеры наледи сократились, повысилась температура воздуха в летний период.

Сокращение максимальных размеров наледи наблюдается из-за изменения климатических условий. Выявлена статистически достоверная корреляционная связь между площадью наледи и средней температурой воздуха за период ноябрь–декабрь (–0.58), а также с суммой осадков за тот же период (–0.53) [6].

По данным гидрологических ежегодников за период 1962–1987 гг. на посту ниже наледи расход воды в период зимней межени (ноябрь) практически не меняется, то же наблюдается и на действующем посту р. Детрин (1956–2020 гг.). Выдвинута гипотеза, что эти реки питаются глубинными источниками, которые реагируют на изменение климата в долгосрочной перспективе, но в настоящий момент времени себя не проявили. Сравнение

материалов специальных наблюдений 1965, 1966 гг. с современными (2020–2022 гг.) также показало, что на посту, расположенном выше наледи расход воды в период зимней межени значительных изменений не претерпел. Было установлено, что связь между расходом воды в ноябре и максимальными размерами наледи – отсутствует.

Динамика морфометрических характеристик наледей под влиянием изменения климата может помочь выявить динамику других процессов, таких как вечная мерзлота, подземные воды и их трансформацию. В отдаленных регионах наледи служат индикатором изменений в криосфере.

Благодарности

Полевые исследования проводятся при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках проекта № 94034170. Обработка данных проводится в рамках проекта Российского научного фонда № 23-17-20011 и содействия правительства Магаданской области.

Acknowledgments

The field studies are carried out with the support of St. Petersburg State University (project 94034170); the analysis of the data is carried out with the support of the Government of the Magadan region and Russian Science Foundation (project 23-17-20011).

Список литературы

1. Алексеев В.Р., Макарьева О.М., Шихов А.Н., Нестерова Н.В., Остахов А.А., Землянскова А.А. Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России / Отв. ред. В.В. Шепелев, М.Н. Железняк. Ин-т мерзлотоведения им. П.И. Мельникова. Новосибирск: СО РАН, 2021. 302 с. ISBN 978-5-6046428-2-5
2. Землянскова А.А., Алексеев В.Р., Шихов А.Н., Остахов А.А., Нестерова Н.В., Макарьева О.М. Многолетняя динамика гигантской Анмангындинской наледи на Северо-Востоке России (1962–2021 гг.) // Лед и снег, 2023, Т.63(1), с. 71-84. <https://doi.org/10.31857/S2076673423010167>
3. Шильниковская З.Г. Кадастр к Карте наледей Северо-Востока СССР масштаба 1 : 2 000 000 / Ред. А.С. Симаков, З.Г. Шильниковский. Магадан: Северо-Восточное территориальное геологическое управление. Центральная комплексная тематическая экспедиция, 1958. 398 с.
4. Makarieva, O.; Nesterova, N.; Post, D.; Sherstyukov, A.; Lebedeva, L. Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost. *Cryosphere*. 2019, 13, 1635–1659, <https://doi.org/10.5194/tc-13-1635-2019>
5. Morse P., Wolfe S. Geological and meteorological controls on icing (aufeis) dynamics (1985 to 2014) in subarctic Canada // *Geophys. Res. Earth Surf.*, 2015. 120, 1670–1686. <https://doi.org/10.1002/2015JF003534>
6. Zemlianskova A., Makarieva O., Shikhov, A., Alekseev V., Nesterova N., Ostashov A. The impact of climate change on seasonal glaciation in the mountainous permafrost of North-Eastern Eurasia by the example of the giant Anmangynda aufeis // *Catena*, 2023, p. 107530.

Моделирование уровня бессточного озера Чаны (Западная Сибирь)

А.Т. Зиновьев, О.В. Кондакова*, А.В. Дьяченко, А.Н. Семчуков

*Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул, Россия
kondakova.o.v@mail.ru*

Аннотация. Представлены результаты компьютерного моделирования уровня воды бессточного озера Чаны. Применены нульмерная (0D) гидроледотермическая и двумерная горизонтальная (2DH) термогидродинамическая (на основе программного комплекса Delft3D) модели водоема. Показано, что 2DH-модель может быть использована для детального описания внутригодового изменения уровня оз. Чаны (в период открытой воды), а 0D-модель может быть применена для расчетов уровня озера за длительный период и прогнозирования его динамики под влиянием климатических факторов. Выполнена предварительная оценка возможного снижения уровня воды оз. Чаны в XXI веке при изменении температуры воздуха и атмосферных осадков (в соответствии со сценариями RCP4.5 и RCP8.5).

Ключевые слова: озеро Чаны, уровень воды, компьютерное моделирование, нульмерная ледотермическая модель, двумерная горизонтальная термогидродинамическая модель, климатические изменения.

Modeling of water level of closed Lake Chany (Western Siberia)

A.T. Zinoviev, O.V. Kondakova*, A.V. Dyachenko, A.N. Semchukov

*Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia
kondakova.o.v@mail.ru*

Abstract. The results of computer modeling of water level of the closed Lake Chany are presented. A zero-dimensional (0D) hydro-ice-thermal model and a two-dimensional horizontal (2DH) thermohydrodynamic model (on the base of the software package Delft3D) are implemented. It is shown that the 2DH-model can be used to describe in detail the water level changes during open-water period and the 0D-model can be used to calculate the lake level over long-term period and to predict level dynamics under climate change impact. Preliminary assessment of the possible water level decrease in the 21st century due to the changes in air temperature and precipitation (according to the scenarios RCP4.5 и RCP8.5) is performed.

Keywords: Lake Chany, water level, computer modeling, zero-dimensional hydro-ice-thermal model, two-dimensional horizontal thermohydrodynamic model, climate change

Введение

Озеро Чаны является самым крупным по площади естественным водоемом Западной Сибири, имеющим важное экологическое и рыбохозяйственное значение. Природной особенностью озера является цикличность колебаний уровня воды и площади его акватории, обусловленная изменениями общей увлажненности территории [11; 13]. Изменение уровня воды в озере определяется соотношением приходных и расходных статей его водного баланса. В зависимости от того, какая из статей – поступление или расходование воды – преобладает, уровень озера повышается или

понижается [10]. Приходными статьями водного баланса оз. Чаны являются атмосферные осадки и речной приток; расходная статья – испарение с поверхности озера [8; 9; 13]. Уровненный режим оз. Чаны является одним из важнейших факторов, влияющих на его водно-экологическое состояние [11].

Термин «озеро Чаны», как и во многих других работах, например [1; 3; 8] и др., используется для обозначения Чановской озерной системы, состоящей из нескольких частей, различных по глубине (Рис. 1). В 1971 г. для сохранения рыбохозяйственного значения озера системой дамб был отделен западный Юдинский плес (площадью около 700 км²), что позволило создать условия для повышения уровня воды в оставшейся части за счет стока впадающих в оз. Малые Чаны рек Каргат и Чулым [13]. Площадь озера Чаны после отделения Юдинского плеса (за 1971–2018 гг.) в среднем составила 1580 км² (с колебаниями от 1285 км² до 1925 км²) [8].

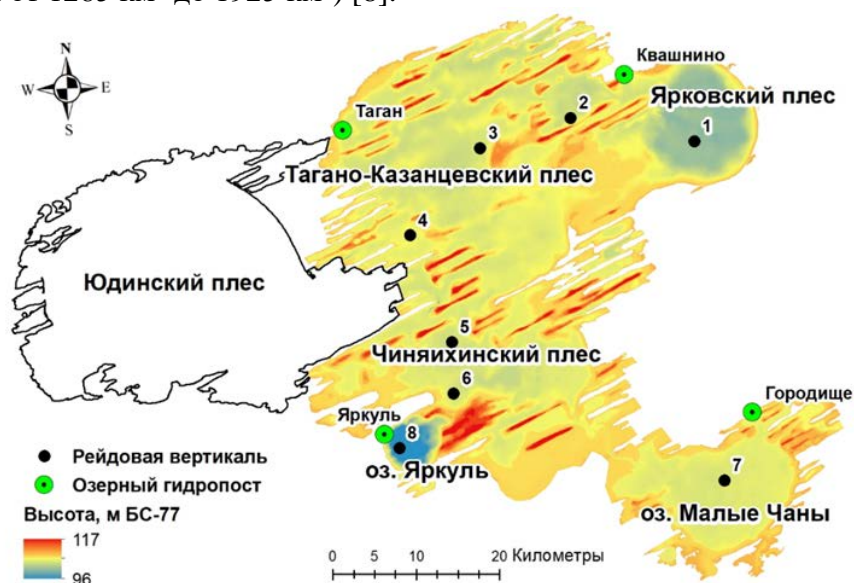


Рис. 1 Цифровая модель рельефа котловины оз. Чаны и схема расположения пунктов наблюдений.

Эффективным инструментом изучения и прогнозирования изменения уровенного режима водоемов под влиянием климатических изменений является математическое моделирование.

Ранее моделирование уровня воды оз. Чаны выполнялось В.А. Понько и Н.Н. Завалишиным [12], В.П. Галаховым [3], М.В. Болговым и Е.А. Коробкиной [1]. В этих работах рассматривались колебания среднегодового уровня воды озера.

Целью данной работы является моделирование внутригодового изменения уровня воды озера Чаны с применением математических моделей разной размерности и предварительная оценка многолетней динамики уровня озера при изменении температуры воздуха и атмосферных осадков.

Материалы и методы исследования

В работе использованы нульмерная гидроледотермическая модель водоема [15], основанная на уравнениях водного и теплового баланса, позволяющая описывать ход основных гидрологических процессов в водоеме, и двумерная горизонтальная (2DH) термогидродинамическая (ТГД) модель оз. Чаны [5], построенная на основе программного комплекса с открытым исходным кодом Delft3D [15].

Основой цифровой модели рельефа (ЦМР), используемой в работе, послужила ЦМР котловины оз. Чаны, созданная в ИВЭП СО РАН [9].

На входных створах расчетной области задавались расходы и температура воды выпадающих в озеро рек Каргат и Чулым по постам с. Здвинск и с. Старогорносталево. Метеорологическая обстановка определялась заданием метеопараметров по станции Квашнино (скорость ветра, температура и относительная влажность воздуха, атмосферное давление, общая облачность, атмосферные осадки; дополнительно для 2DH-модели – направление ветра).

Результаты и выводы

Выполнено сопоставительное моделирование среднесуточных уровней (Рис. 2) озера Чаны по двум моделям в безледоставный период (с использованием входной информации для 2018 года) и расчеты среднемесячных и среднегодовых уровней (Рис. 3) по 0D-модели за длительный период (2001–2018 гг.).

Результаты моделирования согласуются с данными наблюдений. На Рис. 2а приведены результаты расчетов уровня озера в период открытой воды по посту Квашнино по 2DH-модели, на Рис. 2б – среднего по постам уровня по обеим моделям. Результаты расчетов среднего уровня по 2DH и 0D моделям достаточно близки между собой.

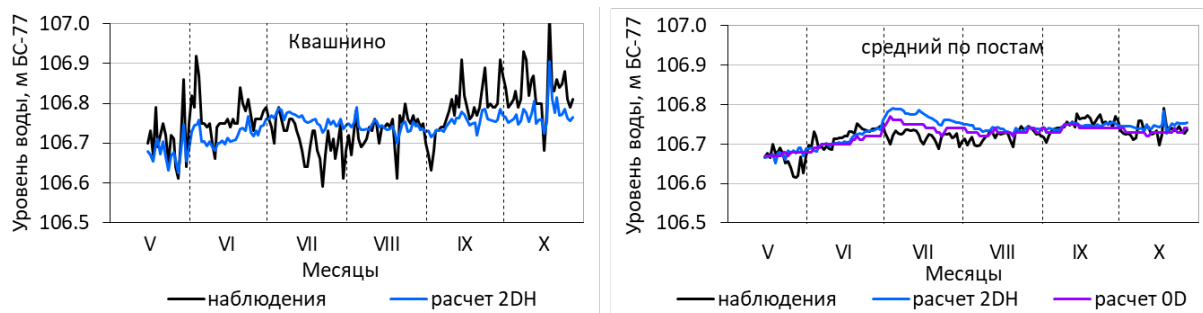


Рис. 2 Уровень воды оз. Чаны за расчетный период 2018 г.: а – по г/п Квашнино, б – средний по озеру.

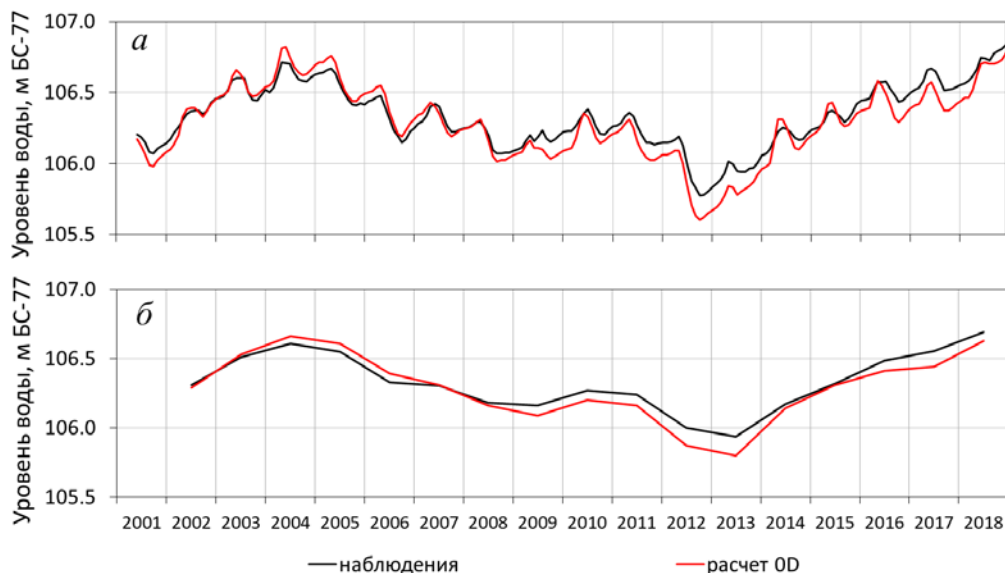


Рис. 3 Уровни воды озера Чаны за период 01.06.2001–31.12.2018 по 0D-модели: а – среднемесячные, б – средние годовые.

Таким образом, анализ результатов расчетов (Рис. 2–3) показывает, что 2DH-модель может использоваться для детального описания пространственного (Рис. 2а) изменения уровня (глубины) оз. Чаны во внутригодовом масштабе (в период открытой

воды), а 0D-модель может применяться для расчетов уровня озера за длительный период (Рис. 3) и прогнозирования динамики уровня под влиянием климатических факторов.

С применением 0D-модели выполнена предварительная оценка возможных изменений среднегодового уровня воды оз. Чаны в XXI веке (Рис. 4) при изменении температуры воздуха и суммы атмосферных осадков, выпадающих на поверхность озера (в соответствии со сценариями изменения климата RCP4.5, RCP8.5). Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха (Δt) и атмосферных осадков (ΔX) в XXI веке (по сезонам) на территории, прилегающей к оз. Чаны, по отношению к базовому климатическому периоду 1981–2000 гг. по рассматриваемым сценариям были оценены по картам, опубликованным в работах [2; 6; 7]. В Табл. приведены среднегодовые значения Δt и ΔX для конца XXI в. (для середины прогнозного периода 2080–2099 гг.).

Табл. Ожидаемые изменения среднегодовых температуры воздуха и атмосферных осадков на прилегающей к озеру Чаны территории для прогнозного периода 2080–2099 гг.

Сценарий	Δt , °C	ΔX , %
RCP4.5	3.7	16.3
RCP8.5	6.7	20.6

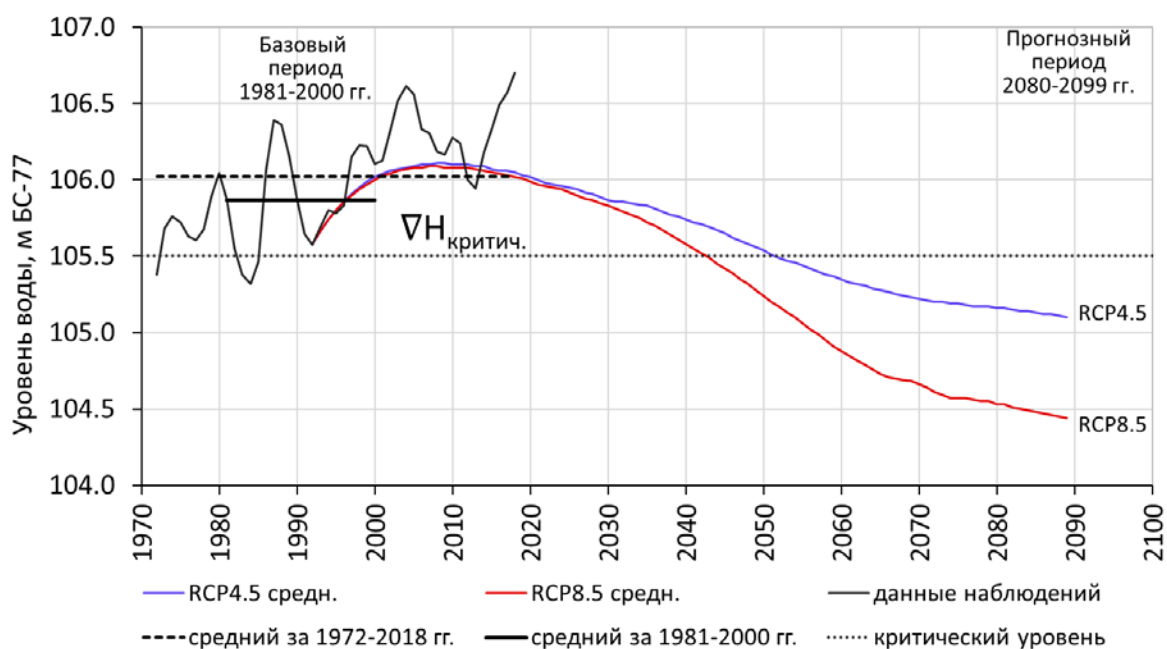


Рис. 4 Предварительная оценка возможных изменений уровня воды оз. Чаны к концу XXI в. при изменении температуры воздуха и атмосферных осадков.

В рассматриваемых вариантах расчетов следует ожидать значительного снижения среднего годового уровня воды оз. Чаны (Рис. 4), что негативно отразится на экосистеме озера. Понижение уровня озера и, как следствие, повышение минерализации воды приводит к снижению видового разнообразия водной флоры и фауны [11]. По данным [11] в период ледостава при уровнях воды ниже 105.7 м БС в озере Чаны развиваются обширные заморы. В Балтийской системе высот 1977 г., к которой в настоящее время (с 2007 г.) привязаны посты на озере Чаны [4], значение критической отметки составляет 105.5 м БС-77 [9]. Полученные предварительные результаты показывают, что по рассматриваемым вариантам расчетов средний годовой уровень воды оз. Чаны к концу XXI в. снизится на 0.4–1.1 м ниже критического значения.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН.

Acknowledgments

The research was carried out within the framework of the Research Program of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS.

Список литературы

1. Болгов М. В., Коробкина Е.А. О моделировании колебаний уровня оз. Чаны для управления его гидрологическим режимом // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2012. №1. С. 4–22.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. В.М. Катцова и С.М. Семенова. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.
3. Галахов В.П. Оценка увлажнения юга Западной Сибири с помощью палеолимнологических реконструкций озера Чаны. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2011. 152 с.
4. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 2010 г. Новосибирск: Западно-Сибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 2011. Часть 2. Том 1. Выпуск 10. 96 с.
5. Зиновьев А.Т., Дьяченко А.В., Кондакова О.В. Моделирование термического режима бессточного озера Чаны // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии. Материалы IV Всерос. науч. конф. с междунар. участием: в 3 т. Барнаул, 2022. Том 1. С. 129–134.
6. Изменения климата России в 21-м веке (модели СМIP5). Доступно online: <http://voeikovmgo.ru/index.php/izmenenie-klimata-v-rossii-v-xxi-veke?id=613>. Дата обращения: 20.05.2023.
7. Катцов В.М., Говоркова В.А. Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха, осадков и годового стока на территории России в 21-м веке: результаты расчетов с помощью глобальных климатических моделей (СМIP5) // Труды главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, 2013. Вып. 569. С. 76–98.
8. Кондакова О.В. Водный баланс озера Чаны в многоводные и маловодные периоды // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: труды VIII Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием. Пермь, 2021. С.125–129.
9. Кондакова О. В., Савкин В. М., Двуреченская С. Я., Марусин К. В. Водный баланс и характеристики минерализации бессточного озера Чаны // География и природные ресурсы. 2020. № 1. С. 122–129.
10. Крицкий С.Н. Методика анализа и расчета колебаний уровня замкнутых водоемов // Водные ресурсы. 1973. № 6. С. 9–26.
11. Обзор экологического состояния озера Чаны (Западная Сибирь) / Отв. ред. О.Ф. Васильев, Я. Вейн. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2015. 255 с.
12. Понько В.А., Завалишин Н.Н. Фоновая модель уровня оз. Чаны // Пульсирующее озеро Чаны. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1982. С. 60–67.
13. Пульсирующее озеро Чаны / Под ред. Н.П. Смирновой и А.В. Шнитникова. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1982. 304 с.
14. Семчуков А.Н., Овчинникова Т.Э. Опыт применения объемной и вертикальной одномерной моделей для описания гидрологического режима западной части Аральского моря // Экстремальные гидрологические события в Арало-Каспийском регионе. Труды Международной научной конференции / Отв. ред. Болгов. М.В. 2006. С. 75–78.
15. Delft3D – Open Source Community. Доступно online: <https://oss.deltares.nl/web/delft3d>. Дата обращения: 20.05.2023.

Моделирование ледникового стока в условиях недостатка данных

Д. С. Зырянова*, Г. В. Пряхина

*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия
levienche13@gmail.com*

Аннотация. Исследование и оценка стока с водосбора, частично покрытого ледником, является предметом интереса как для теоретической гидрологии, так и для управления водными ресурсами в рамках водопользования и прогнозов состояния водных ресурсов горных регионов. Многие горные ледники уязвимы к изменению климата, со временем это приводит к их отступанию. Вместе с тем, таяние ледников приводит к образованию прорывоопасных озёрно-ледниковых комплексов в районах деградации оледенения. Целью данной работы является моделирование стока на ледниках Алтая в условия недостатка данных. В ходе данной работы была подробно рассмотрена модель П. П. Кузьмина, основанная на уравнении радиационного баланса. Кроме того, был предложен алгоритм расчёта стока с ледника на основе существующей модели A-melt. Модель дополнена уравнениями расчёта испарения для ледников Алтая и уравнениями составляющих радиационного баланса. Компьютерные реализации моделей были протестированы с помощью данных, полученных на озере Таможенное (ледник Некрасова, Южно-Чуйский хребет). При тестировании наилучшие результаты показала модель П. П. Кузьмина. Вторая модель при учёте большого количества составляющих радиационного баланса, показала менее точный результат.

Ключевые слова: ледниковый сток, моделирование стока, модели таяния ледника.

Glacial runoff modeling in the absence of data

D. S. Zyryanova*, G. V. Pryakhina

*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia
levienche13@gmail.com*

Abstract. The investigation and assessment of runoff from a partially glacier-covered watershed are of interest both to theoretical hydrology and to water resource management within the framework of water use and predictions of water resource conditions in mountainous regions. Many mountain glaciers are vulnerable to climate change, which leads to their retreat over time. Additionally, glacier melting results in the formation of potentially hazardous lake-glacier complexes in areas where glacial degradation occurs. The objective of this study is to model glacier runoff in the Altai Mountains under conditions of data scarcity. A detailed examination was conducted on the model developed by P.P. Kuzmin, which is based on the radiation balance equation. Additionally, an algorithm for calculating glacier runoff was proposed based on the existing A-melt model. The model was supplemented with equations for calculating evaporation for the Altai glaciers and equations representing the components of the radiation balance. Computer implementations were developed for both models. Subsequently, they were tested using data obtained from Lake Tamojennaya (Nekrasov Glacier, Southern Chu Ridge). The testing revealed that the model developed by P.P. Kuzmin yielded the best results. The second model, which considered a larger number of components in the radiation balance, produced less accurate results.

Keywords: glacial runoff, runoff modeling, models of glacier melt.

Введение

Сток с горно-ледниковых речных бассейнов представляет собой интегральный результат комплекса процессов: таяния ледников, погребённого льда, сезонного снега, стока талых и дождевых вод с ледниковых и неледниковых территорий, испарения, сублимации и конденсации. Исследование и оценка стока с водосбора, частично покрытого ледником, является предметом интереса как для теоретической гидрологии, так и для управления водными ресурсами в рамках водопользования и прогнозов состояния водных ресурсов горных регионов. Многие горные ледники уязвимы к изменению климата, со временем это приводит к их отступанию. Вместе с тем, таяние ледников приводит к образованию прорывоопасных озёрно-ледниковых комплексов в районах деградации оледенения.

В связи с тем, что на большинстве ледников не ведутся постоянные метеорологические и гидрологические наблюдения, а исходные характеристики ледника зачастую тяжело определить из-за труднодоступности района исследования, не всегда имеется возможность определить значение стока достоверно. Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что есть необходимость в создании модели стока с ледника, основанной на физических закономерностях. Данная модель должна требовать относительно легко определяемые входные данные о леднике, а также рассчитывать сток с любого ледника с минимально возможной погрешностью.

На данный момент наибольшее применение имеют модели, основанные на уравнениях радиационного баланса [1]. В частности, уравнение П. П. Кузьмина даёт наилучший результат в ряде исследований [2] и применимо как для расчёта таяния снега, так и для моделирования ледникового стока [3]. Кроме того, при расчёте стока ледникового бассейна Джанкуат на Кавказе применялась модель A-melt, которая показывала хорошую сходимость результатов моделирования и измеренных значений абляции [6].

Целью данной работы является адаптация и тестирование методов расчета таяния с ледников Алтая в условиях недостатка данных.

Материалы и методы исследования

В ходе данной работы было рассмотрено 2 алгоритма расчёта слоя таяния ледника, поступающего в озеро Таможенное. Озеро расположено на Южно-Чуйском хребте, в Центральном Алтае между реками Карагем и Чаган-Узун на севере и Джазатор на юге (Рис. 1).

Озеро «Таможенное» находится в 850 м к северу от ледника Некрасова, является бывшим приледниковым водоёмом и относится к типу моренно-подпрудных озёр. Имеет ледниковое, снеговое и дождевое питание. Водоём со всех сторон окружен мореной малого ледникового периода, имеет вытянутую с юга на север форму, берега практически не изрезаны. В северной части находится моренная перемычка, подпруживающая озеро. В теле моренной перемычки имеется трапециевидный врез, по которому вода из озера «Таможенное» поступает в озеро «Билли». Вода в озеро поступает за счёт сосредоточенного притока (в южной части в озеро впадают ручьи, стекающие с ледника и приледниковых озёр) и распределённого притока (фильтрация воды через моренный материал в юго-западной и восточной частях озера). Юго-западная часть озера примыкает к снежнику [5].

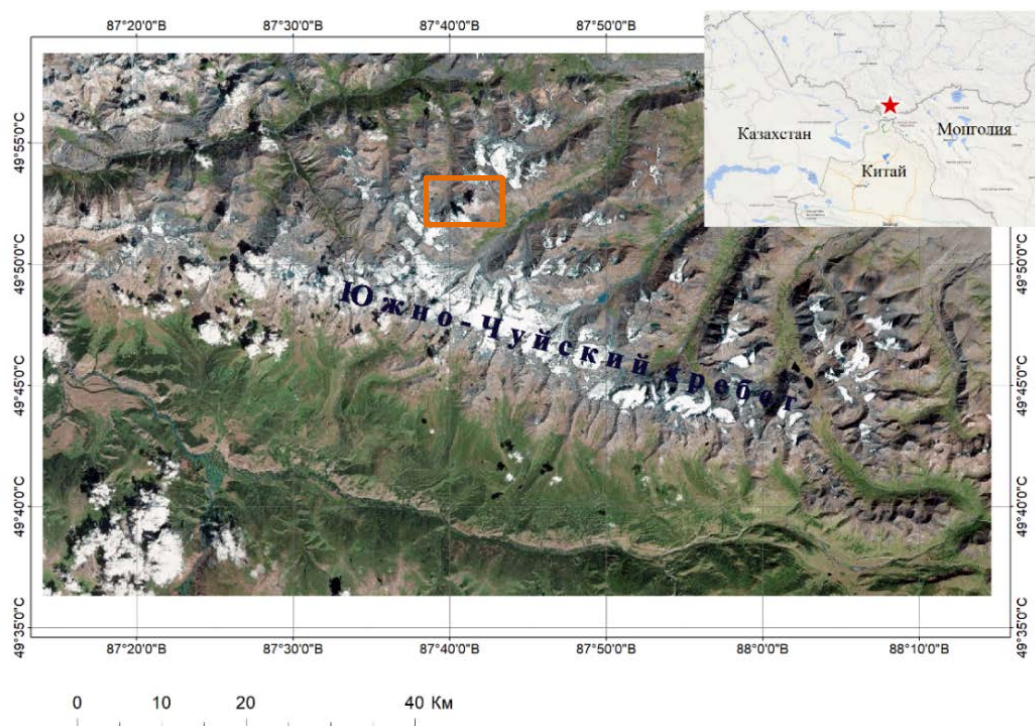


Рис. 1 Месторасположение озера «Таможенное».

Данные, необходимые для расчёта с помощью моделей и их поверки, были получены в ходе комплексной географической экспедиции в районе ледника Некрасова, проведенной с 11 по 29 июля 2022 года научно-исследовательской группой СПбГУ. В результате проведенной экспедиции были измерены суточные значения слоя абляции и осадков; оценивалась нижняя и общая облачность; определены значения относительной влажности воздуха и температуры воздуха.

Рассматриваемые модели

Первый алгоритм представляет собой модель П. П. Кузьмина, также основанного на уравнениях теплового баланса. Согласно П. П. Кузьмину, суточная интенсивность снеготаяния (слоя талой воды) вычисляется по формуле:

$$m_c = \frac{1}{8} [(Q' + q)_0(1 - r)(1 - 0,20N_0 - 0,47N_H) - 1440\varepsilon\sigma T_n^4 + 1440(0,62 + 0,05\sqrt{e_{200}})(1 + 0,12N_0 + 0,12N_H)\varepsilon\sigma T_a^4] + a_c\gamma u_{1000}, \quad (1)$$

где m_c – интенсивность снеготаяния, мм/сутки; $(Q' + q)_0$ – возможная суточная сумма суммарной солнечной радиации при безоблачном небе, кал/см²·сутки; r – коэффициент отражения снежного покрова в долях единицы (альbedo); N_0 и N_H – общая и нижняя облачность соответственно, в долях единицы; ε – относительная поглощательная способность длинноволновой радиации деятельным слоем (для льда $\varepsilon = 0,98$); σ – постоянная Стефана-Больцмана ($\sigma = 8,26 \cdot 10^{-11}$ кал/см²·мин·К⁴), для приведения к суточным значениям коэффициент умножается на 1440, то есть на количество минут в сутках; $T_n = 273 + \theta_n$, $T_a = 273 + \theta_a$; $a_c\gamma u_{1000}$ – составляющая таяния, обусловленная турбулентным теплообменом с атмосферой и скрытой теплотой конденсации и испарения; $a_c = 0,878 \frac{1+0,547u_{1000}}{u_{1000}}$; $\gamma = (\theta_{200} - \theta_n) + 1,75(e_{200} - e_n)$; θ_{200} – температура воздуха на уровне 2 м, θ_n – температура поверхности, °С; e_{200} и e_n –

абсолютная влажность воздуха и максимальная упругость, мбар; u_{1000} – скорость ветра на высоте флюгера, м/с [3].

В основу второго алгоритма, используемого нами при расчёте, взята модель A-melt [6], в том числе общая концепция расчёта и вычисление потока тепла через чехол моренных отложений. Модель дополнена уравнениями расчёта испарения В. А. Семенова для ледников Алтая [7] и уравнениями составляющих радиационного баланса, по формулам П. П. Кузьмина [3; 4].

В основе данной модели лежит уравнение водного баланса (2), где сток Q определяется как разница приходной части (абляция A и осадки на поверхность ледника P) и расходной (испарение E):

$$Q = A + P - E \quad (2)$$

Данные о количестве осадков P могут быть получены в ходе стандартных метеорологических наблюдений. Испарение с поверхности ледника E вычисляется на основе данных о скорости ветра u в высотной зоне, о величине абсолютной влажности воздуха $e_{\text{п}}$ и о давлении насыщенного пара e_{200} (3) [7].

$$E = (0,0075 + 0,041u)(e_{\text{п}} - e_{200}). \quad (3)$$

Величина абсолютной влажности воздуха $e_{\text{п}}$ зависит от температуры поверхности $T_{\text{пов}}$ (4). Давление насыщенного пара e_{200} зависит от давления пара $e_{\text{п}}$ и относительной влажности R_h (5) [4]:

$$e_{\text{п}} = 6,11 * 10^{7,5T_{\text{пов}}/(273,15+T_{\text{пов}})}, \quad (4)$$

$$e_{200} = e_{\text{п}} R_h. \quad (5)$$

Слой абляции рассчитывается на основе радиационного баланса. Для вычисления его величины необходимы данные о нижней и общей облачности; температуре поверхности, морены и воздуха, толщине поверхностной морены; количестве дней с последнего снегопада; абсолютной влажности воздуха и давлении насыщенного пара; слое осадков и испарения. Снег и лёд тают под действием тепловой энергии ω , приходящей на поверхность снега или льда. В процессе таяния образуется слой абляции A (6). L – скрытая теплота плавления снега, кал/г [6]:

$$A = \frac{10\omega}{L} = \frac{\omega}{8}. \quad (6)$$

Тепловая энергия определяется с помощью уравнения теплового баланса (7), в котором учитываются: приходная коротковолновая радиация $S_{\text{ср}}$; встречное излучение атмосферы E_a ; длинноволновое излучение земной поверхности E_z ; турбулентный теплообмен с атмосферой ω_t ; скрытый поток тепла, возникающий за счёт испарения, $\omega_{\text{лк}}$; поток тепла через чехол моренных отложений Q_m ; тепло, приносимое с дождевыми осадками, S , кал/см²:

$$\omega = S_{\text{ср}} + E_a - E_z \pm \omega_t \pm \omega_{\text{лк}} \pm Q_m \pm S. \quad (7)$$

Результаты и обсуждение

На Рис. 2 показан ход слоя таяния ледника, рассчитанного с помощью модели, основанной на A-melt, и с использованием модели П. П. Кузьмина. Также на графике виден ход величин абляции, полученных в ходе исследований, проведенных во время экспедиции. Коэффициент корреляции модели K Кузьмина с измеренными значениями

составил 0,61; коэффициент корреляции K для второй модели составил 0,47. Критическое значение коэффициента корреляции $K_{\text{крит}}$ составляет 0,46 (при $\alpha=5\%$). Для обеих моделей $K > K_{\text{крит}}$.

Несмотря на то, что рассматриваемые модель П. П. Кузьмина и модель, основанная на алгоритме A-melt, основаны на уравнении радиационного баланса, заметно, что есть существенная разница в полученных с помощью них данных. Прежде всего, первая модель не учитывает в уравнении радиационного баланса скрытый поток тепла, за счёт испарения, приход тепла, приносимый с атмосферными осадками и поток тепла через чехол моренных отложений. Единственный существенный показатель из трёх приведенных выше – приход тепла, приносимый с атмосферными осадками. В первой модели турбулентный теплообмен рассчитывается по эмпирической формуле А. Р. Константинова. Вторая модель также рассматривает турбулентный теплообмен как функцию испарения, но в данном случае была использована другая формула для нахождения суточного испарения (2). При сравнении данных показателей, рассчитанных двумя способами, было выявлено, что наибольшую погрешность в расчёте второй модели вызывает турбулентный теплообмен. При сравнении двух формул становится ясно, что принцип расчёта в обоих случаях схож, но в большей степени различаются формулы для расчёта испарения, в том числе во второй модели турбулентный теплообмен не зависит от величины давления водяного пара, так как она сокращается при подстановке уравнения для расчёта испарения. Можно предположить, что во второй модели нельзя использовать эту формулу для вычисления испарения.

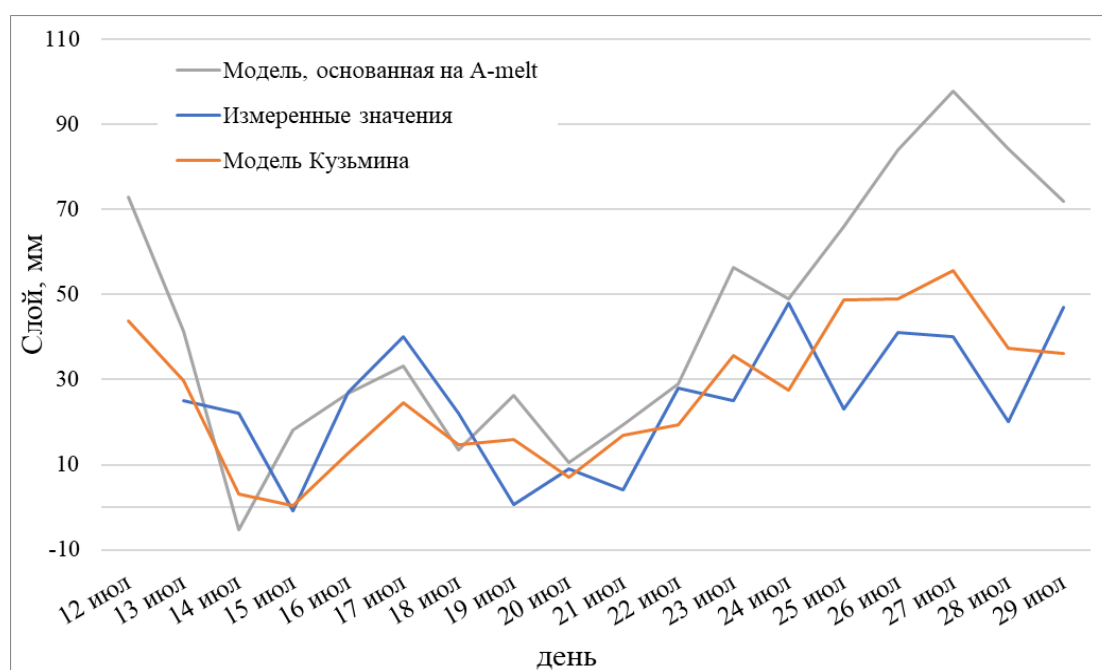


Рис. 2 Сравнение ходов значений слоя таяния ледника Некрасова, рассчитанных по выбранным моделям (озеро Таможенное).

Помимо различий уравнений в моделях, необходимо отметить, что при расчётах приходилось принимать скорость ветра как постоянное значение, а нижнюю облачность приравнивать к нулю, так как данные об этих параметрах отсутствовали. Кроме того, П. П. Кузьмин отмечал, что неточность значений нижней облачности может вносить существенную ошибку при расчётах [3].

Все вышеприведённые факторы способны вызывать в той или иной мере погрешности и ошибки расчёта. Алгоритм, основанный на модели A-melt, явно завышает данные, полученные в результате расчетов, из-за неподходящего уравнения для расчёта

суточного испарения и одновременно занижает из-за принятия значения встречного излучения атмосферы как константы. Наиболее интересен тот факт, что в сумме эти параметры дают близкие друг к другу значения, то есть ошибки нивелируют друг друга. Модель П. П. Кузьмина может занижать в отдельные дни выходные данные из-за недоучёта тепла, приносимого с осадками.

Выводы

В ходе данной работы были рассмотрены модель П. П. Кузьмина и A-melt, основанные на радиационном балансе.

При тестировании наилучшие результаты показала модель П. П. Кузьмина, коэффициент корреляции для расчётов стока в озеро Таможенное, составил 0,61 при критическом значении 0,46. Вторая модель при учёте большого количества составляющих радиационного баланса, показала менее точный результат. Это объясняется тем, что уравнение для вычисления суточных значений испарения было подобрано некорректно, а также тем, что встречное излучение атмосферы принимается как константа.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-27-00171

Acknowledgments

The work was supported by RNF Grant No. 23-27-00171

Список литературы

1. Зырянова Д. С., Пряхина Г. В. Обзор методов расчета стока с водосбора, частично покрытого ледником // Сборник материалов участников XIX Большого географического фестиваля, Санкт-Петербург, 7-9 апреля 2023 г. С. 168 – 173.
2. Кузнецова, М.Р., Пряхина, Г.В. Методы расчета слоя таяния снега в антарктическом оазисе Холмы Ларсеманн // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2022 № 67 (3), С. 515–528.
3. Кузьмин П. П. Процессы таяния снежного покрова: Монография. – Ленинград: Гидрометеорологическое издательство, 1961. – 344.
4. Кузьмин П. П. Физические свойства снежного покрова: Монография. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1957. – 178.
5. Распутина В. А. Отчёт по результатам полевых гидрологических работ в районе ледника Некрасова (Южно-Чуйский хребет, Центральный Алтай, Республика Алтай)// Распутина В. А., Свирепов С. С., Крыжановская А. Э., Грига, С. А., Безруких Ю. В, - 2022
6. Рец Е. П. Моделирование таяния поверхности горного ледника / Е.П. Рец, Н.Л. Фролова, В.В. Поповнин // Лёд и снег – 2011. – С. 24-31.
7. Семёнов В. А. Испарение и конденсация снега в условиях центрального Казахстана // Тр. КазНИГМИ – 1969. - №. 38.

Проблемы и опыт изучения опасных гидрологических событий в дельтах рек западного средиземноморья

М.В. Исупова*, М.В. Михайлова, Е.Н. Долгополова

*Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия
misupova@yandex.ru*

Аннотация. На основе обширного материала проведен анализ основных проблем и опыта исследований опасных гидрологических событий речного и морского происхождения в устьях рек Западного Средиземноморья. Приведены типизации подобных процессов в отечественной и зарубежной литературе. Показано, что для средиземноморских дельт наиболее характерны стоковые, нагонные, стоково-нагонные, стоково-дождевые наводнения. Рассмотрены примеры наиболее крупных наводнений в низовьях и дельтах рек Роны и Эбро и их последствия.

Ключевые слова: речная дельта, Средиземное море, Рона, Эбро, опасное гидрологическое событие, типизация, наводнение.

Problems and experience of studying dangerous hydrological events in the river deltas of the Western Mediterranean

M.V. Isupova*, M.V. Mikhailova, E.N. Dolgoplova

*Water Problems Institute RAS, Moscow, Russia
misupova@yandex.ru*

Abstract. The main problems and experience of investigations of dangerous hydrological events of river and marine origin at rivers mouths of the Western Mediterranean based on extensive data are analyzed. Typification of similar processes in Russian and foreign literature are given. It is shown that floods of runoff, surges, runoff-surges, runoff-rain origin are most characteristic for the Mediterranean deltas. Examples of the largest floods and their consequences in the lower reaches and deltas of the Rhone and Ebro rivers are considered.

Keywords: river delta, Mediterranean Sea, Rhone, Ebro, dangerous hydrological event, typification, flood.

Введение

Проблемы изучения и оценки опасного воздействия водного фактора на природную среду и социально-экономический комплекс устьев рек, приобрели в настоящее время особую актуальность. Связанные с потеплением климата планеты ускорение повышения уровня Мирового океана, активизация циклонической деятельности, усиление таяния ледников и многолетнемерзлых пород, оказывают существенное влияние на устьевые области рек.

Крупнейшие дельты рек Средиземноморского региона – Роны (Франция), Эбро (Испания), По (Италия) и Нила (Египет) – объекты многочисленных исследований, поскольку оказываются очень уязвимы к повышению уровня моря и усилению штормовых нагонов, морского волнения, сопровождающихся абразией морских берегов и затоплением обширных дельтовых территорий [7]. Несмотря на то, что

ландшафты этих дельт сильно изменены деятельностью человека, здесь расположены самые большие прибрежные естественные водно-болотные угодья [11]. Усиление штормовой деятельности (штормовых нагонов) в Средиземноморском регионе (в том числе формирование интенсивных средиземноморских ураганов – медиканов) оказывает существенное влияние на гидролого-морфологические процессы в устьевых областях. Цель статьи – проанализировать опасные гидрологические события в устьях рек Западного Средиземноморья, сведения о которых представлены в многочисленных источниках, выявить основные проблемы изучения таких событий в регионе и сравнить имеющиеся в российской и зарубежной научной литературе их классификации.

Материалы и методы исследования

Детальная типизация опасных гидрологических событий в устьях рек, принятая как в России, так и за рубежом, пока отсутствует. Причина – в большой сложности строения и гидрологического режима устьев рек. Авторы придерживаются определения, сформулированного в [1]: «опасными гидрологическими процессами, событиями и явлениями надо считать те из них, которые оказывают или могут оказать негативное воздействие на население, населенные пункты, социальные и промышленные объекты, сельскохозяйственные угодья и фермы, инфраструктуру и другие хозяйственные объекты, а также окружающую природную среду и приводят или могут привести к социальному, материальному и экологическому ущербу». К катастрофическим гидрологическим событиям отнесены те, которые сопровождаются человеческими жертвами, а к экстремальным – наибольшие или наименьшие за весь период наблюдений, или за некоторый репрезентативный многолетний период.

Среди опасных гидрологических событий в устьях рек можно особо выделить наводнения, которые подразделяются на несколько типов [1]: стоковые, заторные и зазорные, стоково-заторные, стоково-зазорные, нагонные, стоково-нагонные, дождевые, стоково-дождевые, трансгрессивные, морфодинамические, стоково-морфодинамические, стоково-заторно-морфодинамические и др. По длительности воздействия – очень длительные (крупномасштабные морские трансгрессии, сотни и тысячи лет), длительные (годы, десятилетия), сезонные и кратковременные, а по происхождению – речные, морские и вызванные местными атмосферными осадками. Согласно представленной классификации, для средиземноморских рек наиболее характерны стоковые, нагонные, стоково-нагонные, дождевые, стоково-дождевые наводнения и трансгрессивные затопления. Однако в иностранной литературе представлены несколько отличные классификации.

Результаты и выводы

Краткие сведения об объектах исследования. Устьевая область (УО) Роны относится к дельтово-эстуарной, УО Эбро – к дельтовой. Каждая из исследуемых УО имеет в своем составе устьевой участок реки, дельту выдвижения и устьевое взморье; УО Роны имеет также водоемы эстуарного типа – лагуны.

Дельта Роны (пл. 1740 км²) расположена на французском побережье Средиземного моря, приблизительно в 40 км к западу от Марселя. В вершине дельты (ВД) (в 47.5 км от моря) река делится на два рукава: левый и главный – Большая Рона (Б. Рона, дл. ~50 км), и правый – Малая Рона (М. Рона, дл. ~60 км). Большую часть дельты Роны занимает древняя и современная пойма (72% пл. дельты), на лагуны и пруды приходится 23%, на прибрежные участки – 5%. Среднегодовой расход воды $Q_{\text{ср}}$ Роны у г. Бокер (~12 км выше по течению от ВД и в 60.5 км от моря) составляет 1700 м³/с (объем стока W_Q 53.7 км³/год) [10]. Максимальный Q изменяется от 4200 до 11640 м³/с, минимальный – до 320 м³/с. Большая часть стока воды поступает в Б. Рону (85–90%), остальная в М. Рону (10–15%) [9]. Сток наносов от 6.7 до 30.0 млн т/год [10].

Современная дельта Роны развивается под влиянием значительного антропогенного сокращения стока наносов в результате зарегулирования реки и обвалования русел, усиления воздействия интенсивных речных паводков, эвстатического повышения уровня моря, активного волнового воздействия на морской край, просадки грунта.

Дельта Эбро расположена на испанском побережье Средиземного моря, примерно в 170 км к югу-западу от Барселоны. Дельта (пл. 320 км²) имеет классическую клювовидную форму и оканчивается м. Тортоса. ВД Эбро находится в районе г. Ампоста в ~27 км от моря. Выход в море главного и единственного рукава – в районе н.п. Риумар. Слева и справа от дельты отходят большие устьевые косы Фангар и Ла-Банья, отделяющие от моря мелководные заливы-лагуны, которые имеют слабое сообщение с морем и получают пресную воду из главного рукава дельты и системы дренажных каналов. Больше половины площади дельты (56%) используется сельским хозяйством, 15% занято болотной растительностью, 20% – песчаные пляжи, каналы, дороги, 9% – лагуны и пресноводные марши. $Q_{ср}$ Эбро у г. Тортоса (в 47.8 км от моря) составляет 431 м³/с (W_Q 13.8 км³/год) [12]; максимальный $Q \sim 12000$ м³/с [12]. В конце XIX в. сток взвешенных наносов в устье был ~30 млн т/год, после введения в эксплуатацию водохранилищ на Эбро и притоках в XX в. сократился до 0.15 млн т/год [11]. Современная дельта Эбро развивается под влиянием значительного антропогенного сокращения стока наносов реки и просадки грунта, эвстатического повышения уровня моря, активного волнового воздействия на морской край.

Примеры типизаций наводнений в дельтах Роны и Эбро. Во французской научной литературе нет единой принятой классификации опасных гидрологических событий (и в частности, наводнений) в устьях рек. Согласно [4], наводнения на Нижней Роне и в ее дельте подразделяются по происхождению на четыре основных типа: севенский (сильные дожди на западных склонах Севенн), средиземноморский (сильные дожди на восточных склонах Южных Альп), океанический (продолжительные осадки в северной части водосбора Роны) и смешанный (к дождям добавляется таяние снега в горных районах водосбора). Наводнения первых двух типов продолжаются от нескольких часов до нескольких дней, третьего и четвертого – от нескольких дней до недель. Существует классификация наводнений в низовье Роны и в ее дельте в зависимости от повторяемости и критического значения Q на г/п Бокер: 4200 м³/с – ежегодное, 6000 – раз в два года, 8400 – раз в 10 лет, 9400 – раз в 30 лет, 9800 – раз в 50 лет, 11000 – раз 80 лет, 11300 – раз в 100 лет, 13300 – раз в 500 лет, 14200 м³/с – раз в 1000 лет [2, 8]. В исследованиях [9] и базе данных HISTRHONE [5] содержатся исторические и современные данные об 1500 опасных гидрометеорологических событиях на Нижней Роне и в дельте (высоком или низком уровне воды, наводнениях, ледовых явлениях, сильных дождях и засухах, нашествиях саранчи) и их негативном воздействии на хозяйство, индексированные по времени, местоположению и нанесенному ущербу, которые охватывают период с 1226 по 2000 г. Представленные в базе [5] события разделены на несколько модулей – паводки и наводнения, ледовые явления, засухи, сильные дожди – и подразделяются на несколько типов, при этом приводится градация наводнений от самых низких до самых высоких, начиная с паводков (без перелива бровок поймы, затопления пойменных и дельтовых территорий) и заканчивая «экстремальными» наводнениями.

В испанской научной литературе также нет единого подхода к классификации опасных гидрологических событий. Поскольку основные причины наводнений в северной части средиземноморского побережья Испании – проливные кратковременные или продолжительные обложные сезонные дожди, типизация таких событий основана на трех видах прохождения дождевых осадков [6]: (1) очень кратковременные (менее 6 ч), но высоко интенсивные дожди; (2) кратковременные (от

6 до 72 часов) интенсивные дожди величиной 200–500 мм, с которыми связаны наиболее частые и катастрофические наводнения в регионе; (3) продолжительные (~ одна неделя) слабо интенсивные дожди величиной от 200 мм (обычно осенью или зимой). С точки зрения серьезности воздействия на окружающую среду и жизнь человека в [3] наводнения делятся на катастрофические (со значительным ущербом или разрушением инфраструктуры) и чрезвычайные (с незначительным ущербом), а пространственного распространения – на крупные катастрофические (охватывающие два-три речных бассейна) и очень крупные катастрофические (четыре и более бассейна). В [7] гидрологическое событие считается экстремальным, когда один или несколько взаимосвязанных факторов (ветер, волны, течения, уровень моря) постоянно превышают определенные пороговые значения.

Примеры наводнений в низовьях и дельтах Роны и Эбро. По данным [9] за 1300–2000 гг. на Нижней Роне и в дельте случилось 517 наводнений, при этом отмечается усиление в целом опасных гидрологических событий на Нижней Роне и в дельте в 1350-х гг., 1450–1480-х гг., 1674–1711 гг., 1840–1841 г., 1856 г., в первой половине XX в. На рубеже XX–XXI вв. в дельте Роны произошли 6 крупных наводнений – в октябре 1993 г. (9800 м³/с на г/п Бокер), в январе (10980) и ноябре 1994 (9750), ноябре 1996 (8990), сентябре (10500) и ноябре 2002 (10200) и декабре 2003 г. (11000 м³/с). На северо-востоке Испании (Каталония) в бассейнах 17 рек за 1355–конец XX в. зарегистрировано 1422 наводнения (589 катастрофических и 833 чрезвычайных) [3]. В низовье р. Эбро (г. Тортоса) и ее дельте – 17 катастрофических и 23 чрезвычайных наводнений (за 1355–1982 гг.). В настоящее время среди опасных гидрологических событий выделяются осенние штормы в 2019 г. (сентябрь, октябрь), штормы «Глория» в январе 2020 г. и «Филомена» в январе 2021 г., которые нанесли дельте Эбро существенный ущерб [11]. Сведения о некоторых значимых наводнениях в дельтах Роны и Эбро приведены в таблице.

С наводнениями во многом связана перестройка гидрографической сети дельты Роны. Согласно [9], в 1580-х гг. большой сток воды и наносов привел к перемещению устья Б. Роны на запад, а дельта выдвинулась в море. В начале XVIII в. после нескольких наводнений устье Б. Роны сместилось на юго-восток, заняв свое нынешнее положение, которое поддерживается дамбами обвалования и дноуглубительными работами. В настоящее время защитные дамбы в дельте имеют длину 96 км и высоту от 9.7 до 2.2 м. Для защиты прибрежных территорий дельты Роны от проникновения осолоненных морских вод во время штормов построена вдольбереговая дамба.

Современное гидролого-морфологическое и экологическое развитие дельты Эбро в значительной степени зависит от ее освоения человеком, особенно выращивания риса. В естественных условиях большая часть воды, поступающая из реки в дельту, проходила через водно-болотные угодья. В настоящее время большая часть речного стока сосредоточена в оросительных каналах и проходит через рисовые поля, обходя естественные водно-болотные угодья [11]. Снижение стока воды и существенное сокращение стока наносов реки, а также эвстатическое повышение уровня моря приводят к отступлению МКД Эбро, ухудшению качества воды в УО реки, уменьшению площадей естественных водно-болотных угодий, усилению интрузии морской воды, просадке отложений дельтовой равнины (ниже уровня моря).

Основная проблема, возникающая при попытках классификации опасных гидрологических событий в устьях рек, – это отсутствие единого подхода в их типизации, главная причина которого – сложность строения и гидрологического режима устьев рек. Кроме того, в условиях взаимодействия речных и морских факторов подходы к типизации опасных гидрологических событий, принятые для обычных рек и морей, к устьям рек, как правило, неприменимы. Что касается Западного

Средиземноморья, ни во французской, ни в испанской научной литературе нет единой принятой типизации опасных гидрологических событий (и, в частности, наводнений) в устьях рек. Таким образом, при будущей разработке более детальной типизации опасных гидрологических событий в устьях рек и на морских побережьях, а также критериев оценки опасности подобных событий необходимо учитывать опыт зарубежных исследователей.

Табл. Сведения о некоторых наводнениях в дельтах Роны [2; 8; 10] и Эбро [3;7;13].

Река	Период	$Q_{\text{макс}}$ в ВД, м ³ /с	Тип наводнения	Причины	Последствия
Рона	октябрь 1993	9450	стоково- дождевое	обильные кратковременные и обложные дожди, грозы	прорывы защитных дамб на М. Роне, затопление северной части дельты
	январь 1994	10570	стоковое	обложные дожди, грозы	прорывы защитных дамб на М. Роне, затопление сев. части дельты
	декабрь 2003	11500	стоково- нагонное	обложные дожди, насыщенность влажностью почв, штормовой нагон	разрушение дамб обвалования, затопление поймы, прорыв защ. дамб в дельте, частичное затопление г. Арамон, деревень, ферм; ущерб 1.13 млрд евро
Эбро	ноябрь 1617	>4500	стоково- дождевое	обильные кратковременные, обложные дожди	разрушение городских стен в Тортосе, >150 зданий, иригационных каналов, мельниц; образование лагуны в дельте; малярия
	октябрь 1907	23500	стоковое	проливные дожди	затопление земель, частичное разрушение защ. дамб, жилых домов
	январь 2020	—	стоково- нагонное	проливные дожди, шторм «Глория», нагон	гибель 13 чел.; разрушение береговой инфраструктуры, затопление дельты речными и морскими водами, размыв пляжей и песчаных кос; ущерб 68.4 млн евро

Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема № FMWZ-2022-0001; № государственной регистрации: 122041100222-7).

Acknowledgments

The study was carried out under Governmental Order to Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, subject no № FMWZ-2022-0001.

Список литературы

1. Михайлов В.Н., Михайлова М.В., Магрицкий Д.В. Основы гидрологии устьев рек. М.: Триумф, 2018. 313 с.
2. Arnaud-Fassetta G. Dyke Breaching and Crevasse-Splay Sedimentary Sequences of the Rhône Delta, France, Caused by Extreme River-Flood of December 2003 // *Geogr. Fis. Dinam. Quat.* 2013. № 36. Pp. 7–26.
3. Barriendos M., Rodrigo F.S. Study of historical flood events on Spanish rivers using documentary data // *Hydrological Sciences J.* 2006. № 51 (5). Special issue: Historical Hydrology. Pp. 765–783.
4. Boudet L., Sabatier F., Radakovitch O. Modelling of sediment transport pattern in the mouth of the Rhone delta: Role of storm and flood events // *Estuarine, Coastal and Shelf Science.* 2017. № 198. Pp. 568–582.
5. HISTRHONE, base de données historiques des crues et des inondations dans le bas Rhône // <https://histrhone.cerege.fr/> (дата обращения 10.06.2022)
6. Llasat M.-C., Barriendos M., Barrera A., Rigo T. Floods in Catalonia (NE Spain) since the 14th century. Climatological and meteorological aspects from historical documentary sources and old instrumental records // *J. of Hydrology.* 2005. №313. Pp. 32–47.
7. Lorente P., Lin-Ye J., García-León M., Reyes E., Fernandes M., Garcia Sotillo M., Espino M., Ruiz M.I., Gracia V., Perez S., Aznar R., Alonso-Martirena A., Álvarez-Fanjul E. On the Performance of High Frequency Radar in the Western Mediterranean during the Record-Breaking Storm Gloria // *Frontiers in Marine Science.* 2021. Vol. 8. Artc. 645762.
8. Mailliet G.M, Vella C., Berné S., Friendd P.L., Amosd C.L., Fleurya T.J., Normandc A. Morphological changes and sedimentary processes induced by the December 2003 flood event at the present mouth of the Grand Rhône River (southern France) // *Marine Geology.* 2006. Vol. 234. Issues 1–4. Pp. 159–177.
9. Pichard G., Arnaud-Fassetta G., Moron V., Roucaute E. Hydro-climatology of the Lower Rhône Valley: historical flood reconstruction (AD 1300–2000) based on documentary and instrumental sources // *Hydrological Sciences J.* 2017. Vol. 62. № 11. Pp. 1772–1795.
10. Pont D., Day J.W., Ibáñez C. The impact of two large floods (1993–1994) on sediment deposition in the Rhône delta: Implications for sustainable management // *Science of the Total Environment.* 2017. № 609. Pp. 251–262.
11. Rodríguez-Santalla I., Navarro N. Main Threats in Mediterranean Coastal Wetlands. The Ebro Delta Case // *J. of Marine Science and Engineering.* 2021. № 9. Artc. 1190.
12. Tena Á., Vericat D., Batalla R.J. Balance Sedimentario del Embalse de Ribarroja // *Geographical Research Letters.* 2021. № 47 (2). Pp. 415–433.
13. Thorndycraft V.R., Barriendos M., Benito G., Rico M., Casas A. The catastrophic floods of AD 1617 in Catalonia (northeast Spain) and their climatic context // *Hydrological Sciences J. des Sciences Hydrologiques.* 2006. № 51 (5). Pp. 899–912.

Первые результаты гидроэкологических исследований высокогорного озера Урасар (Республика Армения)

Л.Г. Казарян^{1*}, Л.Р. Гамбарян^{2,3}, И.В. Федорова¹, Г.Б. Федоров¹

¹*Институт ботаники им. А.Л. Тахтаджяна Национальной академии наук Республики Армения, г. Ереван, Армения*

²*Ереванский государственный университет, г. Ереван, Армения*

³*Научный Центр Зоологии и гидроэкологии, институт Гидроэкологии и ихтиологии, г. Ереван, Армения*

larisa.ghazaryan.01@mail.ru

Аннотация. В рамках проекта ИМПАСТ выполнены исследования озера Урасар, расположенного на Лорийском плато в пределах Армянского нагорья. Проведен комплекс гидрологических, гидрохимических, гидробиологических работ, отобраны пробы воды, биоты и донных отложений. Озеро представляет собой эвтрофный водоем, со сменой окислительных условий на поверхности на восстановительные – в придонных слоях. Степень покрытия поверхности озера макрофитами может достигать 80% к концу летнего сезона. Основной группой альгофлоры состава фитопланктона и седиментов являются диатомовые водоросли, которые можно использовать для оценки экологических условий и качества воды озера Урасар.

Ключевые слова: высокогорные озерные экосистемы, Малый Кавказ, Армянское нагорье, гидрохимия, гидробиология, фитопланктон, диатомовые водоросли.

The first results of alpine Lake Urasar hydroecological studies (Republic of Armenia)

L.H. Ghazaryan^{1*}, L.R. Hambaryan^{2,3}, I.V. Fedorova¹, G.B. Fedorov¹

¹*Institute of Botany after A.L. Takhtajyan, National Academia of Sciences of the Republic of Armenia, Yerevan, Republic of Armenia*

²*Yerevan State University, Yerevan, Republic of Armenia*

³*Scientific Centre of Zoology and Hydroecology, Institute of Hydroecology and Ichthyology, Republic of Armenia*

larisa.ghazaryan.01@mail.ru

Abstract. Within the framework of the “ИМПАСТ – Impact of Past And Current Trenchant climatic and environmental changes on Armenian Highland lake Ecosystems” project, studies of Lake Urasar, located on the Lori Plateau within Armenian Highland were obtained. Hydrological, hydrochemical, and hydrobiological studies were carried out including field measurements, water, biota and sediments sampling. The lake has a eutrophic status, with the oxidizing conditions on the surface but reducing ones - in the bottom water layers. The macrophytes cover may reach up to 80% of the lake surface at the end of the summer season. The main group of algaeflora in the composition of phytoplankton and sediments are diatoms algae, which can be used to assess the environmental conditions and water quality of Lake Urasar.

Keywords: alpine lake ecosystems, Lesser Caucasus, Armenian Highland, hydrochemistry, hydrobiology, phytoplankton community, diatoms algae.

Введение

Озеро Урасар расположено в провинции Лори Армении на высоте 1552 м над уровнем моря (координаты озера 41,02380° ю.ш., 44,30382° в.д.). Озеро относится к Лорийским озерам, включенным в список особо охраняемых природных объектов Армении в 2014-2020 гг. [1]. Озеро характерно тем, что до 80% его площади к концу лета покрывается водными лилиями (*Nymphaea alba*), занесенными в Красную книгу и относящимися к после ледниковым реликтам бореальной водно-болотной флоры Малого Кавказа [2]. Площадь озера 0,1 км², площадь свободной водной поверхности без макрофитов – 0,02 км² (по данным на 25.10.2022). Озеро расположено в субтропическом климатическом поясе северного полушария, климат на территории Армянского плато резко континентальный, сухой [3].

В рамках проекта «ИМРАСТ – Влияние прошлых и современных резких изменений климата и окружающей среды на экосистемы высокогорных озер Армении» 14-16 августа 2023 г. выполнены гидрохимические и гидробиологические исследования на оз. Урасар. Озеро имеет максимальную глубину 8,5 м в центре. Граница распространения макрофитов (водных лилий) и свободной от водной растительности поверхности проходит по глубине 4 м. Дно каменисто-илистое, прозрачность воды составляла 1,5 м, цвет имеет желтоватый (болотный) оттенок. Верхний слой озера имеет окислительные условия, а нижний – восстановительные. Можно предположить меромиктический характер водоема. По величине растворенного кислорода и биогенных элементов водоем имеет эвтрофный статус. Отмечается усыхание озера.

Материалы и методы исследования

На озере проведены гидрохимические измерения портативными приборами. По глубине измерены содержание растворенного кислорода (O₂), водородный показатель (pH), электропроводность (cond.), минерализация (TDS), окислительно-восстановительный потенциал (Eh), температура воды (t). Использованы приборы фирмы OHAUS (pH-метр, кондуктометр, TDS –метр) и «Эксперт» (оксиметр). Пробы воды были отобраны с поверхности, с глубины 4 м (середина глубины) и у дна (8 м) для выполнения анализов первого дня – определение содержания биогенных элементов, которое проведено на приборе «Эксперт-003» и получены значения фосфатов PO₄, нитритов NO₂, аммония NH₄, силикатов SiO₄, мутности (в единицах мутности по формазону – примерно в мг/л). Измерения глубины выполнены при помощи картплотера Garmin 421S. Пробы планктона отобраны сетью Апштейна (диаметр ячеек 100 мкм, диаметр сети 25 см) с середины озера и в прибрежной части. Донные отложения отбирались также с середины озера и в прибрежной части конусовидным дночерпателем. В рамках проекта была также отобрана колонка донных озерных отложений (2,7 м) с помощью торфяного бура для дальнейших палеоэкологических и палеоклиматических исследований.

Результаты и выводы

Изменение гидрохимических показателей с глубиной представлено на Рис. 1. Согласно значениям окислительно-восстановительного потенциала, озеро имеет два слоя – смена окислительных условий на поверхности на восстановительные происходит ниже 6 м глубины. Так Eh на поверхности равно 213 мВ, а в придонном слое имеет значение 130 мВ. Это говорит об эвтрофировании и заболачивании водоема. Об этом свидетельствует также малое количество растворенного кислорода (O₂) в воде: даже на поверхности значение O₂ было 5,04 мг/л (65% насыщения), а уже с глубины 1 м можно говорить о недостатке кислорода в воде, и в придонных слоях концентрация O₂ меньше 1 мг/л (меньше 10% насыщения). С глубиной происходит увеличение минерализации от 33 мг/л на поверхности до 76 мг/л на глубине 7 м и уменьшение температуры от 22,4 до 10,1 °С в придонных слоях. Низкие температуры воды в придонных слоях говорят о наличии подземного притока, т.к. во время исследований температура воздуха повышалась до 48 °С на солнце, что не могло

не сказаться на температуре воды, однако, скорее всего, можно говорить о меромиктическом характере водоема, об отсутствии перемешивания слоев.

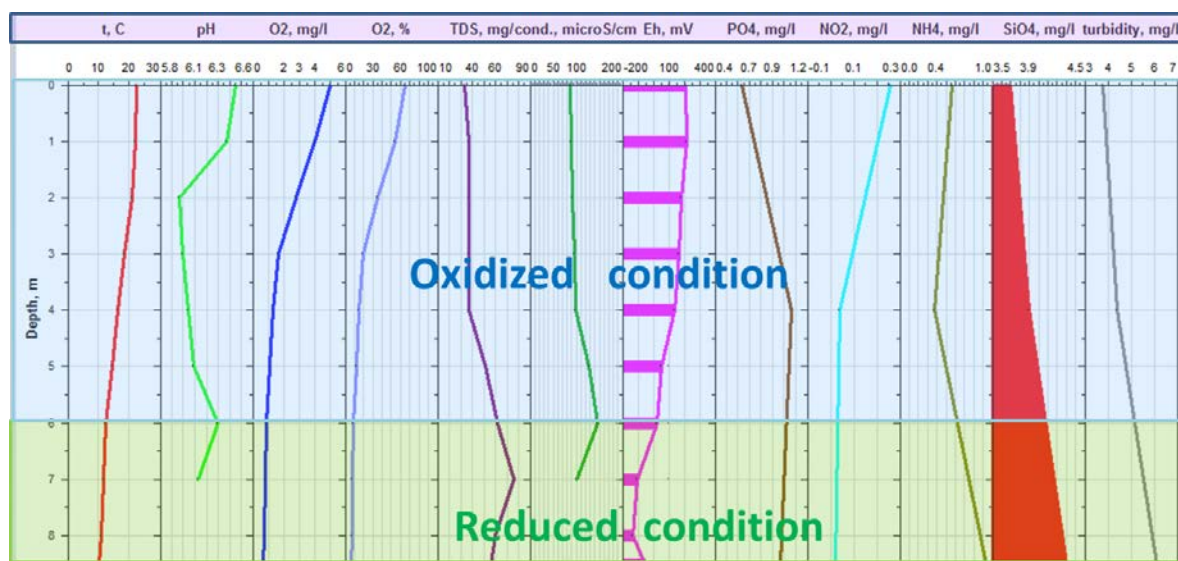


Рис. 1 Распределение гидрохимических показателей с глубиной в оз. Урасар.

Значение водородного показателя pH показывает в целом нейтральную среду воды до 7 м. Мутность воды с глубиной увеличивается от 3,8 до 6,1 ЕМФ (единиц мутности по формазону – примерно в мг/л). Минерализация воды на поверхности составляла 33 мг/л, имела увеличение до 76 мг/л на глубине 7 м и постепенное уменьшение до дна (56 мг/л), а вот электропроводность показывает наличие небольшого скачка значений между 4 и 5 метрами глубины. Верхний слой озера имеет электропроводность 87-98 мкСм/см, а потом резко меняются значения до 128-147 мкСм/см, однако в придонном слое снова происходит снижение величины удельной электропроводимости воды до 100 мкСм/см, что связано, скорее всего, с обменными ионными процессами на границе вода-дно.

Распределение концентрации биогенных элементов с глубиной неоднозначно. Так, происходит увеличение аммония NH_4 (от 0,56 до 0,94 мг/л) с одновременным уменьшением нитритов NO_2 (от 0,26 до 0,02 мг/л). Концентрация силикатов составляла 3,7 мг/л на поверхности, 3,9 мг/л на глубине 4 м и 4,3 мг/л – у дна (8 м). Нужно отметить, что концентрация аммония немного превышает рыбохозяйственные ПДК (0,5 мг/л) на поверхности и почти в 2 раза – у дна. Для ПДК нитритов (0,02 N- NO_2 мг/л) значения у дна соответствуют норме, однако на поверхности превышают допустимые значения более чем в 10 раз. Фосфаты распределяются по глубине озера неравномерно: на поверхности значение PO_4 составляло 0,63 мг/л, далее на глубине 4 м равнялось 1,06 мг/л и у дна – 0,97 мг/л. По значению фосфат-ионов (PO_4) озеро Урасар относится к эвтрофным водоемам.

В качестве биоиндикаторов экспресс-оценки качества воды разнотипных водоемов весьма активно используются качественные и количественные показатели фитопланктонного сообщества микроводорослей [4; 5]. Широкое распространение в водных экосистемах Армении имеют диатомовые водоросли, которые являются информативными показателями загрязнения, эвтрофирования и климатических изменений [6]. Впервые были проведены исследования альгофлоры фитопланктона озера Урасар, выявлены виды, принадлежащие группам: диатомовых (Bacillariophyta), сине-зеленых (Cyanophyta), зеленых (Chlorophyta), эвгленовых (Xanthophyta), а также встречались таксоны из групп золотистых (Ochromyces), эвгленовых (Euglenophyta), желтозеленых (Xanthophyta), харовых (Charophyta) и динофитовых (Dinophyta). В целом отмечено более 60 видов, основная часть из которых, являются космополитами, основная часть которых приуроченным к умеренным температурным условиям, что характеризует водные условия. Широкого развития достигали виды родов *Navicula*, *Nitzschia*, *Cyclotella*, а также важный вклад вносили крупноклеточные виды: *Pinnularia major*, *Gomphonema acuminatum*,

Gomphonema constrictum. Показатели развития диатомовых водорослей, в планктоне и седиментах озера Урасар, приведено на Рис. 2.

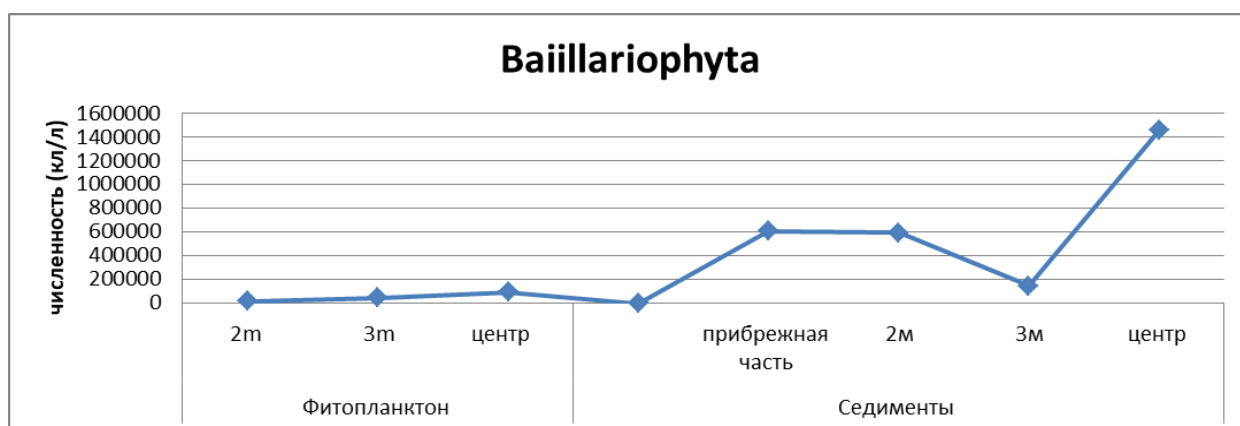


Рис. 2 Динамика показателей диатомовых водорослей по показателям численности (кл/л), на разных участках оз. Урасар, в летний период, 2023 г.

Как видно из диаграммы, наибольшее количественное развитие диатомовых водорослей, наблюдается в составе седиментов, ближе к центру озера.

Исследования качественного состава седиментов, из разных участков оз. Урасар, выявило наличие бентосных микроводорослей из 4 основных групп: диатомовые (Bacillariophyta), сине-зеленые (Cyanophyta), зеленые (Chlorophyta) и эвгленовые (Xanthophyta). По показателям биоразнообразия в донном сообществе преобладали диатомовые водоросли, в составе доминантного комплекса встречались следующие виды: *Gomphonema acuminatus*, *Ceratoneis arcus*, *Amphora ovalis*, *Synedra acus*, *Achnantes microcephala*, *Cymbella prostrata*, *Nitzschia sigmoidea*, *Cyclotella comta*, *Meridion circulare* и виды рода *Navicula*. Было идентифицировано более 40 видов водорослей, из них 21 являются индикаторами экологического состояния. Изучение диатомей в составе седиментов весьма информативно для палеоэкологических исследований, понимания изменений температурного режима и реконструкции климатических условий, способствующих осадконакоплению озер.

Изучение озера будет продолжено. Предполагается проведение круглогодичного гидроэкологического мониторинга озера. В рамках проекта ИМПАСТ запланирована обработка керн озерных донных отложений, что позволит получить палеоклиматическую характеристику не только Лорийских озер, но и дополнить историю развития Армянского нагорья в целом.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта «Влияние прошлых и современных резких изменений климата и окружающей среды на экосистемы высокогорных озер Армении - ИМПАСТ» (23IRF-1E02) при поддержке Комитета по высшему образованию и науке, Министерства образования, науки, культуры и спорта Республики Армения.

Acknowledgments

The work is completed in the frame of “Impact of Past And Current Trenchant climatic and environmental changes on Armenian Highland lake Ecosystems - IMPACT” project (23IRF-1E02) supported by Higher Education and Science Committee, Ministry of Education, Science, Culture and Sport RA.

Список литературы

1. Environmental Value, Landscape and Biological Diversity of the Lori Plateau Lakes and Watershed (Lori Region, Republic of Armenia). Final Report of the Project No. 31363-1 «Nature Heritage» environmental, agricultural NGO. Yerevan, Armenia January 2022
2. Туманян А. А., Алексанян А. С. Файвуш Г. М. Основные экосистемы озер Лорийской нагорной равнины Армении. *Takhtajania* /Армянское ботаническое общ-во, Институт ботаники им. А. Тахтаджяна НАН РА; Ред. коллегия: Оганезова Г. Г. и др. – Ер.: Арм. ботаническое общество, 2018. Вып. 4, с.44-49.
3. Бойнагрян В.Р. Озера Армянского нагорья (Взгляд геоморфолога). Изд-во Ереванского государственного университета, Ереван, 2007, 144 с.
4. Reynolds C., Huszar V., Kruk C., Naselli-Flores L., Melo S. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *J. Plankton Res.*, 2002, vol. 24, pp. 417–428. doi: 10.1093/plankt/24.5.417
5. Hambaryan L., Khachikyan T., Ghukasyan E. Changes in the horizontal development of phytoplankton of the littoral of Lake Sevan (Armenia) in conditions of water level fluctuations. *Limnology and Freshwater Biology*, 2020, no. 4, pp. 662–664. DOI: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-662SI:
6. Озеро Севан. Экологическое состояние в период изменения уровня воды. Ярославль: Филигрань, 2016. 328с.

Гидрологические последствия изменения климата в бассейне Ангары в 21 веке

А.С. Калугин^{1*}, В.А. Гинзбург², И.Н. Крыленко^{1,3}, О.Н. Липка², О.В. Максимова², А.В. Мальнев⁴, Ю.Г. Мотовилов¹, Н.О. Попова¹, А.П. Ревокатова²

¹Институт водных проблем Российской академии наук, г. Москва

²Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля, г. Москва

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

⁴En+ Group, г. Москва

kalugin-andrei@mail.ru

Аннотация. Исследование выполнено на основе обработки и анализа данных глобальных климатических моделей международного проекта CMIP6. На будущий период представлены результаты анализа изменения климатических характеристик для бассейнов Иркутского, Братского и Усть-Илимского водохранилищ по трем параметрам: приземная температура, осадки и влажность воздуха. Расчеты проведены для трех временных периодов 2026-2035, 2046-2055, 2090-2099 гг. при сценариях SSP4.5 и SSP8.5 относительно 1985–2014 гг. На следующем этапе с использованием этих данных оценивались гидрологические последствия изменения климата в бассейне р. Ангары в 21 веке на основе информационно-моделирующего комплекса ECOMAG. Определены изменения водного режима рек на водосборах Иркутского, Братского и Усть-Илимского водохранилищ, соответствующие определенному периоду 21 века и SSP-сценарию относительно базового периода.

Ключевые слова: Ангара, изменения климата, формирование стока, гидрологическая модель.

Hydrological impacts of climate change in the Angara basin in the 21st century

A.S. Kalugin^{1*}, V.A. Ginzburg², I.N. Krylenko^{1,3}, O.N. Lipka², O.V. Maximova², A.V. Malnev⁴, Y.G. Motovilov¹, N.O. Popova¹, A.P. Revokatova²

¹Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia

³Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁴En+ Group, Moscow, Russia

kalugin-andrei@mail.ru

Abstract. The study is based on the processing and analysis of global climate model data from the international project CMIP6. The results of the analysis of changes in climatic characteristics for the basins of the Irkutsk, Bratsk and Ust-Ilimsk reservoirs for the future period are presented for three parameters: surface temperature, precipitation and air humidity. Calculations were performed for three time periods 2026-2035, 2046-2055, 2090-2099 under scenarios SSP4.5 and SSP8.5 relative to 1985-2014. At the next stage, the hydrological consequences of climate change in the Angara River basin in the 21st century were assessed using these data on the basis of the ECOMAG information and modeling complex. Changes in the river water regime at the catchments of the Irkutsk, Bratsk and Ust-Ilimsk reservoirs

corresponding to a certain period of the 21st century and SSP-scenario relative to the baseline period were determined.

Keywords: Angara River, climate change, flow formation, hydrological model.

Введение

Значительная доля водосбора р. Ангары относится к бассейну озера Байкал. Так, приток к створу Иркутской ГЭС практически полностью зависит от притока воды в Байкал, поскольку Ангара от истока до плотины Иркутской ГЭС не принимает значимых притоков. К створам Братской и Усть-Илимской ГЭС порядка 60% стока Ангары формируется в бассейне Байкала. Более 80% приходной части водного баланса озера составляет приток по впадающим в Байкал рекам. Около 70% от этой величины поступает по трём основным притокам – рр. Селенге, Верхней Ангаре и Баргузину. На территории водосборного бассейна р. Ангары и оз. Байкал темпы роста среднегодовой температуры существенно превышают аналогичный показатель в среднем по миру. Глобальное потепление климата и процессы, с ним связанные, неизбежно влияют на параметры стока рек.

Прогнозные расчёты на модели формирования речного стока для бассейна р. Селенги, выполненные ранее для различных сценариев эмиссии парниковых газов по данным ансамбля глобальных климатических моделей, показали возможное сокращение величины годового стока р. Селенги к концу XXI века [1]. Таким образом, в течение XXI века суммарный речной приток в оз. Байкал может существенно сократиться, что неизбежно скажется на объёмах выработки электроэнергии на ГЭС, расположенных на р. Ангаре.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено на основе обработки и анализа данных глобальных климатических моделей международного проекта CMIP6. Выбор наиболее точных моделей в ансамбль произведен на основе сравнения 30-летней выборки для периода 1985–2014 гг. данных каждой из моделей с данными реанализа ERA5 для исследуемого региона. Сравнение проводилось последовательно по климатическим характеристикам в порядке их приоритетности: годовая сумма осадков, среднегодовая относительная влажность и температура приземного воздуха. По итогам трехэтапной проверки наилучшие результаты продемонстрировали глобальные климатические модели CNRM-ESM2-1, EC-Earth3-CC и CanESM5-CanOE, которые были включены в ансамбль. На будущий период расчеты проведены для трех временных периодов 2026-2035, 2046-2055, 2090-2099 гг. при сценариях SSP4.5 и SSP8.5 относительно 1985–2014 гг.

На следующем этапе с использованием этих данных оценивались гидрологические последствия изменения климата в бассейне р. Ангары в 21 веке. Модели формирования стока построены на основе информационно-моделирующего комплекса ECOMAG [3]. Для работоспособности гидрологических моделей подготовлена необходимая информация, включая характеристики подстилающей поверхности и гидрометеорологические данные соответствующей дискретности. Проведена калибровка параметров моделей формирования стока с использованием данных стационарного метеорологического мониторинга и метеорологического реанализа при расчете формирования среднесуточного, декадного и среднемесячного стока на водосборах Иркутского, Братского и Усть-Илимского водохранилищ за период 1985–2014 гг., поскольку этот период выбран в качестве базового. Затем полученные аномалии климатических характеристик в среднем для каждого из исследуемых речных бассейнов для периодов 2026-2035, 2046-2055, 2090-2099 гг. при сценариях SSP4.5 и

SSP8.5 использовались для расчетов формирования стока по гидрологическим моделям. В итоге определены изменения величин годового и сезонного стока на водосборах Иркутского, Братского и Усть-Илимского водохранилищ, соответствующие определенному периоду 21 века и SSP-сценарию относительно базового периода.

Объектами исследования являются водосборы Иркутского (оз. Байкал), Братского и Усть-Илимского водохранилищ. Водосборная площадь Иркутского водохранилища составляет 582 000 км² и является наибольшей из исследуемых объектов. В связи с этим и различными условиями формирования стока рек, впадающих в оз. Байкал в южной и северной его частях, рассмотрено разделение водосбора Иркутского водохранилища на три части основными притоками: рр. Селенга, Баргузин и Верхняя Ангара. Водосборная площадь Братского водохранилища составляет 165 000 км², а Усть-Илимского водохранилища – 47 000 км².

База метеорологической информации, необходимой для задания граничных условий в моделях Верхней Ангары, Баргузина, а также водосборов Братского и Усть-Илимского водохранилищ, включает временные ряды среднесуточных значений температуры и дефицита влажности воздуха, суточных сумм осадков, измеренных на 88 метеостанциях. В связи с отсутствием надежных стационарных метеоданных на монгольской части бассейна р.Селенги для формирования единой базы исходной метеорологической информации, необходимой для задания граничных условий модели, использованы данные глобального метеорологического реанализа W5E5, разработанного на основе реанализа ERA5 [2]. Подготовленная база для бассейна р.Селенги включает временные ряды метеовеличин, привязанных к регулярной расчетной сетке с пространственным разрешением 0.5°.

Результаты и выводы

Калибровка параметров моделей водосборов Иркутского, Братского и Усть-Илимского водохранилищ проводилась для периода с 1985 по 2014 гг., поскольку этот период выбран в качестве базового для этапа расчета по данным глобальных климатических моделей. Для замыкающего створа на р. Селенге значения статистических критериев соответствия смоделированного среднесуточного стока фактическому составили NSE = 0.85 и BIAS = 2%. Для замыкающего створа на р. Верхняя Ангара NSE = 0.79 и BIAS = -8%, на р. Баргузин NSE = 0.78 и BIAS = 1%. При расчете бокового среднесуточного притока воды в Братское водохранилище значения статистических критериев составили NSE = 0.67 и BIAS = 5%. Калибровка параметров модели для водосбора Усть-Илимского водохранилища проводилась путем сравнения с архивными данными среднесуточных расходов воды в створе р. Илим – д. Коченга за период 1985-1988 гг.: NSE = 0.72 и BIAS = -1%.

Согласно данным глобальных климатических моделей в среднем по ансамблю наибольшие темпы потепления ожидаются в бассейне Верхней Ангары: 2-9°C в зависимости от периода и сценария. В среднем для различных периодов и сценариев вариации темпа увеличения среднегодовой температуры воздуха на всей исследуемой территории составляют до 0.7°C. Рост сезонной температуры воздуха на водосборах Селенги, Баргузина, Братского и Усть-Илимского водохранилищ относительно равномерный – в пределах 0.2-0.3°C. В бассейне Верхней Ангары темпы потепления зимой и в летне-осенний период выше примерно на 0.5°C относительно весны.

Согласно данным глобальных климатических моделей в среднем по ансамблю наибольшие темпы увеличения годовой суммы осадков ожидаются в бассейне Верхней Ангары и Усть-Илимского водохранилища: в среднем по периодам 21 века 16-18%. Наименее интенсивное увеличение годовой суммы осадков отмечено на водосборе Баргузина и Братского водохранилища. Наибольший темп роста осадков соответствует концу 21 века при экстремальном сценарии SSP8.5: для различных бассейнов в

диапазоне 24-37%. Для всех объектов обнаружено значительное увеличение количества осадков в зимне-весенний период относительно летне-осеннего.

При анализе изменения годового стока на исследуемых водосборах нужно отметить рост притока воды в Иркутское водохранилище на 30% в ближайший из рассмотренных периодов 2026-2035 гг. согласно сценарию SSP4.5 (Рис.). Это объясняется увеличением стока Селенги и Верхней Ангары на 35-40% в связи с ожидаемым интенсивным ростом количества осадков по этому набору метеоданных. При этом отмечено снижение притока воды в Братское и Усть-Илимское водохранилища на 15-22%. При других комбинациях периодов 21 века и сценариях потепления зафиксировано снижение притока воды в Иркутское водохранилище на 7-19% в основном за счет интенсивного снижения стока Селенги с наибольшей величиной 37% в конце 21 века по сценарию SSP8.5. Одновременно для стока Верхней Ангары характерна положительная тенденция согласно SSP8.5, а для стока Баргузина – отрицательная для обоих сценариев в течение всего 21 века относительно базового периода 1985-2014 гг. Аномалии годового притока воды в Братское водохранилище в течение 21 века отрицательные согласно обоим сценариям потепления: от 6% до 22%. За исключением варианта 2026-2035 гг. при SSP4.5 аномалии годового притока воды в Усть-Илимское водохранилище, напротив, в основном положительные.

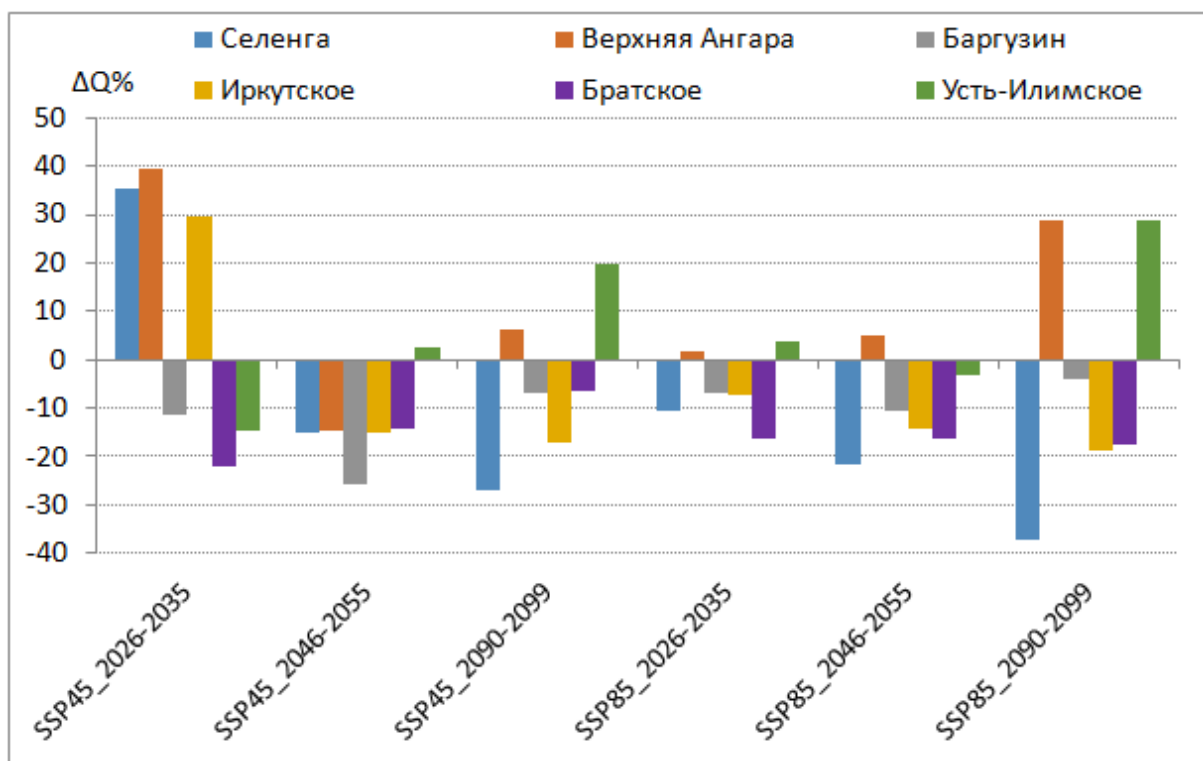


Рис. Аномалии годового стока рек на водосборах Иркутского, Братского и Усть-Илимского водохранилищ для различных периодов 21 века и сценариев глобального потепления относительно базового периода 1985-2014 гг.

В 21 веке ожидается уменьшение зимнего и летне-осеннего стока Селенги, в тоже время увеличение весеннего стока. Наиболее интенсивное увеличение весеннего стока характерно для бассейна Верхней Ангары при положительных аномалиях зимнего стока и отрицательных аномалиях летне-осеннего. В летне-осенний период сток Баргузина, а также на водосборах Братского и Усть-Илимского водохранилищ в течение 21 века снижается с различной степенью интенсивности в зависимости от комбинации периода и сценария потепления. При этом по весеннему стоку на этих

объектах тенденции противоположные. Учитывая низкий зимний сток, его аномалии на водосборах Братского и Усть-Илимского водохранилищ, а также Баргузина в течение 21 века то положительные, то отрицательные. Стоим отметить, резкий рост зимнего стока к концу 21 века при реализации экстремального сценария SSP8.5.

Благодарности

Работа выполнена в рамках НИР «Адаптация режимов работы ГЭС ООО Евросибэнерго – гидрогенерация к климатическим изменениям» и темы FMWZ-2022-0001 Государственного задания ИВП РАН.

Acknowledgments

The work was carried out within the framework of the project «Adaptation of operation modes of hydropower plants of EuroSibenergo-Hydrogeneration to climatic changes» and subject FMWZ-2022-0001 of the Governmental Order to WPI RAS.

Список литературы

1. Kalugin A. Future climate-driven runoff change in the large river basins in Eastern Siberia and the Far East using process-based hydrological models // *Water*. 2022. 14(4). 609.
2. Lange S. Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMIP3BASD (v1.0) // *Geosci. Model Dev.* 2019. 12. P. 3055–3070.
3. Motovilov Y., Gottschalk L., Engeland K., Rodhe A. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations // *Agric. For. Meteorol.* 1999. 98–99. P. 257–277.

Моделирование стока Волги в период развития раннехвалынской трансгрессии Каспийского моря

А.С. Калугин^{1*}, П.А. Морозова², Н.О. Попова¹

¹*Институт водных проблем Российской академии наук, г. Москва*

²*Институт географии Российской академии наук, г. Москва*
kalugin-andrei@mail.ru

Аннотация. Получена количественная оценка стока р. Волги в период хвалынской трансгрессии Каспийского моря по данным моделирования палеоклимата с учетом изменчивости характеристик подстилающей поверхности. Для проведения численных экспериментов использовалась физико-математическая модель формирования стока в бассейне р. Волга, построенная на базе геоинформационного комплекса ECOMAG. Согласно данным палеоклиматического моделирования климат бассейна Волги в период от последнего ледникового максимума до окончания раннего дриаса характеризовался температурой воздуха на 11-13°C ниже современной нормы и пониженными осадками. Согласно экспериментам с гидрологической моделью, норма годового стока Волги в период раннего дриаса при формировании хвалынской трансгрессии могла быть на 40% выше современной величины.

Ключевые слова: Волга, Каспийское море, хвалынская трансгрессия, формирование стока.

Modeling of the Volga River flow during the development of the early Khvalyn transgression of the Caspian Sea

A.S. Kalugin^{1*}, P.A. Morozova², N.O. Popova¹

¹*Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*
kalugin-andrei@mail.ru

Abstract. A quantitative estimate of the Volga River runoff during the Khvalyn transgression of the Caspian Sea was obtained based on paleoclimate modeling data, taking into account the variability of the land surface characteristics. The process-based model of runoff formation in the Volga River basin based on the geoinformation complex ECOMAG was used for numerical experiments. According to paleoclimatic modeling data, the climate of the Volga basin during the period from the last glacial maximum to the end of the Oldest Dryas was characterized by air temperatures 11-13°C below the modern norm and lower precipitation. According to the experiments with the hydrological model, the annual runoff rate of the Volga during the Oldest Dryas when the Khvalyn transgression was formed could be 40% higher than the modern value.

Keywords: Volga, Caspian Sea, Khvalyn transgression, flow formation.

Введение

В период стадии хвалынской трансгрессии Каспийского моря 17-13 тыс. л.н. его уровень превышал современный более чем на 50 м [5; 8]. Среди физических причин формирования этой трансгрессии Каспия рассматривают криоаридные климатические условия, талые ледниковые воды в результате дегляциации, распространение многолетнемерзлых пород на водосборе р. Волги. Целью данного исследования была количественная оценка стока р. Волги в период раннехвалынской трансгрессии Каспийского моря по данным моделирования палеоклимата с учетом изменчивости характеристик подстилающей поверхности. Для проведения численных экспериментов использовалась физико-математическая модель формирования стока в бассейне р. Волга, построенная на базе геоинформационного комплекса ECOMAG [7; 9].

Материалы и методы исследования

Модель формирования стока в бассейне р. Волги позволяет по метеорологическим данным описать пространственное распределение по территории водосбора процессов формирования и таяния снежного покрова, эвапотранспирации, вертикального тепло- и влагопереноса в зоне аэрации почвы, стекание воды по склонам водосбора, внутрпочвенный и грунтовый сток, движение воды в речной системе. Характеристики перечисленных процессов рассчитываются с суточным шагом по времени и пространственным разрешением порядка 1750 км². Подробное описание модели, методов задания ее параметров и верификации для условий современного климата дано в [1]. В частности, показано, что модель позволяет получить устойчивые (по статистическим критериям) результаты расчета водного режима р. Волги для лет с контрастными климатическими условиями.

Граничные условия гидрологической модели задавались по данным глобальной модели климата института Макса Планка MPI-ESM-CR, воспроизводящей климатические условия позднеледниковья с учетом влияния ледниковых щитов. Расчеты стока Волги производились по данным модели MPI-ESM-CR за период 18-13 тыс. л.н. По результатам расчетов определялись аномалии речного стока Волги в течение рассматриваемых периодов палеовремени относительно современного стока.

Ранее в работе [3] показано, что в позднеледниковье доля талого ледникового стока могла составлять 5-25% относительно современного стока Волги и характерна для периода 21-16 тыс. л.н., а конфигурация водосбора Волги соответствовала нынешней.

Исходя из представлений о климатических границах существования многолетнемерзлых пород при изотерме среднегодовой температуры воздуха ниже – 5°C, в расчетах по гидрологической модели их распространение учитывалось при палеоклиматических данных о понижении среднегодовой температуры воздуха в бассейне Волги примерно на 10°C относительно величины, соответствующей современному климату (+4°C).

Помимо палеоклиматических данных и возможного распространения многолетнемерзлых пород на водосборе Волги в гидрологической модели учитывались особенности растительного покрова в рассматриваемый период палеовремени. Как показали результаты палеогеографических исследований [2; 4], в конце периода максимума последнего оледенения (18-17.1 тыс. л.н.) и раннем дриасе (17-14.8 тыс. л.н.) в бассейне древней Волги были распространены ландшафты перигляциальной тундростепи, в беллинге (14.7-14.1 тыс. л.н.) и аллереде (14-12.8 тыс. л.н.) – перигляциальной лесостепи с преобладанием сосново-березовых формаций и кедрово-еловых формаций. Для расчета стока в условиях современного климата использована глобальная база данных о типах растительности и землепользования GLCC.

Результаты и выводы

На Рис. 1 представлены диаграммы изменения среднегоголетних величин температуры и дефицита влажности воздуха, годовых сумм осадков, рассчитанных по климатической модели MPI-ESM-CR и осредненных по бассейну Волги для периода дегляциации, раннего дриаса, беллинга и аллереда. Согласно рассчитанным данным все рассмотренные периоды в бассейне Волги оказались холоднее по сравнению с современным климатом на величину от 12.6°C в период дегляциации до 6.9°C в аллеред. Количество осадков было меньше современной величины на 18-34%. Дефицит влажности воздуха, влияющий на испарение с поверхности водосбора Волги, оказался ниже в среднем в 2 раза в период 18-14.8 тыс. л.н., на 32-38% – в период 14.7-12.8 тыс. л.н.

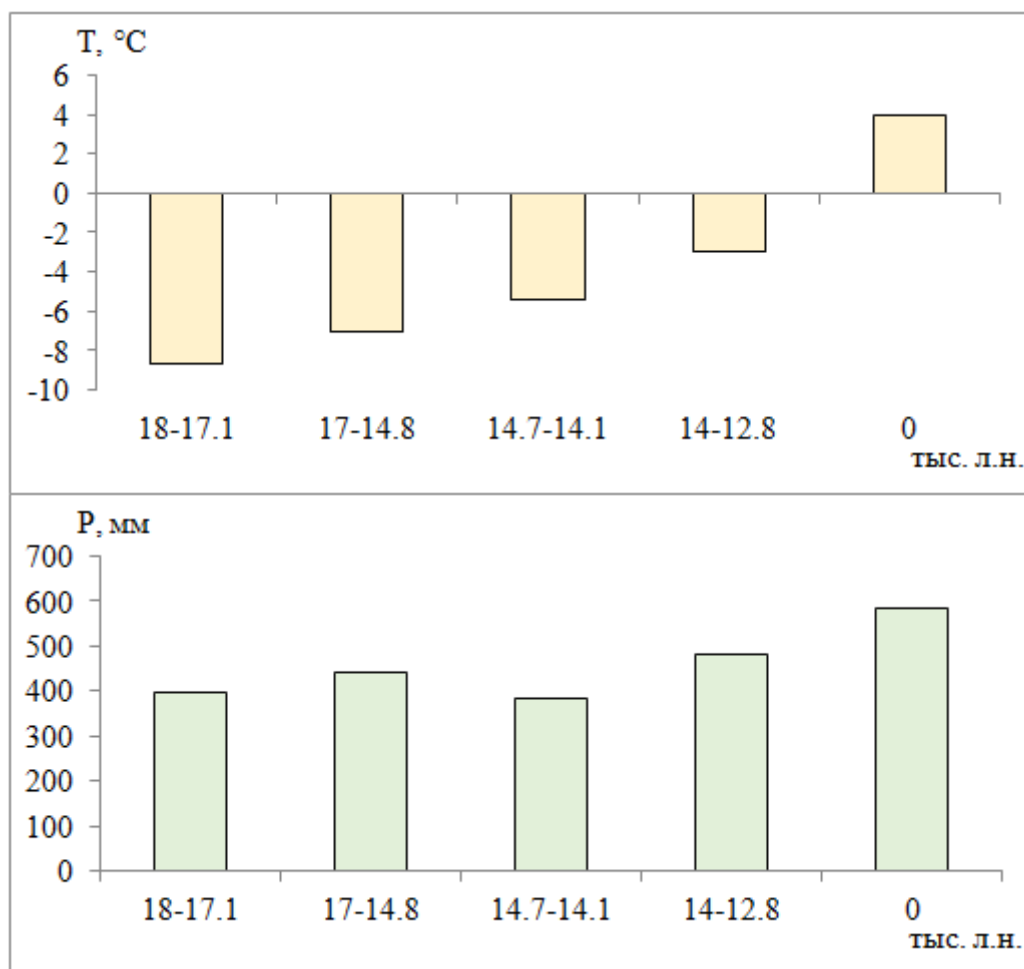


Рис. 1 Среднегодовые величины температуры воздуха и суммы осадков, осредненные для бассейна Волги, в течение рассматриваемых периодов палеовремени и при современном климате.

С учетом холодного климата в период дегляциации, раннего дриаса и беллинга для этих периодов в модели формирования стока задавалось распространение многолетнемерзлых пород на водосборе Волги, что в целом соответствует палеогеографическим представлениям [6].

В результате расчетов при использовании в гидрологической модели ECOMAG данных палеоклимата по модели MPI-ESM-CR в период 18-17.1 тыс. л.н. среднегоголетний сток Волги оказался выше современной величины на 24%, в раннем дриасе – на 38% до 358 км³, в беллинг ниже на 25% и около современной

величины в аллоред (Рис. 2). Тем самым, косвенно подтверждаются палеогеографические гипотезы о повышенном притоке воды с водосбора Волги в период развития раннехвалынской трансгрессии в раннем дриасе в результате потепления и роста осадков относительно последнего ледникового максимума при сохранении распространения многолетней мерзлоты, что приводит к снижению инфильтрации и увеличению коэффициента стока Волги до 0.67.

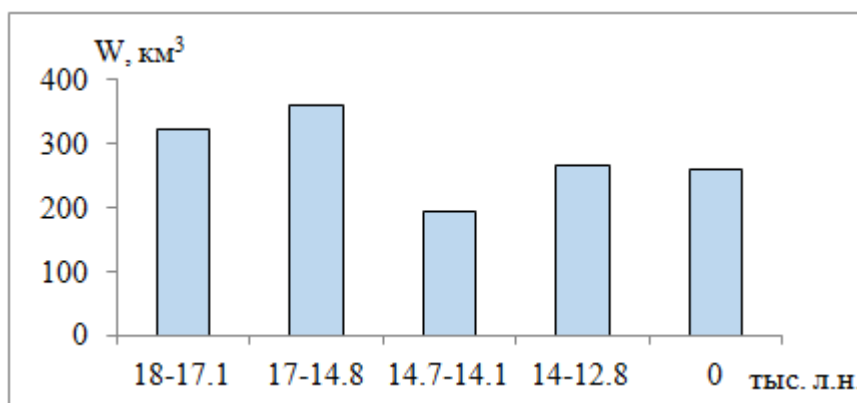


Рис. 2 Среднегодовой сток Волги в течение рассматриваемых периодов палеовремени и при современном климате.

Таким образом, согласно данным палеоклиматического моделирования климат бассейна Волги в период от 18 тыс. л.н. до окончания раннего дриаса характеризовался низкой температурой воздуха (на 11-13°C ниже современной климатической нормы) и пониженными осадками (68-76% от современной нормы). Согласно экспериментам с гидрологической моделью, норма годового стока Волги в период раннего дриаса могла составлять почти 360 км³, что на 40% выше современной нормы стока. Основные факторы повышенного речного стока – снижение испарения с палеоводосбора Волги, компенсирующее уменьшение осадков, а также распространение на водосборе послеледниковых многолетнемерзлых пород, снижающих потери стока на впитывание в почвогрунты.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-17-00215 – расчеты изменений стока на основе гидрологической модели) и Государственного задания ИВП РАН (тема FMWZ-2022-0001 – расчеты палеоклиматических изменений).

Acknowledgments

The work was supported by the Russian Science Foundation (project 19-17-00215 – calculations of runoff changes using hydrological model), the Governmental Order to Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences (subject no. FMWZ-2022-0001 – calculations of paleoclimate changes).

Список литературы

1. Гельфан А.Н., Калугин А.С. Многолетняя мерзлота в бассейне Каспия как возможный триггер позднехвалынской трансгрессии: проверка гипотезы с помощью модели формирования речного стока // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 6. С. 609–621.
2. Макшаев Р.Ф. Палеогеография Среднего и Нижнего Поволжья в эпоху раннехвалынской трансгрессии Каспия: дис. ... канд. геогр. наук, Москва, 2019.
3. Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Украинцев В.Ю. Вклад талых ледниковых вод в формирование стока Волги в последнюю ледниковую эпоху // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 6. С. 656–663.

4. Симакова А.Н. Развитие растительного покрова Русской равнины и Западной Европы в позднем неоплейстоцене – среднем голоцене (33-4,8 тыс. л.н.) (по палинологическим данным): дис. ... канд. геогр. наук, Москва, 2008.
5. Arslanov K.A., Yanina T.A., Chepalyga A.L., Svitoch A.A., Makshaev R.R., Maksimov F.E., Chernov S.B., Tertychniy N.I., Starikova A.A. On the age of the Khvalynian deposits of the Caspian Sea coast according to ^{14}C and $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ methods // *Quaternary International*. 2016. 409. P. 81–87.
6. Borisova O.K. Landscape and climatic conditions in the Central East European Plain in the last 22 thousand years: reconstruction based on paleobotanical data // *Water Resources*. 2021. 48. P. 886–896.
7. Kalugin A. Hydrological and meteorological variability in the Volga River basin under global warming by 1.5 and 2 degrees // *Climate*. 2022. 10(7). 107.
8. Kurbanov R., Murray A., Thompson W., Svistunov M., Taratunina N., Yanina T. First reliable chronology for the Early Khvalynian Caspian Sea transgression in the Lower Volga River valley // *Boreas*. 2021. 50. P. 134–146.
9. Motovilov Y. Hydrological simulation of river basins at different spatial scales: 1. Generalization and averaging algorithms // *Water Resources*. 2016. 43. P. 429–437.

Закономерности распространения и морфометрические характеристики четковидных расширений русел в бассейне р. Бузулук

А.А. Камышев*, А.М. Тарбеева

*Московский государственный университет, г. Москва, Россия
arsenii.kamyshev@yandex.ru*

Аннотация. Исследование посвящено четковидным руслам – специфическому морфодинамическому типу русел малых рек. Несмотря на их распространенность в приполярных регионах Сибири, Северной Америки и степной зоне Евразии, причины и закономерности их формирования до сих пор остаются дискуссионным вопросом. В данной работе проведен первичный анализ распространения расширений русел – четок – в степной зоне на примере водосбора реки Бузулук, притока Хопра, протекающего по Волгоградской области. С целью выявления факторов, определяющих причины возникновения четок, на основе анализа космических снимков, топографических карт и цифровой модели рельефа анализировалась связь распространения четковидных русел с порядками водотоков и уклонами русел. Установлено, что четковидные русла не характерны для верхних и нижних звеньев русловой сети, а их ареалы преимущественно сконцентрированы в северной, северо-восточной и восточной частях водосбора реки Бузулук. Были выявлены две обширные группы русловых расширений, отличающихся друг от друга морфологически и по возрасту. Результаты исследования внесут вклад в понимание формирования четковидных русел и факторов, влияющих на их распространение в степной зоне.

Ключевые слова: четковидные русла, река Бузулук, русловые процессы, специфические русловые формы.

Distribution and morphometry of beaded-shape channel extensions in the Buzuluk River basin

A.A. Kamyshev*, A.M. Tarbeeva

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
arsenii.kamyshev@yandex.ru*

Abstract. The study focuses on beaded streams, a specific morphodynamic type of small river channels. Despite their prevalence in the polar regions of Siberia, North America, and the Eurasian steppe zone, the reasons and patterns of their formation remain uncertain. This research presents a preliminary analysis of beaded streams within the steppe zone, using the example of the Buzuluk River basin, a tributary of the Khopyor River, flowing through the Volgograd region. In order to identify the factors that determine the causes of the appearance of the beaded streams, the relationship between the distribution of beaded-shaped channels with the orders of watercourses and channel slopes was analyzed. The study was based on the analysis of satellite images, topographic maps and a digital elevation model. Results indicate that beaded streams are absent in the upper and lower reaches of the river network, with their main habitats concentrated in the northern, northeastern, and eastern parts of the Buzuluk River basin. Two large groups of channel extensions (beads) were identified, differing from each

other morphologically and in age. The findings contribute valuable insights into the formation of beaded streams and the factors influencing their distribution in the steppe zone.

Keywords: Beaded streams, Buzuluk River, channel processes, specific channel forms.

Введение

Четковидные русла («beaded streams»), также известные как "chain-of-ponds" (цепочка прудов), представляют собой уникальный морфодинамический тип русел малых рек, отличающиеся особой формой и генезисом [1-3]. Несмотря на широкое распространение в полярных регионах Сибири и Северной Америки, а также в степной зоне Евразии и Австралии, причины и механизмы их формирования до сих пор остаются предметом активного научного изучения.

В данной статье мы представляем первый этап комплексного исследования, сфокусированного на анализе причин формирования четковидных русел в степной зоне; а также постановке задач и описании проблем, связанных с формализацией четковидных русел и методов их изучения.

С целью выявления факторов, определяющих причины возникновения расширений русел - четок, на примере эталонного водосбора р. Бузулук было проведено их дешифрирование и проанализирована связь их распространения с порядками водотоков и уклонами русел. Бузулук – приток Хопра, протекает по территории Волгоградской области, его протяженность составляет 314 км, а площадь бассейна – 9510 км²; средний расход – 12.5 м³/с; исток реки находится на западных склонах Приволжской возвышенности. Основными притоками являются реки Паника Степная, Чёрная (1-я), Карман, Кардаил, Большая Завязка, Черная (2-я), Мачеха и ряд более мелких водотоков. Водосбор Бузулука характеризуется достаточно однородными ландшафтными условиями и практически полностью распахан. Это увеличивает репрезентативность анализа геоморфологических и гидрографических причин формирования четковидных русел, чем и обусловлен выбор данного водосбора.

Материалы и методы исследования

Применялись дистанционные методы анализа гидрографической сети и геоморфологического строения бассейна Бузулук. В качестве аналитических комплексов использованы программы ArcGis (обработка данных) и SAS.Planet (первичный анализ бассейна).

Выделение четковидных русел осуществлялось на основе визуального поиска, который заключается в просмотре всей русловой сети в пределах водосбора.

После выделения всех четок выполнено определение порядков водотоков по методике Шейдеггера:

$$N = \log_2 P,$$

где P – число элементарных водотоков (водотоков первого порядка). Для оценки граничных условий формирования четок определялся порядок водотока и площадь водосбора выше верхней по течению четки, т.е. верхняя четка, выступала в качестве замыкающего створа водосбора. Применялись два подхода к выделению порядков водотоков. В первом случае их определение выполнялось по космическому снимку межлетнего периода, в качестве критерия выделения элементарного водотока являлась нераспаханность русел. Во втором случае определение осуществлялось по топографической карте ГГЦ масштаба 1:100 000. Критерием выделения являлось наличие условного знака водотока (сплошная или прерывистая синяя линия) либо наличие в пределах отрицательной формы рельефа русловых прудов.

Выполнен расчет значений средних уклонов водотоков в местах распространения на них четковидных русел с использованием топографической карты и цифровой модели

местности. Для р. Кардаил был построен продольный профиль русла, на который были нанесены места расположения четок.

Установленные параметры определялись с целью выявления связи между ними и местами расположения русел.

Результаты и их обсуждение

По результатам выделения всех четок (всего 1049 шт.) в пределах бассейна установлено их неравномерное распределение. Основные ареалы сконцентрированы в северной, северо-восточной и восточной частях водосбора. Также четковидные русла не характерны для самых верхних звеньев русловой сети и для низовьев наиболее крупных рек водосбора (Рис. 1а). Однако в низовьях р. Бузулук зафиксировано некоторое количество четковидных русел, это обусловлено разделением потока на несколько проток и растеканием по пойме, соответственно, несмотря на общий рост водности, водоносность конкретного русла (протоки) сокращается. Хорошо заметно (Рис. 1а), что после слияния рек Кардаил и Бузулук четковидные русла практически исчезают, что свидетельствует о том, что данный тип русла не может формироваться при достижении рекой определенной водности, величину которой планируется установить в дальнейших работах. Наибольшее количество четок зафиксировано в руслах рек Кардаил (265 ед.), Бузулук (244 ед.), Мачеха (с учетом р. Свиноухи) (103 ед.) и Черная №2 (97 ед.).

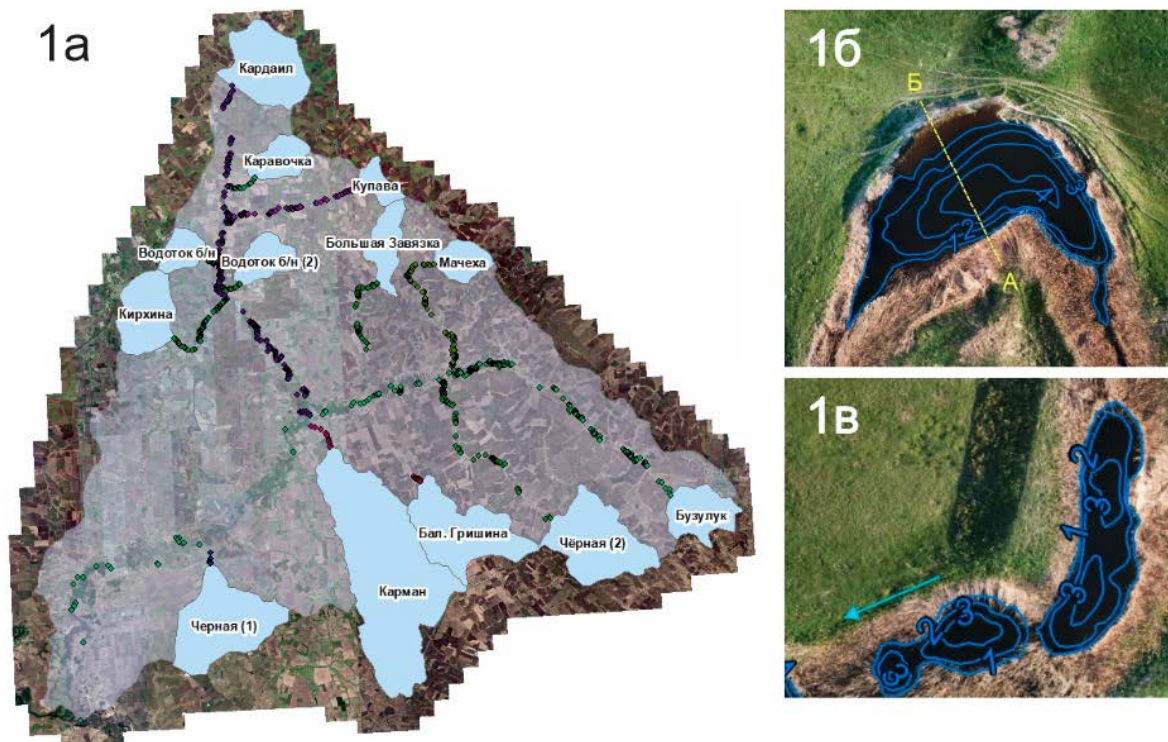


Рис. 1 а – схема бассейна р. Бузулук с распределением четковидных русел и выделенными водосборам выше распространения четок; б – расширение русла первой группы; в – расширение русла второй группы.

Ввиду того, что в литературе отсутствуют однозначные критерии выделения четковидных русел, возникла объективная проблема: какие локальные расширения русла следует выделять и относить к четковидным, а какие не следует. В настоящем исследовании выделялись все локальные расширения русла. По результатам этого были выявлены две обширные группы русловых расширений, морфологически отличающихся друг от друга. Первая группа представляет собой локальные расширения русла, в которых увеличивается расстояние между бровками высокой (3-5 м над урезом) луговой

поймы (Рис. 1б). Вторая группа представляет собой расширения в пределах молодой формирующейся низкой поймы, зарастающей тростником; при этом расстояния между бровками высокой поймы не меняются (Рис. 1в). Обе группы следует относить к четковидным руслам, однако, с высокой степенью вероятности можно утверждать, что их генезис различен. Вторая группа предположительно связана с заилением и зарастанием русел, а локальные расширения представляют собой незаросшие плесы. Первая группа вероятно более древняя, генезис ее пока неясен. Вероятно, к первой группе относятся также четки, встречающиеся в старицах на высокой пойме.

В связи с этим, возникает необходимость введения определения четковидного русла. Авторами предлагается следующее определение: четковидное русло – это специфический морфодинамический тип русла, представляющий собой последовательность локальных расширений бровок русла (чѐток), имеющих естественную природу и отличающихся округлой или овальной формой. Вероятно, в четках должна наблюдаться особая гидравлическая структура потока и режима наносов, однако до момента получения значительной выборки достоверных полевых данных это утверждение постулируется как гипотетическое.

Для чѐток также следует ввести ряд параметров, позволяющих их описывать и сравнивать между собой:

- 1) L – длина четки.
- 2) B – ширина четки.

1) Развитость R , определяемая как отношение ширины чѐтки к ее длине. На начальном этапе предлагается использовать следующую градацию: $R < 0.5$ – слабовыраженная четка, R от 0.5 до 1.2 – нормальная четка, $R > 1.2$ – гипертрофированная четка. После накопления и обобщения сведений о гидравлике потока в четковидных руслах граничные значения параметра развитости R вероятнее всего придется скорректировать.

Были определены площади водосборов и посчитаны порядки водотоков, начиная с которых происходит формирование четковидных русел (Рис. 1а, Табл.). Минимальное значение площади водосбора для формирования четок составляет 44 км² (р. Купава), среднее – 185 км², максимальное – 693 км² (р. Карман). При этом максимальные площади водосборов, при которых начинается формирование четок, сконцентрированы в южной части бассейна р. Бузулук. Однако для рек Черная №1, Карман и Бал. Гришина общее количество четок незначительно (11 ед. или менее).

Сравнение порядков рек, определенных по космическому снимку и топографической карте, показало, что на топографической карте в среднем происходит потеря примерно 4 порядков (Рис. 2). Порядки, полученные с применением различных методик, имеют высокий показатель связи (коэффициент корреляции составляет 0,9). Также получено линейное уравнение пересчета.

Связь между порядками водотоков и площадями водосборов не столь тесная, коэффициент корреляции составляет лишь 0,65. Соответственно взаимно-однозначный переход от площадей водосборов к порядкам для данной территории не применим.

Анализ уклонов русел (Табл.) показал, что четки встречаются в диапазоне средних уклонов от 0.26 м/км до 1.89 м/км, при среднем значении 0.90 м/км. Однако, необходимо отметить, что это осредненные значения уклонов русел в пределах распространения на них четок. Для дальнейшего уточнения связей между частотой встречаемости четок и уклонами планируется нанесение положения четковидных русел на продольные профили исследуемых водотоков. К настоящему моменту подобное построение выполнено только для р. Кардаил (Рис. 3), что недостаточно для формирования репрезентативной выборки.

Табл. Параметры водотоков, на которых выявлены четковидные русла.

№	Название	Количество четок	Площади водосборов, выше верхней четки (рис. 1а)	Порядок реки по снимку	Порядок реки по снимку по карте	Средний уклон русла, м/км
1	Кардаил	265	216	9.6	5.9	0.37
2	Каравочка	26	78	8.4	4.3	1.65
3	Водоток б/н 1	23	58	8.1	4.2	1.41
4	Водоток б/н 2	25	83	8.2	4.5	1.89
5	Кирхина	79	156	9.0	5.3	0.87
6	Купава	96	44	6.9	3.3	0.79
7	Большая Завязка	64	91	8.7	5.0	0.78
8	Мачеха*	103	71	8.0	4.3	0.77
9	Бузулук	244	123	7.8	3.6	0.26
10	Черная 1	6	281	8.1	4.3	Не рассчитывался
11	Балка Гришина	10	261	8.4	5.2	Не рассчитывался
12	Карман	11	693	9.7	5.6	0.61
13	Черная 2	97	257	8.9	4.3	0.51

* с учетом р. Свиноухи.

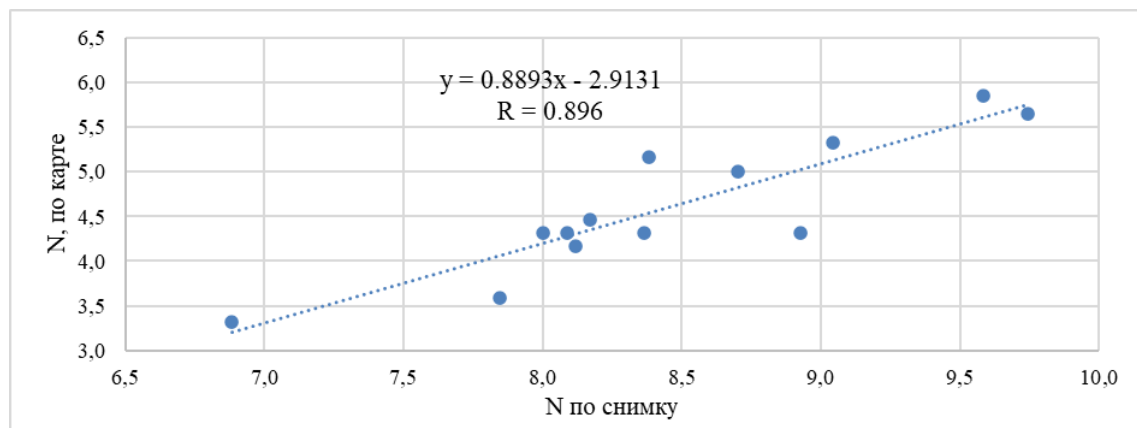


Рис. 2 Связь порядков водотоков N, определенных по снимку и по карте.



Рис. 3 Продольный профиль р.Кардаил с местами расположения четок.

Выводы

По результатам проведенного исследования получен ряд выводов:

- установлена неравномерность распределение четок в пределах водосбора;
- предложено определение четковидных русел и введены параметры формализации их морфометрии;
- установлено наличие двух морфологических групп четок, которые, вероятно, являются разновозрастными;
- получены предельные значения порядков и площадей водосборов, начиная с которых происходит формирования четок в бассейне р.Бузулук;
- рассчитаны диапазоны уклонов, в пределах которых существуют четки в бассейне р. Бузулук;
- для бассейна р. Бузулук получено уравнение связи между порядками рек, рассчитанными по топографической карте и определенными по космическому снимку.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00008, <https://rscf.ru/project/23-27-00008/>.

Acknowledgments

The work was supported by. Russian Science Foundation, project № 23-27-00008, <https://rscf.ru/en/project/23-27-00008/>.

Список литературы

1. Тарбеева А.М., Крыленко И.В., Сурков В.В. Озеровидные расширения русел рек степной зоны и возможные причины их формирования (бассейн р. Урал в районе г. Орска) // Геоморфология. 2016. № 1. С. 73-81.
2. Arp C. D., Whitman M., Jones B., Grosse G., Gaglioti B., Heim K. Distribution and biophysical processes of beaded streams in Arctic permafrost landscapes // Biogeosciences. 2015. № 12 (1). P. 29-47.
3. Mould S., Fryirs K. The Holocene evolution and geomorphology of a chain of ponds, southeast Australia: Establishing a physical template for river management. // Catena. 2017. 149. P. 349–362.

Автоматизация измерения скоростей течения при мониторинге водных объектов

А.А.Кацура^{1,2*}, А.М.Алабян^{1,2}, В.М.Морейдо^{1,2}

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, г. Москва, Россия*

²*Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия
akatsura01@mail.ru*

Аннотация. В работе рассматривается применение новейшего крупномасштабного оптического метода измерения скорости частиц (LSPIV). В России этой темой практически не занимаются, однако технология LSPIV позволяет с достаточно высокой точностью определять поверхностные скорости течения, а также их вектора. Этот бесконтактный метод представляется перспективным для получения большого количества новых данных в уже изученных районах России, а также проведения постоянного мониторинга в менее изученных районах. В рамках данного исследования были проведены измерения на р. Сетунь, предприняты попытки оценки результатов. После обработки данных был вычислен средний коэффициент пересчёта поверхностного расхода воды в действительный $\alpha_{cp} = 0.86$, что близко к теоретическому коэффициенту 0.85. Выявлены преимущества и недостатки методики, описаны перспективы развития сети гидрологического мониторинга, основанные на применении методики.

Ключевые слова: компьютерное зрение, технология LSPIV, измерение скорости течения потока, бесконтактный метод, сеть гидрологического мониторинга.

The data of paired catchments for the hydrograph model parametrization in the Kama reservoir basin

A.A. Katsura^{1,2*}, A.M. Alabyan^{1,2}, V.M. Moreido^{1,2}

¹*M. V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

²*Water Problems Institute of Russian Academy of Science, Moscow, Russia
akatsura01@mail.ru*

Abstract. The paper examines the application of the latest large-scale particle image velocimetry method (LSPIV). In Russia, this topic is not widely studied, however, LSPIV technology allows for the determination of surface flow velocities and their vectors with relatively high accuracy. This contactless method appears promising for obtaining a large amount of new data in already studied areas in Russia, as well as for conducting continuous monitoring in less studied areas. In this study, measurements were conducted on the Setun River, and attempts were made to assess the results. After data processing, the average conversion coefficient for converting surface water discharge to actual discharge was calculated as $\alpha_{avg} = 0.86$, which is close to the theoretical coefficient of 0.85. The advantages and disadvantages of the methodology were identified, and the development prospects of a hydrological monitoring network based on the application of the methodology were described.

Keywords: computer vision, LSPIV technology, flow velocity measurement, contactless method, hydrological monitoring network.

Введение

На данный момент большинство существующих систем мониторинга работают на измерении уровней воды при помощи контактных методов (регулярных измерений на гидропостах, а также логгеров). Интенсивный подъем уровня является главным сигнализатором о весеннем половодье или дождевом паводке – опасных гидрологических явлениях, связанных с увеличением речного стока. Однако их причины далеко не всегда связаны только с увеличением водности. Зачастую большую роль играют заторные процессы. Особенно актуальна эта проблема для северных рек России. Целесообразно проведение измерений скоростей течения для возможности оперативного реагирования на возникновение затора или другого опасного гидрологического явления. В данный момент на объектах мониторинга ведутся периодические измерения скоростей течения. Для максимальной информированности необходимо добиться лучшего временного разрешения данных не только по уровням, но и по скоростям. Для этого возможно применение современных технологий распознавания объектов с одновременным измерением их скорости.

Материалы и методы исследования

В основе метода автоматического измерения поверхностной скорости течения водного объекта лежит крупномасштабный оптический метод измерения скорости движущихся частиц (англ. Large-Scale Particle Image Velocimetry - LSPIV) для обработки изображений [5]. Схема обработки исходных данных представлена на Рис. 1. Использовались программы PIVlab и Rectification of Image Velocity Results (RIVeR). Для анализа подходит любой видеофрагмент, на котором полностью виден участок реки, а также четыре опорных точки на местности с измеренными расстояниями между ними. Угол съёмки не имеет значения.

Видеофрагмент преобразуется в серию восьмибитных чёрно-белых кадров. На данном этапе в программе RIVeR также можно задать частоту кадров и дополнительную коррекцию объектива (для некоторых видеокамер). Дальнейшая обработка производится при помощи программы PIVlab[3].

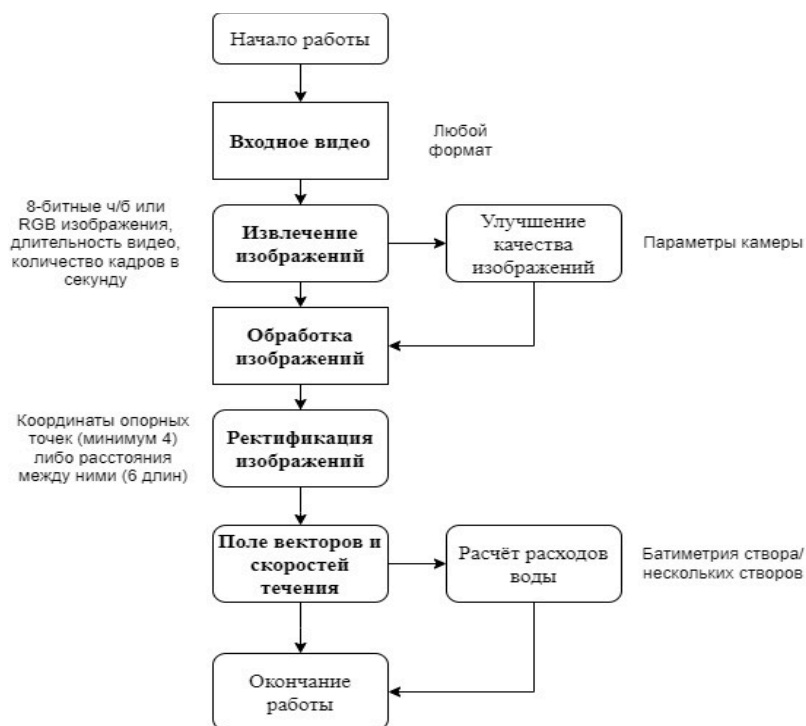


Рис. 1 Схема обработки исходных данных.

Существует два схожих метода: LSPIV и LSPTV. Если основной целью анализа является определение поля средней скорости (например, для оценки расхода потока), и присутствует большое количество индикаторов (трассеров), таких как пена, ветви деревьев, различные завихрения, древесная щепка и т.д., то необходим анализ в эйлеровой системе отсчёта с помощью PIV. В противном случае, если плотность трассеров невелика и требуются индивидуальные траектории, то следует использовать PTV и лагранжевую систему отсчёта [6]. В настоящей работе будет использоваться метод PIV, так как он более универсален и требует меньших мощностей для расчётов.

Программа раскладывает кадры из исходного видео в пределах интересующей области на последовательные векторы пикселей и применяет различные фильтры для улучшения качества изображения и, соответственно, результата анализа (CLANE, дискретное преобразование Фурье). В результате для каждой группы пикселей на каждой паре снимков рассчитывается пространственный вектор, другими словами – куда переместился кластер.

В программе возможна калибровка полученных результатов – автоматическая калибровка по возможным скоростям течения, статистическая – по СКО и др. показателям, качественная – по качеству участка изображения. После калибровки все пропуски заполняются интерполяцией между «верными» векторами с определённым весом, после чего строится поле усреднённых векторов по всей серии снимков.

Далее необходима ректификация снимков – процесс получения неискажённого спроецированного изображения, которая производится в программе RIVeR. Предполагается, что водная поверхность неоднородна по высоте, однако колебания настолько небольшие, что она принимается за плоскость под углом (существует уклон). Для ректификации необходимо назначить минимум четыре опорные точки. Ими могут быть крупные камни, стволы деревьев, постройки или установленные самостоятельно маркера. Измеряются расстояния между каждым опорным пунктом (шесть расстояний, включая диагонали). Затем автоматически строится система координат с использованием метода наименьших квадратов и взятием одной из четырех точек отсчета в качестве начала координат. Правильная ректификация крайне важна для получения верных результатов.

Вектора смещения, полученные при анализе в программе PIVlab, переводятся в реальные координаты. При этом для ускорения вычислений производится расчёт только в узлах сетки. Отдельно происходит ректификация одного снимка, на который накладываются вектора смещения.

В RIVeR присутствует модуль расчёта расхода воды в заданном сечении. Для расчёта необходимо загрузить файл измерений глубин водотока (или абсолютных отметок и уровня) на данном створе в формате .csv или .txt. Программа автоматически определит по полю скоростей нужные значения. В случае пропусков модуль автоматически интерполирует значения скорости. Формула для расчёта расхода воды по полю поверхностных скоростей:

$$Q_s = \sum_{i=1}^{N-1} d * \left(h_i + \frac{h_{i+1}}{2} \right) * \left(V_{S_i} + \frac{V_{S_{i+1}}}{2} \right) \quad (1)$$

Для расчёта реального расхода необходимо знать коэффициент пересчёта поверхностной скорости в среднюю α . По таблице Г.В. Железнякова $\alpha = 0,6 - 0,9$. V.T. Chow предлагает $\alpha = 0.85$ [1;2]. Коэффициент α зависит от многих параметров, например, от шероховатости русла, морфометрии створа, распределения скоростей течения по створу и т.д. Подтверждено, что расход, полученный при помощи поверхностной скорости течения может использоваться для расчёта реального расхода, так как диапазон изменения коэффициента α лежит в границах от 0.8 до 0.93 [4]. Формула для расчёта реального расхода:

$$Q = \alpha * Q_s \quad (2)$$

Результаты и выводы

Для проверки методики измерений были организованы полевые работы на р. Сетунь в г. Москве, которые состояли из:

- Промерных работ на заданном створе
- Измерения скоростей течения с помощью ИС1-1 «Посейдон»
- Видеосъёмки участка реки (GoPro 10, iPhone 13, DJI Mavic 2 Mini)

Измерения проводились в период с 19 декабря 2022 по 27 апреля 2023 года.

3 точки измерений: м. Давыдково, ниже моста (1), м. Давыдково, мост (2), ул. Мосфильмовская (3).

Табл. Сводная таблица результатов измерений, а также возможные факторы, влияющие на расчёт векторов смещения программой PIVlab.

Дата и точка наблюдений	V RIVeR м/с	V Посейдон м/с	Q _s , м ³ /с	Q, м ³ /с	α	b, м	Облачность, баллы	Ветер м/с
19.12.2022 (2)	0.34	0.29	0.91	0.84	0.92	7	10	4
23.02.2023 (2)	0.32	0.22	0.84	0.74	0.88	7.5	2	5
23.02.2023 (1)	0.27	0.21	0.83	0.77	0.93	6.2	2	5
23.03.2023 (3)	0.53	0.42	4.78	3.78	0.79	11.3	3	6
02.04.2023 (2)	0.43	0.36	1.56	1.31	0.84	8.6	10	3
27.04.2023 (3)	0.44	0.35	2.7	2.15	0.80	9	7	2

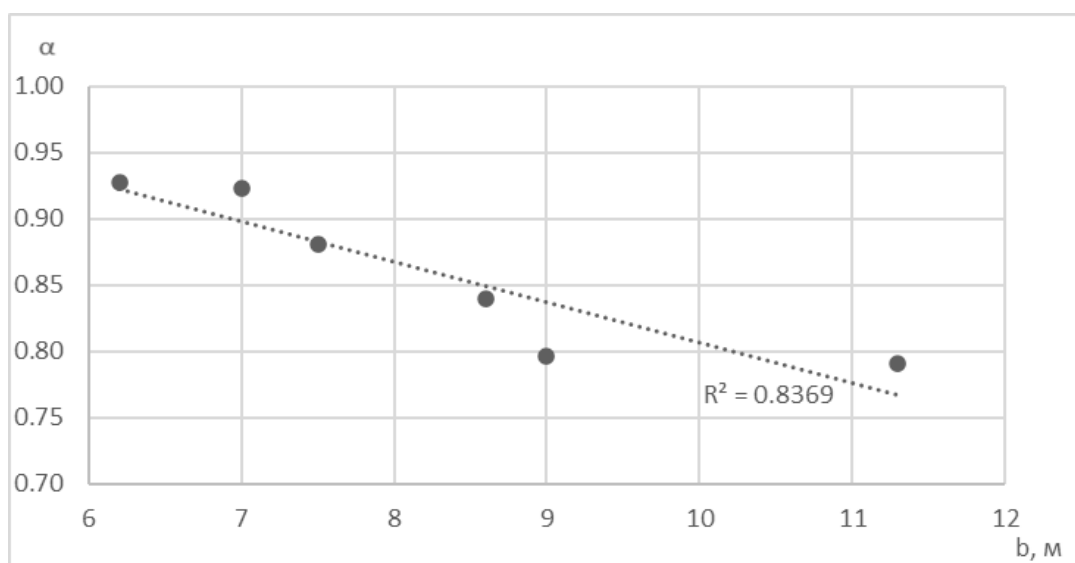


Рис. 2 Корреляция коэффициента редукции расхода и ширины русла.

Обнаружена сильная корреляция между коэффициентом α и шириной русла (Рис. 2). Возможно, это связано с тем, что менее широкие участки меньше искажались вследствие ректификации, поэтому погрешности были небольшими. Корреляция между α и скоростью ветра не прослеживается, однако сильный ветер может вызывать рябь и «барашки», что теоретически может приводить к улучшению анализа (Рис. 3).

Высокие значения коэффициента α связаны с практически ясными либо, наоборот, с пасмурными днями. Однородное освещение может уменьшить ошибки расчёта векторов смещения (Рис. 4).

Суммарно было проведено шесть измерений, из них три при помощи телефона, два при помощи экшн-камеры и одно – с квадрокоптера (Табл.). Средний коэффициент

редукции расхода α равен 0.86, что очень близко к предложенному V.T.Chow $\alpha = 0,85$. Факторами, положительно влияющими на точность измерений, были признаны использование штатива или опоры при съёмке, небольшая ширина русла, использование камер с разрешением 4К, съёмка при высокой облачности или её отсутствии.

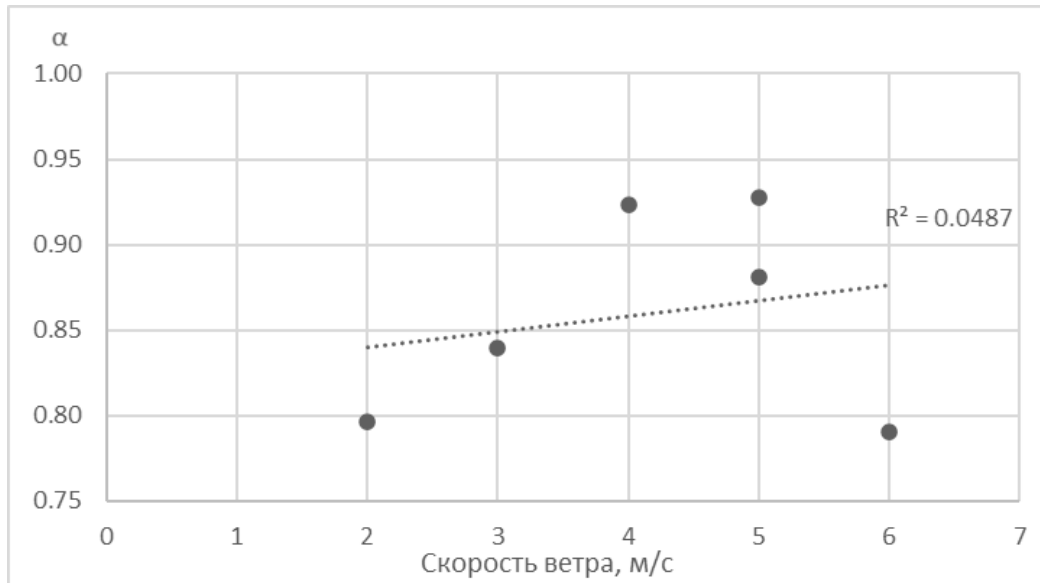


Рис. 3 Корреляция коэффициента редукции расхода и скорости ветра.

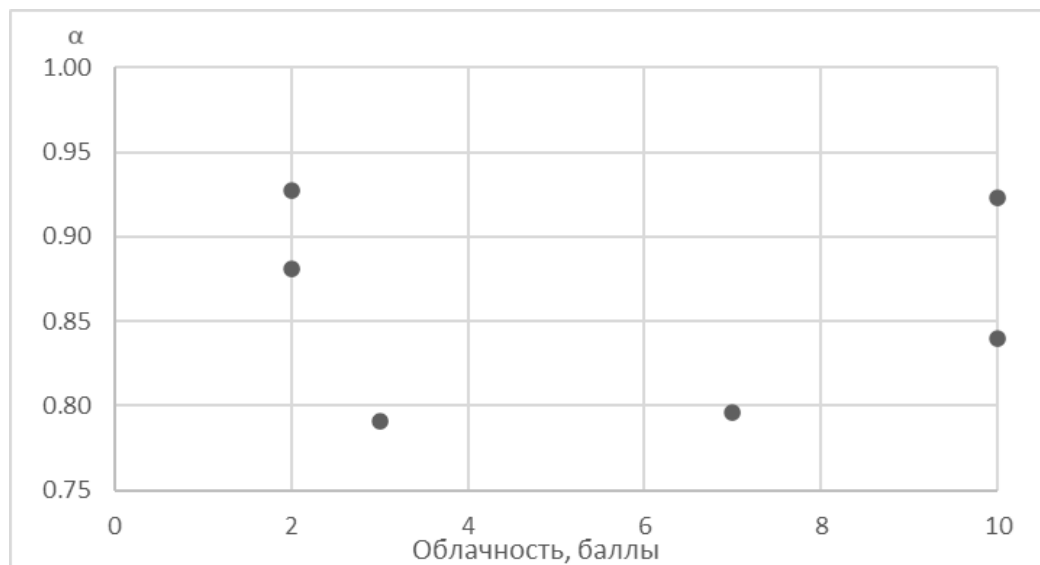


Рис. 4 Зависимость коэффициента редукции расхода от облачности.

Для дальнейшего развития рассмотренного метода требуется разработка плана исследований. Концептуальную схему создания системы бесконтактного мониторинга скорости течения водных объектов можно разделить на несколько этапов (Рис. 5):

1. Подготовительные работы – выбор участка реки, промеры, геодезическая съёмка, измерения скоростей, расходов, построение кривых $Q = f(H)$ и $Q = f(V)$, расчёт коэффициента редукции расхода α
2. Установка и наладка оборудования, разработка специализированного ПО (Python, OpenCV)
3. Апробация комплекса в различных условиях и фазах водного режима
4. Начало полноценной работы, масштабирование методики

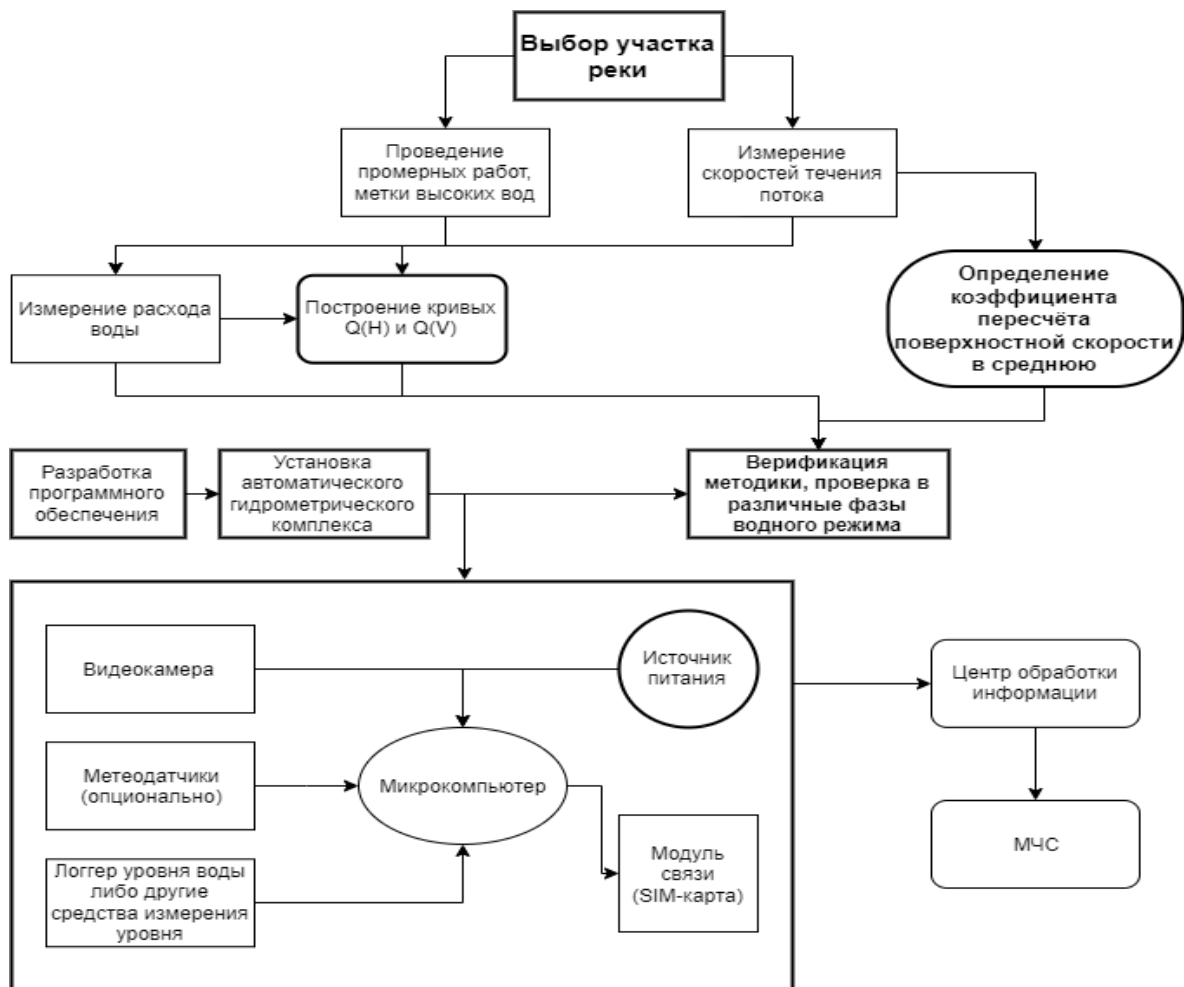


Рис. 5 Концептуальная схема перспективной системы автоматического мониторинга рек.

Список литературы

1. Акименко Т. А. Практикум по гидрометрии: Учеб. пособие. - Москва: Изд-во Моск. гос. ун-та, 2003 (Полигр. отдел географического фак.). - 85 с.;
2. Chow V. T. 1959 Open-Channel Hydraulics //MCGraw Hill. - 1959.
3. Kantoush S. A. et al. LSPIV implementation for environmental flow in various laboratory and field cases //Journal of Hydro-environment Research. - 2011. - Т. 5. - №. 4. - С. 263-276.
4. Cheng R. T. et al. Evaluating a radar-based, non contact streamflow measurement system in the San Joaquin River at Vernalis, California. - 2004. - №. 2004-1015.
5. Patalano A., García C.M., Rodríguez A. Rectification of Image Velocity Results (RIVeR): A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV) // Computers & Geosciences. - 2017. - Т. 109. - С. 323-330. <https://doi.org/10.1016/J.CAGEO.2017.07.009>.
6. Perkins R.J., Hunt J.C.R. Particle tracking in turbulent flows. - 1989. - С. 286-291. https://doi.org/10.1007/978-3-642-83822-4_44/COVER.

Интеллектуальный анализ гидрологических данных: Влияние осенне-зимне-весенних температур и осадков на максимумы весенних половодий горных рек

Ю.Б. Кирста*, И.А. Трошкова

*Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул, Россия
kirsta@iwep.ru*

Аннотация. Предложена универсальная методология интеллектуального анализа (deep mining) гидрологических данных по построению высокоточных аналитических моделей речных стоков. Методология, называемая системно-аналитическим моделированием, основана на системно-иерархическом подходе и многофакторном анализе больших выборок экспериментальных данных путем решения обратной математической задачи. С ее помощью проанализированы данные гидрологических наблюдений 1951–2020 гг. за максимумами весенних (апрельских) половодий с ледоходом на 34 средних и малых реках Алтае-Саянской горной страны. Для учета метеорологической обстановки на водосборах использованы данные 11 реперных метеостанций и разработанная методика по нормированию среднемесячных температур воздуха и месячных осадков на их среднемноголетние значения с последующим усреднением нормированных величин по всей территории страны. Установлены зависимости максимумов половодий ($\text{м}^3/\text{с}$) от метеорологических условий осенне-зимнего периода и ландшафтной структуры территории. В ходе исследований построена аналитическая модель, обеспечивающая среднесрочный прогноз максимумов весенних половодий с высокой точностью. Последняя характеризуется критерием Нэша-Сатклиффа $\text{NSE}=0.78$, находящимся в диапазоне его наилучших значений 0.75–1.0 для гидрологических моделей. Определена чувствительность модели к осенне-зимним осадкам (определяют 29% дисперсии максимумов), ландшафтной структуре речных водосборов (14%) и зимним температурам воздуха (0.8%). Отдельные оценки аналогичной чувствительности к апрельским осадкам и температурам дали 22% и 6%. Все оценки исключают влияние ошибок наблюдений за факторами среды, в частности, ошибок пространственного усреднения метеорологических характеристик и определения границ ландшафтов.

Ключевые слова: горные реки, весеннее половодье, прогноз, системно-аналитическое моделирование, ГИС, Алтай-Саяны.

Deep mining of hydrological data: The influence of autumn-winter-spring temperatures and precipitation on spring flood maximums in mountain rivers

Y.B. Kirsta*, I.A. Troshkova

*Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia
kirsta@iwep.ru*

Abstract. The universal methodology of data mining is proposed for constructing high-performance analytical models of river runoffs. The methodology, called system-analytical modeling, is based on a system-hierarchical approach and multiple-factor analysis of large experimental datasets via solving an inverse mathematical problem. It was applied to analyze the data of hydrological observations 1951–2020 on spring (April) flood maxima with ice drift for 34 medium and small rivers of the Altai-Sayan mountain country. To take into account the meteorological situation in the catchments, we used the data of 11 reference weather stations and the developed methodology for normalizing mean monthly air temperatures and monthly precipitation to their long-term averages with subsequent averaging the normalized values throughout the country. Dependences of maximum flood discharge (m^3/s) on autumn-winter meteorological conditions and landscape structure of the territory have been established. In the course of the research, we built the analytical model that provides a medium-term forecast of flood discharge maxima with high accuracy. The latter is characterized by the Nash-Sutcliffe criterion $\text{NSE}=0.78$, which lies in the range of its highest values $0.75\text{--}1.0$ for hydrological models. The model sensitivity to autumn-winter precipitation (contributes 29% to the variance of discharge maxima), landscape structure of river catchments (14%), and winter air temperatures (0.8%) is determined. Separate estimates of similar sensitivity to April precipitation and temperatures gave 22% and 6%. All estimates exclude the influence of errors in environmental factor observations, in particular, errors in spatial averaging of meteorological characteristics and determination of landscape boundaries.

Keywords: mountain rivers, spring flood, forecast, system-analytical modeling, GIS, Altai-Sayan.

Введение

Интеллектуальный анализ (ИА), или Data Mining, представляет собой один из важных разделов аналитики данных как науки (Data Science). Научное и прикладное значение ИА сейчас быстро возрастает из-за появления больших объемов различных данных, для углубленного анализа которых стандартные статистические методы недостаточны [1]. ИА позволяет выявить из больших выборок данных скрытую в них полезную информацию об изучаемых процессах и системах, меняющихся под действием разных факторов. Методы ИА основаны на совокупном использовании классической статистики, специальных компьютерных технологий и имеющихся знаний об исследуемых объектах [8]. Постоянное обновление этих методов обеспечивает их активное применение в бизнесе, науке, медицине, образовании и других областях нашей жизнедеятельности. ИА становится актуальным и в гидрологии, где накоплены значительные объемы данных и возрастает потребность в прогнозах различных гидрологических процессов. В данной работе мы представляем первую стандартную методологию ИА для разработки высокоточных аналитических моделей природных гидрологических систем. Она использована для моделирования весенних половодий с ледоходом на горных реках и среднесрочном прогнозе их максимальной величины, когда половодья становятся опасными для живущего около рек населения. Прогнозы выполняются с учетом ландшафтной структуры водосборных бассейнов рек и метеоусловий за предшествующие осень и зиму.

Материалы и методы исследования

Нами рассмотрены гидрологические системы 34 средних и малых рек Алтае-Саянской горной страны, расположенной в центре Азии ($50\text{--}56^\circ$ с.ш., $83\text{--}100^\circ$ в.д.) и занимающей более $2\,000\,000\text{ km}^2$. Горные хребты страны достигают $2000\text{--}4500$ м н.у.м. Климат преимущественно умеренно континентальный с холодной зимой и прохладным летом. Его отличает выраженная вертикальная поясность и значительные инверсии температур с высотой. Основная часть осадков связана с приходом влажных воздушных

масс с запада. На северных склонах гор на высотах более 3000 м выпадает 1200–2500 мм осадков в год, на их средних частях – до 600 мм, и у подножия – около 200 мм [2]. Все это приводит к формированию различных ландшафтно-климатических зон: ледников, гольцов, горных тундр и альпийских лугов на высокогорьях, хвойных лесов, степей и полупустынь на склонах и межгорных котловинах. Питание многочисленных рек страны является смешанным снегово-дождевым или ледниковым, причем снеговое питание составляет более 50% их годового стока. Половодья делятся с апреля по июнь при первом максимуме (совмещенным с ледоходом) в апреле.

Для исследований взяты наблюдения Российской гидрометеорологической службы 1951–2020 гг. за апрельскими пиками стоков ($\text{м}^3/\text{с}$) 34 выбранных рек. Требуемая для ИА единообразная выборка гидрологических данных создана путем нормировки всех стоков на их среднемноголетние значения в каждом речном бассейне. Такой переход к безразмерным единицам измерения стоков позволил убрать разный масштаб гидрологических процессов и уменьшить стандартное (среднеквадратичное) отклонение выборки. Выделено 12 типов наземных ландшафтов и один водный (13-й), что дало возможность отразить высотно-поясную неоднородность почвенно-растительного покрова и пространственно разделить гидрологические режимы стоков с ландшафтов. Выделение последних, расчет их площадей и высот в каждом речном бассейне осуществлены средствами ArcGIS 10.2 and ArcGIS 3D Analyst на основе картографических материалов ИВЭП СО РАН. Нормируя площади ландшафтов на площадь каждого бассейна, мы перешли к безразмерным единицам их измерений.

При формировании выборок метеорологических данных нами использованы среднемесячные температуры воздуха и месячные осадки, наблюдаемые в 1951–2020 гг. на 11 реперных метеостанциях. Эти данные тоже были нормированы на их среднемноголетние значения и затем пространственно усреднены по всей территории страны согласно разработанной методике [3]. Среднемесячные температуры холодного периода года были нормированы на среднемноголетнее значение температуры по каждой метеостанции за январь, а теплого периода – за июль. Все месячные осадки были нормированы на их среднемноголетнее значение по каждой метеостанции за июль. Взяв средние по 11 метеостанциям значения характеристик, мы получили пространственно обобщенную динамику нормированных температур воздуха и осадков, единую для всей территории Алтае-Саянской горной страны. Эта динамика адекватно характеризовала реальные изменения факторов в любой части страны и не зависела от координат и высоты территории.

Таким образом, нами были охвачены три иерархических уровня организации природных гидрологических систем: Алтае-Саянская горная страна в целом, ее отдельные речные бассейны и отдельные ландшафты. Созданная база данных включала: гидрологическую выборку (около 300 нормированных значений пиков весенних половодий на 34 реках в отдельные годы, две метеорологические (840 нормированных среднемесячных температур воздуха и 840 нормированных месячных осадков), две ландшафтные (160 нормированных значений площадей и 160 ненормированных высот ландшафтов), пространственную привязку гидрологических и ландшафтных характеристик к речным бассейнам, временную привязку гидрологических и метеорологических характеристик к периоду 1951–2020 гг. с шагом по времени один месяц.

Предлагаемая методология ИА имеет второе более корректное название – системно-аналитическое моделирование [4]. Она основана на системно-иерархическом подходе и одновременном анализе большого числа различных процессов, идущих в изучаемой сложноорганизованной системе. Под термином «аналитическое» мы

подразумеваем количественное описание динамики изучаемых процессов и возможность исследования структурно-функциональной организации системы.

В ходе ИА создается математическая модель изучаемых процессов (например, интегро-дифференциальная, алгебраическая, имитационная), на основе которой конструируется система уравнений большой размерности. После подстановки в систему имеющихся данных наблюдений решается обратная математическая задача, в ходе которой определяются значения всех коэффициентов и невязка модели (стандартное отклонение рассчитанных характеристик от их наблюдаемых значений). Эффективность предложенной универсальной методологии ИА многократно проверена при моделировании различных сложноорганизованных природных систем: фенологического развития растений пшеницы, ежегодного влагообмена в почвах, многолетней динамики пустынных экосистем, многолетней динамики агроценозов и долгосрочного прогноза их урожайности, изменения климата в России и США, долгосрочного прогноза содержания токсикантов в пшенице, выделения зон дестабилизации климата на континентах, гидрологического и гидрохимического (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , Fe, растворенные минеральные и взвешенные вещества) стоков рек.

ИА включает ряд последовательно выполняемых этапов [5; 6]. На первом этапе определяются три иерархических уровня организации процессов в анализируемой системе. На втором выбирается шаг описания процессов и изменений факторов среды в пространстве и времени, а также осуществляется подготовка данных для моделирования (см. выше). На третьем выбирается тип модели и составляются ее уравнения, которые должны соответствовать физическим, гидрологическим и иным законам и закономерностям. На четвертом оцениваются адекватность (точность) модели и ее чувствительность к вариациям факторов среды. На последнем пятом этапе оцениваются прикладные возможности разработанной модели.

Результаты и выводы

Разработанная с помощью ИА универсальная балансовая модель для среднесрочного прогноза пиков весенних половодий на горных реках имеет вид [6]:

$$Q^i = H(c_1, c_2, 1, 1, c_3, c_4, P_1) \left\{ \sum_k a_k S_k^i P_1 H(c_9, c_{10}, 1, 1, c_{11}, c_{12}, h_k^i) + \sum_k b_k S_k^i P_2 H(c_5, c_6, 1, 1, c_7, c_8, T_2) H(c_9, c_{10}, 1, 1, c_{11}, c_{12}, h_k^i) \right\} + d, \quad (1)$$

где Q^i – ежегодно прогнозируемое значение пиков половодий для выходного створа речного бассейна i , $i=1-34$; первое и второе слагаемые в правой части (1) соответствуют вкладам осеннего периода (IX–XI месяцы) и текущего зимнего (XII–III), соответственно; a_k, b_k – параметры, характеризующие вклад k -го ландшафта за соответствующий период, $k=1-13$; S_k^i – нормированная площадь k -го ландшафта бассейна i ; h_k^i – высота ландшафта, метры н.у.м.; P_1, P_2 – отклонения нормированных месячных осадков от их среднесезонных значений за осенний и зимний периоды соответственно; T_2 – отклонение нормированных среднемесячных температур воздуха от среднесезонного значения за зимний период; H – кусочно-линейная функция (2); $c_{1-4}, c_{5-8}, c_{9-12}$ – параметры, характеризующие влияние осенних осадков P_1 и зимней температуры воздуха T_2 на пики половодий, а также высоты ландшафтов h_k^i на количество осадков; d – постоянная доля стоков ($d \leq 1$), характеризующая потери талых вод на промачивание почв и просачивание в зону трещиноватых пород.

H представляет собой непрерывную кусочно-линейную функцию, состоящую из трех произвольно изменяемых линейных фрагментов:

$$H(X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2, X) = \begin{cases} Y1 + Z1(X - X1), & \text{если } X < X1 \\ \frac{Y2-Y1}{X2-X1}(X - X1) + Y1, & \text{если } \begin{cases} X1 \leq X < X2 \\ X1 \neq X2 \end{cases} \\ Y2 + Z2(X - X2), & \text{если } X \geq X2 \end{cases},$$

где $X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2$ – параметры, определяемые в ходе решения обратной задачи; X – какая-либо переменная модели.

В правой части (1) суммируются $13+13=26$ анализируемых гидрологических процессов, формирующих пик половодий в каждом из 34 речных бассейнов. Их одновременный анализ и есть собственно ИА гидрологических данных путем решения обратной математической задачи. Для этого наблюдаемые ~ 300 значений пиков половодий подставляются в систему из уравнений (1) вместо Q^i для конкретных речных бассейнов и лет. Затем система решается оптимизационными средствами пакета MATLAB для определения значений 39 параметров и невязки модели (прогнозов).

Для оценки точности прогнозов по модели (1) использован известный критерий Нэша-Сатклифа NSE [9], составивший 0.78. Это значение отвечает высокому качеству гидрологических моделей ($0.75 < NSE \leq 1.0$), что весьма редко для прогнозов половодий на горных реках. Чувствительность модели охарактеризована как проценты дисперсии наблюдаемых пиков половодий, формируемые вариациями конкретного фактора среды. Она достигла 29% для осенне-зимних осадков, 14% для ландшафтной структуры речных бассейнов, 0.8% для зимних температур воздуха и 0.1% для высоты ландшафтов. Практическое отсутствие чувствительности половодий к высоте подтверждает адекватность описания динамики метеорологических факторов через их нормированные месячные значения, не зависящие от координат и высоты местности.

По специально разработанной (не прогнозной) модели была также оценена чувствительность весенних пиков половодья к апрельским осадкам и температурам воздуха [7]. Она составила соответственно 22% и 6% дисперсии наблюдаемых пиков. Очевидно, используя долгосрочные прогнозы метеослужб для этих факторов и модель [7], мы можем и далее повысить качество выполняемых прогнозов половодий.

На Рис. приведены зависимости прогнозируемых пиков половодий от метеоусловий зимы и предшествующей осени, осадки которой в разной степени увлажняют уходящие в зиму почвы и, тем самым, опосредованно влияют на интенсивность весеннего половодья. Подробное объяснение зависимостей дано в [5; 7].

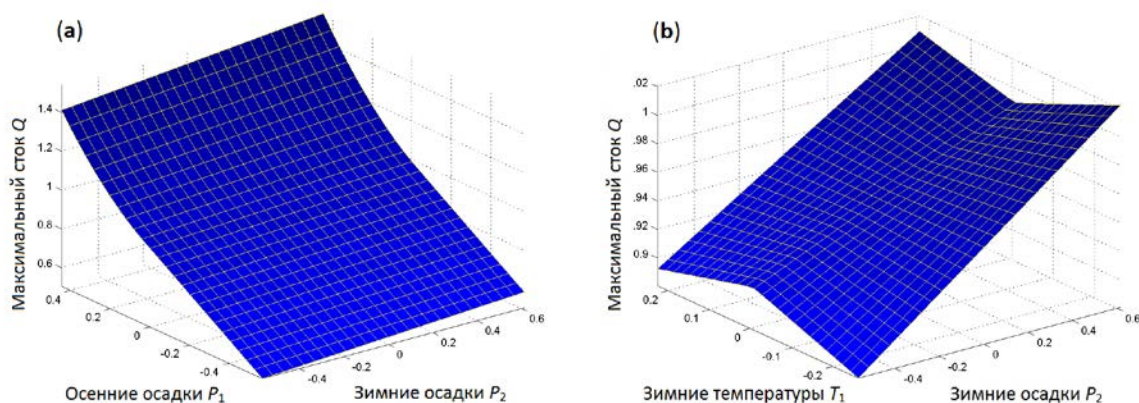


Рис. Зависимость (1) пиков весенних половодий от осадков и температур воздуха, (a) – влияние осенних и зимних осадков, (b) – влияние зимних температур.

Предложенная методология ИА обеспечивает извлечение информации о функциональных взаимосвязях сложных гидрологических процессов с факторами среды, которая скрыта в продолжительных стандартных наблюдениях за динамикой этих процессов. С помощью ИА мы проанализировали формирование пиков весенних половодий на 34 горных реках, бассейны которых значительно различаются по площадям, орографии и метеорологическим условиям. Это позволяет рассматривать полученные зависимости половодий от факторов среды и разработанную прогнозную

модель как универсальные, с возможностью их применения для различных горных территорий с отрицательными температурами воздуха в зимний период года.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант 22-27-00058).

Acknowledgments

The work was financially supported by the Russian Science Foundation (grant 22-27-00058).

Список литературы

1. Алексеев Д.С., Щекочихин О.В. Технологии интеллектуального анализа данных. Учебник для вузов. СПб.: Лань, 2022. 176 с.
2. Гвоздецкий Н.А., Михайлов Н.И. Физическая география СССР: Азиатская часть. Изд. 4. М: Мысль, 1987. 448 с.
3. Кирста Ю.Б. Пространственное обобщение климатических характеристик для горных территорий // Мир науки, культуры, образования. 2011. № 3(28). С. 330–337. <http://amnko.ru/index.php/english/journals/>
4. Кирста Ю.Б., Кирста Б.Ю. Информационно-физический закон построения эволюционных систем. Системно-аналитическое моделирование экосистем. Барнаул: Изд-во Алтайского гос. ун-та, 2014. 283 с.
5. Kirsta Y.B., Troshkova I.A. High-performance forecasting of spring flood in mountain river basins with complex landscape structure // Water. 2023. 15(6). 1080. <https://doi.org/10.3390/w15061080>
6. Kirsta Y.B., Troshkova I.A. Deep process-data mining for building of analytical models: 1. Medium-term forecast of spring flood extremes for mountain rivers // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications. 2023. 11(3). Принята в печать.
7. Kirsta Y.B., Troshkova I.A. Deep process-data mining for building of analytical models: 2. Influence of winter-spring temperatures and precipitation on spring flood extremes for mountain rivers // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications. 2023. 11(4). Принята в печать.
8. Funes A., Dasso A. Methods and Techniques of Data Mining. In: Mehdi Khosrow-Pour D.B.A. (Ed). Encyclopedia of Information Science and Technology. Fifth Edition. Hershey, PA: IGI Global. 2021. P. 749–767. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-3479-3.ch051>
9. Koch M., Cherie N. SWAT-modeling of the impact of future climate change on the hydrology and the water resources in the upper blue Nile river basin, Ethiopia // Proceedings of the 6th International Conference on Water Resources and Environment Research, Koblenz, Germany, 2013. P. 428–523. https://doi.org/10.5675/ICWRER_2013

Численное исследование условий осаждения взвеси в дельте Дона при нагонах

А.В. Клещенков*, И.В. Шевердяев

*ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН», Ростов-на-Дону,
Россия
geo@ssc-ras.ru*

Аннотация. На основе численного гидрологического моделирования в программном комплексе HEC-RAS рассмотрены различные по высоте подъема уровня воды и расходам в вершине устьевой области сценарии нагонов. Показано, что основные районы формирования низких скоростей течения при нагонах приурочены к кутовым частям морского края дельты, вдольбереговым мелководным участкам русел и собственно пойменным участкам. При одинаковой величине подъема уровня воды при нагоне, чем выше расход, тем меньшая доля воды за двое суток до пика уровня и за двое суток после пика уровня имеет околонулевую скорость течения. Повышенные расходы воды во время выраженного половодья повышают объем поступившей в дельту воды, но доля воды с околонулевыми скоростями при таком сценарии меньше. При экстремально сильном нагоне доля воды с околонулевыми скоростями небольшая, причём сам объём воды оказался ниже, чем в условиях обычного нагона в условиях низкого стока Дона.

Ключевые слова: Таганрогский залив Азовского моря, дельта Дона, нагоны, взвесь, гидрологическая модель HEC-RAS.

Numerical study of the conditions of sedimentation of suspended matter in the Don delta during surges

A.V. Kleshchenkov*, I.V. Sheverdyayev

*FGBUN "Federal Research Center Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences",
Rostov-on-Don, Russia
geo@ssc-ras.ru*

Abstract. On the basis of numerical hydrological modeling in the HEC-RAS software package, scenarios of surges with different heights of water level rise and discharges at the head of the mouth area are considered. It is shown that the main areas of formation of low current velocities during surges are confined to the apex parts of the sea edge of the delta, alongshore shallow sections of channels, and floodplain areas. With the same amount of water level rise during surge, the higher the discharge, the smaller the proportion of water two days before the level peak and two days after the level peak has a near-zero flow velocity. Increased water discharges during a pronounced flood increase the volume of water entering the delta, but the proportion of water with near-zero velocities is smaller in this scenario. With an extremely strong surge, the proportion of water with near-zero velocities is small, and the volume of water itself turned out to be lower than under conditions of a normal surge under conditions of low Don flow.

Keywords: Taganrog Bay of the Sea of Azov, Don delta, surges, suspension, HEC-RAS hydrological model.

Введение

Исследование закономерностей распределения и осаждения взвешенных наносов в дельте и на устьевом взморье Дона приходится на 10-30-е годы XX века и связано с изысканиями, проектированием и вводом в эксплуатацию Азово-Донского морского канала. В те годы были даны первые оценки роли дельты в трансформации твердого стока Дона. Позже, в 50-60-х годах серии специальных наблюдений сотрудников Донской устьевой станции были направлены на установление масштабов оседания взвешенных наносов в дельте Дона при движении от вершины к устьям рукавов. Тогда же было обращено внимание на влияния сгонно-нагонных явлений на поступление взвешенных веществ при нагонах.

С течением времени эти исследования стали более детализированными и расширенными. Первоначально мало внимания уделялось влиянию нагонов на поступление наносов из Таганрогского залива. Это можно объяснить тем, что твердый и жидкий сток реки Дон в то время был значительно выше, чем современные значения. Однако вместе с тем, было сформировано понимание, что в условиях половодья нагоны вызывают подпор, вследствие чего течение насыщенных наносами весенних вод реки замедляется, а наносы осаждаются на поверхности затопленной дельты. В межень мутные воды, приходящие с нагоном со взморья, распространяются вверх по течению, а зона наибольшего заиления дельты перемещается вместе с волной нагона [1].

Во второй половине XX века после строительства Цимлянского водохранилища и ряда низконапорных гидроузлов произошли существенные изменения в гидрологических условиях Нижнего Дона и его дельты. Это привело к внутригодовому перераспределению стока и уменьшению доли весеннего половодья [2]. Также наблюдалось сокращение стока взвешенных наносов от 4,4 млн. тонн в год в 40-х годах до 0,4 млн. тонн в период с 1983 по 2005 годы [3]. Последние исследования указывают на значительное уменьшение стока взвешенных наносов в современных условиях маловодья, начиная с 2007 года [4]. Этот эффект наблюдается не только в Нижнем Дону, но и в других реках по всему миру, таких как Миссисипи, Нил, Дунай, Инд, Рона и др. [5].

В условиях сокращения речного потока наносов возрастает роль поступления взвеси в дельту Дона со стороны Таганрогского залива во время нагонов, сопровождаемых усилением ветра, волнением и, как следствие, взмучиванием донных отложений мелководного Таганрогского залива. В заливе формируется насыщенная взвесью водная масса с повышенной соленостью, которая поступает в дельту Дона и формирует в рукавах обратные течения. Целью исследования является анализ условий осаждения взвеси в дельте Дона при нагонах и оценка пространственного положения участков с благоприятными для осаждения взвеси условиями в дельте Дона.

Материалы и методы исследования

В данной работе для решения задачи исследования условий осаждения взвеси нами использовалась двумерная гидрологическая модель на основе HEC-RAS. Эта модель была подготовлена с использованием улучшенной ЦМР участка устьевой области Дона от траверза Павлово-Очаковской косы в Таганрогском заливе на западе до ст.Раздорская, расположенной в 140 км от устья Дона на востоке.

Математическая модель устьевой области Дона для реконструкции хода уровня и затопления поймы с учётом сгонно-нагонных явлений и динамики расходов на Нижнем Дону разрабатывалась на основе программного комплекса HEC-RAS 6.3 [6]. Этот программный комплекс позволяет проводить вычисления движения двумерных потоков воды на основе решения уравнения мелкой воды или уравнения диффузионной волны. Вычисления проводятся в пределах расчётной сетки на цифровой модели рельефа (ЦМР). ПК HEC-RAS широко используется в мире для решения широкого

круга гидрологических задач, связанных моделированием затопления поймы, оценкой интрузий соленых вод в эстуарные системы и др. [7; 8].

Для построения математической модели устьевой области Дона была разработана соответствующая ЦМР, включающая придельтовую часть Таганрогского залива (восточнее меридиана Павло-Очаково-Приморка – $39^{\circ} 4'$ в.д.), дельту Дона, ограниченную с севера и с юга изогипсой рельефа 10 м и переходящая в пойму Нижнего Дона ниже ст. Раздорской, включая пойму реки Западный Маныч ниже Западенского лимана и пойму рек Аксай и Тузлов ниже автомобильного моста в г. Новочеркасск (Рис. 1). В пределах полученной ЦМР была введена расчётная сетка, в которой были выделены берега и стрежни русел, локальные водоразделы, подводные продолжения основных русел рукавов дельты Дона в Таганрогском заливе. В пределах непосредственно дельты Дона были построены ячейки со средней стороной 100 м, выше и ниже дельты Дона – 200 м. Всего в расчётной сетке таким образом выделено 101 091 ячейка, средней площадью 22 600 м², от 1 400 до 159 728 м². В построенной расчётной сетке выделены морская граница и граница в русле Дона. Динамика уровня воды на морской границе, расположенной на меридиане $39^{\circ}4'$ в.д., задавалась по данным наблюдений на уровнемере «Донской-1001» (Рис. 1), расположенном на причале ЮНЦ РАН в хуторе Донской, с заблаговременностью 50 минут (время добегания соответствующих значений уровня было экспериментально установлено по данным наблюдений на гидрометеопостах постах ЮНЦ РАН «Донской-1001» и «Взморье-1002»). На речной границе у ст. Раздорская задавалась динамика расходов воды по данным расположенного здесь гидропоста.

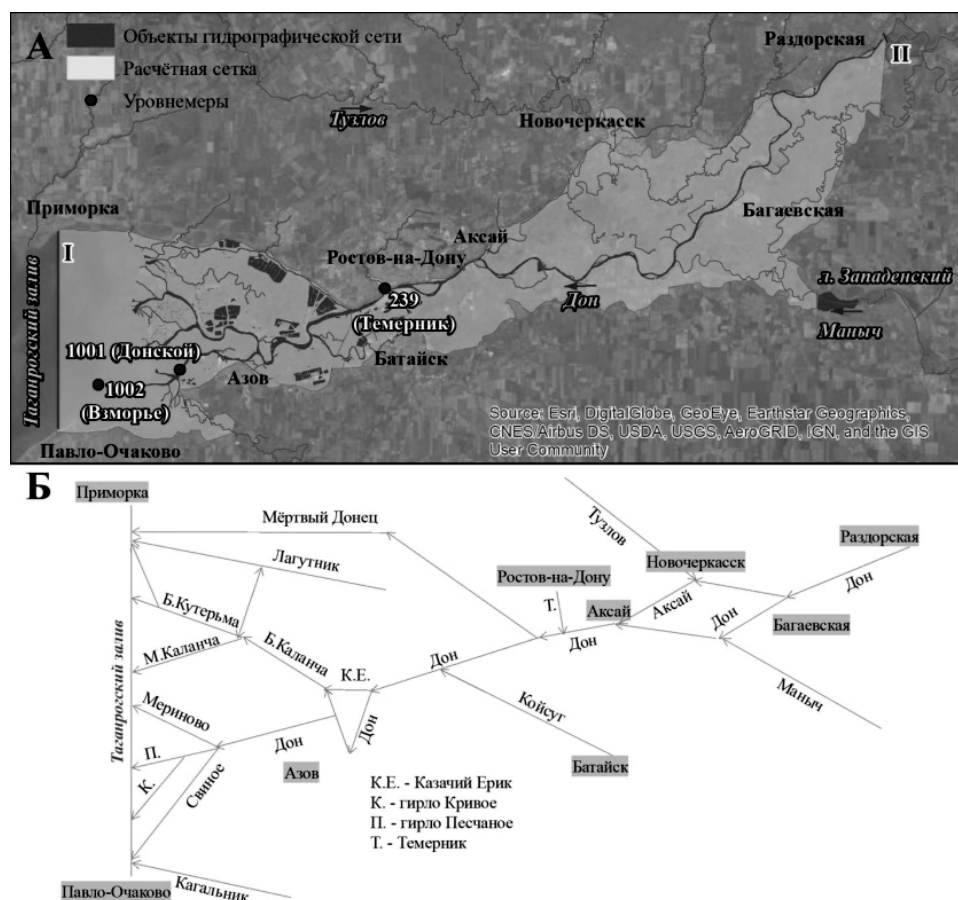


Рис. 1 Расчётная область гидрологической модели (А) и схема основных элементов гидрографической сети устьевой области Дона (Б).

Верификация гидрологической модели была выполнена на серии натуральных наблюдений за ходом уровня и расхода воды в основных рукавах дельты Дона, проведенных в ходе гидрологических съемок в 2014-2016 гг. с использованием доплеровского измерителя течений. Проверка проводилась путём сравнения результатов расчётов с измерениями расходов воды на поперечных профилях в судоходном русле Дона, в рукавах Каланча и Кутерьма и в гирлах юго-западной части дельты, выполненными 13–15 сентября 2016 г. для подгонки параметров модели и 22–23 сентября 2014 г. для контрольной проверки. При этом в период 13–15 сентября 2016 г. расход воды в ст. Раздорской в среднем был равен 390 м³/с, в период 22–23 сентября 2014 г. – 430 м³/с. В качестве калибровочных параметров рассматривалась цифровая модель рельефа и коэффициенты шероховатости русел и различных участков поймы, а также предустьевого взморья Таганрогского залива. В результате были подобраны оптимальные значения коэффициентов шероховатости, которые для русловых участков дельты Дона составили 0,0125.

Результаты проверочных расчетов показывают, что гидрологическая модель дельты Дона корректно воспроизводит наблюденные расходы в основных рукавах дельты Дона, при этом для малых рукавов расчётные расходы несколько расходятся с измеренными, что можно оправдать недостатком для них батиметрических данных при построении ЦМР устьевой области Дона. Стоит также отметить, что даже небольшие нагоны (с максимальным уровнем 0,5 м БС и ниже) значительно влияют на расходы в руслах дельты Дона, включая судоходный путь, приводя в некоторых из них к формированию обратных течений.

Результаты и выводы

Для дальнейшего численного исследования условий осадконакопления взвеси из пятидесяти нагонов в дельте Дона в 2015-2020 гг. были выбраны пять, кроме того, дополнительно рассматривался экстремальный нагон сентября 2014 года (Табл.).

В выбранные даты определены временные шаги максимального уровня и сценарии посчитаны на четверо суток, двое суток перед максимумом и двое суток после. Всего 577 временных шагов, максимум наступает в 288 шаг.

Были построены карты распределения по ячейкам числа временных шагов с околонулевыми скоростями (меньше 0,02 м/с). Пространственный анализ показал, что в малых ериках в близкой к Таганрогскому заливу части дельты при всех рассмотренных нагонах долговременно наблюдаются сниженные скорости. Основные районы формирования низких скоростей течения при нагонах приурочены к кутовым частям морского края дельты, вдольбереговым мелководным участкам русел и собственно пойменным участкам. Кроме того, при низких нагонах (менее 1,5 м БС) зоной долговременных низких скоростей является взморье, особенно его южная часть. При этом, если сравнить схожие нагоны при разном расходе воды в Дону (сценарии 1 и 2, а также 3 и 4, Табл.), то при больших речных расходах зона низких скоростей меньше. При нагонах около 1 м обширной зоны затопления не формируется, при нагонах около 1,5 м - затопливается междуречье Дона и Каланчи, а также приморская часть дельты, и только максимальный нагон выше 3 м приводит к затоплению практически всей дельты Дона.

Далее мы взяли в каждой ячейке (из 101091 ячеек) в каждый из 576 временных шагов скорость и объём воды. Выделили только те, в которых скорость меньше 0,02 м/с и при этом объём воды больше 0. Суммировали объёмы воды по ячейкам. Распределили и суммировали объёмы по ячейкам с количеством временных шагов, удовлетворяющих условиям выше. Распределение показано на Рис. 2.

Табл. Характеристики расчетных сценариев нагонов в дельте Дона.

Номер нагона	Максимум уровня от среднегодового, м	Дата начала	Дата окончания	Средний расход воды в ст.
1	1.77	18/03/2018	22/03/2018	507
2	1.75	14/04/2020	18/04/2020	300
3	1.4	30/03/2016	3/4/2016	407
4	1.36	19/04/2018	23/04/2018	1462
5	1.06	22/02/2019	26/02/2019	525
6	3.7	23/09/2014	25/09/2014	541

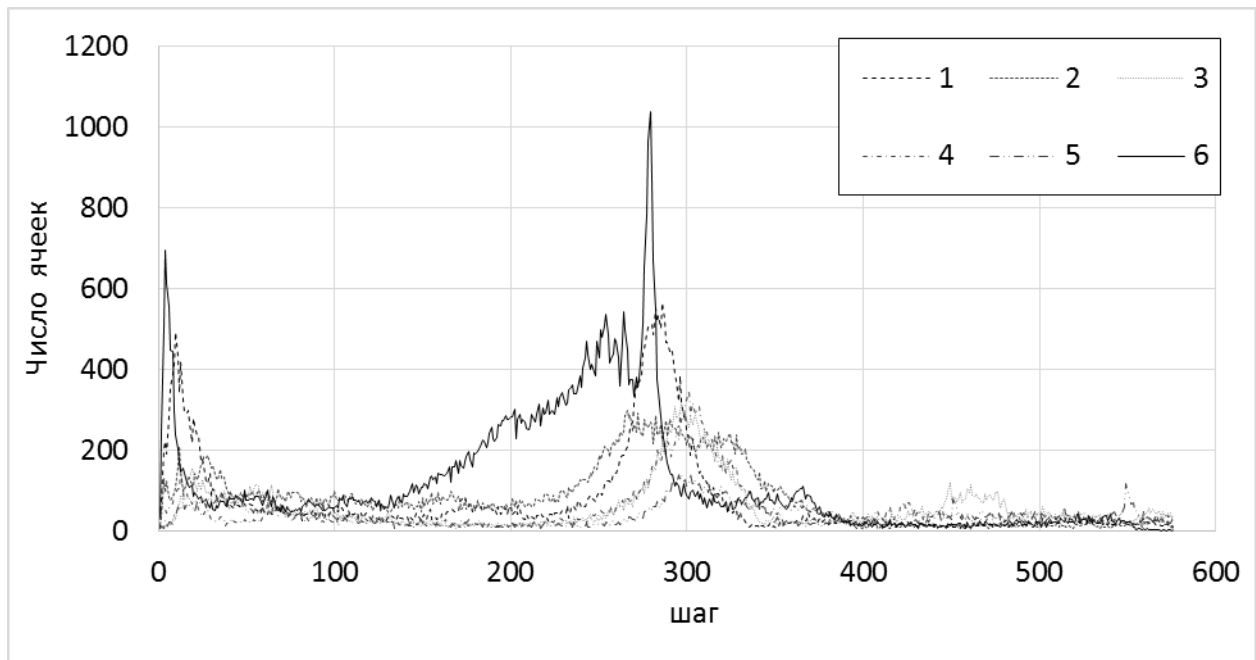


Рис. 2 Распределение числа ячеек с одинаковым числом десятиминут, удовлетворяющих условиям скорости воды меньше 0,02 м/с при наличии воды в ячейке. Цифры в условных обозначениях – номер нагона согласно Табл.

При одинаковой величине подъема уровня воды при нагоне, чем выше расход, тем меньшая доля воды за двое суток до пика уровня и за двое суток после пика уровня имеет околонулевую скорость течения. Численные эксперименты подтверждают закономерность, что пониженные расходы воды р. Дон снижают сопротивление речной воды проникновению водных масс со стороны моря и в условиях пониженного стока сильный нагон приносит в дельту больше воды со стороны Таганрогского залива, чем при нормальном стоке.

Повышенные расходы воды во время выраженного половодья увеличивают объем поступившей в дельту воды, но доля воды с околонулевыми скоростями при таком сценарии меньше. При экстремально сильном нагоне доля воды с околонулевыми скоростями небольшая, причём сам объём воды оказался ниже, чем в условиях обычного нагона в условиях низкого стока Дона.

Благодарности

Авторы выражают благодарность П.Н. Терскому и А.Ю. Московцу за помощь в проведении измерений расходов воды в дельте Дона в 2014-2016 гг.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках реализации проекта № 22–27–00818 "Влияние длительного маловодья и изменений климата (на рубеже XX–XXI веков) на динамику взвешенного вещества в устьевой области Дона".

Acknowledgments

The authors thank to P.N. Tersky and Moskovets for their help in measuring water discharges in the Don Delta in 2014-2016.

The work was supported by the Russian Science Foundation within the framework of the project No. 22-27-00818 "The influence of long-term low water and climate change (at the turn of the 20th-21st centuries) on the dynamics of suspended matter in the mouth area of the Don".

Список литературы

1. Родионов Н.А. Гидрология устьевой области Дона. М.: Гидрометеиздат, 1958. 95 с.
2. Бронфман А.М., Хлебников Е.П. Азовское море. Основы реконструкции. Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. 269 с.
3. В.В. Сорокина. Особенности терригенного осадконакопления в Азовском море во второй половине XX века.:дисс... канд. геогр. наук, Ростов-на-Дону,2006.
4. Клещенков А.В. Особенности твердого стока р. Дон в современный маловодный период // Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова «Третьи виноградовские чтения.Грани гидрологии». Санкт-Петербург, 28–30 марта 2018 года/ под ред. О.М.Макарьевой.–СПб.: Научные технологии, 2018. С.586-590.
5. Giosan, Liviu & Syvitski, James & Constantinescu, Stefan & Day, John. Climate change: Protect the world's deltas // Nature. 2014. 516. 31-3. 10.1038/516031a.
6. The place for HEC-RAS modelers [Электронный ресурс]. — URL:<https://www.kleinschmidtgroup.com/ras-post/hec-ras-6-0-beta-is-now-available/> (дата обращения 27.07.2023)
7. Hicks, F., Peacock, T. Suitability of HEC-RAS for flood forecasting // Canadian Water Resources Journal. 2005.Vol. 30, No. 2. 30(2). P .159-174. DOI: 10.4296/cwrj3002159.
8. Fábio Paiva da Silva, José Rodolfo Martins, Fabio Nogueira. Impacts of Sea Level Rise on Seawater Intrusion in Cubatão River, Brazil. // Environmental Modeling & Assessment. 2020. Vol. 25. P.831-841. DOI: 10.1007/s10666-020-09720-y.

Оценка факторов формирования притока весеннего половодья к водохранилищу Ириклинской ГЭС на р. Урал

Д.Е. Клименко

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург,
Россия
d.e.klimenko@urfu.ru*

Аннотация. Точность прогноза притока половодий к водохранилищу Ириклинской ГЭС на р. Урал определяет энергетическую эффективность работы электростанции. Применяемая сегодня методика прогноза притока имеет оправданность около 45%, что недостаточно для качественной работы электростанции. На основе материалов многолетних метеорологических и гидрологических наблюдений выполнен анализ значимости факторов формирования стока весеннего половодья в пределах водосбора р. Урал. Сложность выявления факторов заключается в положении водосбора преимущественно в степной зоне, в связи с чем стандартные связи объема стока половодья с величинами предшествующих снегозапасов оказываются неэффективны. Оценена пространственная связанность осадков осеннего и зимнего периодов путем построения пространственно-корреляционных функций. Сделан вывод о высоком влиянии на сток половодий предшествующего осеннего увлажнения.

Ключевые слова: степные водосборы, факторы формирования стока, половодье, пространственно-корреляционная функция, снегозапас, Ириклинская ГЭС.

Estimation of the Factors of Formation of the Spring Flood Inflow to the Reservoir of the Iriklinkaya HPP on the Ural River

D.Y. Klimenko

*Ural Federal University The first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia
d.e.klimenko@urfu.ru*

Abstract. The accuracy of forecasting the influx of floods to the reservoir of the Iriklinkaya HPP on the river. Ural determines the energy efficiency of the power plant. The inflow forecasting technique used today has a justification of about 45%, which is not enough for the quality operation of the power plant. Based on the materials of long-term meteorological and hydrological observations, an analysis was made of the significance of factors in the formation of spring flood runoff within the catchment area of the river Ural. The difficulty in identifying factors lies in the location of the catchment area mainly in the steppe zone, and therefore the standard relationships between the volume of flood runoff and the values of previous snow reserves turn out to be ineffective. The spatial connectivity of autumn and winter precipitation is estimated by constructing spatial correlation functions. The conclusion is made about the high influence on the runoff of floods of the previous autumn moistening.

Keywords: steppe watersheds, runoff formation factors, high water, spatial correlation function, snow storage, Iriklinkaya HPP.

Введение

Эффективность работы Ириклинской ГРЭС и ГЭС во многом определяется качеством прогноза объема притока весеннего половодья к Ириклинскому вдхр. на р. Урал. Целью исследования является поиск и оценка значимости факторов формирования стока весеннего половодья в условиях полизональной реки для дальнейшей разработки прогностических методов.

Особенности гидрологического режима рек рассматриваемой территории таковы, что здесь наблюдается переход от Восточно-Европейского к Казахстанскому типу (по классификации Б.Д. Зайкова): характерно наличие короткого и интенсивного половодья, начинающегося в третьей пентаде марта и заканчивающегося в первой-третьей пентаде апреля; отсутствие или слабая выраженность дождевых паводков.

Водосбор р. Урал в трех природных зонах: лесной, лесостепной и степной. Степная и лесостепная зоны хорошо выражены на равнинной части. Географическое положение сказывается на условиях формирования стока: если в лесной зоне велико влияние на сток половодий снегозапасов, то в степной зоне – потеря на инфильтрацию и испарение. В горах задержание талых вод в понижениях на водосборе ничтожно, тогда как в степной зоне, изобилующей наличием микропонижений и замкнутых областей стока (составляющих, иногда, до 50% площади водосбора) фактор поверхностного задержания может быть существенным.

Материалы и методы исследования

Для выбора влияющих факторов весь водосбор р. Урал к створу Ириклинской ГЭС был разбит на 4 крупных водосбора, замыкаемых гидрологическим постом. Данные водосборы охватывают 85% общей площади водосбора. Для каждого водосбора выбрана метеорологическая станция (МС): р. Урал – п. Березовка – МС Магнитогорск; р. Таналык – с. Мамбетово – МС Акъяр; р. Суундук – п. Майский – МС Бреды; р. Джуса – п. Добровольское – МС Энергетик.

Для оценки достаточности количества метеорологических станций, «выявления» нерепрезентативных пунктов, а также для вычисления предельных расстояний, в пределах которых сохраняется приемлемая корреляция между наблюдаемыми характеристиками, был использован аппарат пространственно-корреляционных функций (ПКФ). Оценки проводились для двух параметров: снегозапасы (осадки холодного периода) и предшествующее осеннее увлажнение (осадки за сентябрь-октябрь). Для анализа использовались данные 7 метеостанций, представленных в Табл. 1.

Табл 1. Список метеорологических станций, использованных для характеристики метеорологических условий.

Метеостанция	Высота над уровнем моря, м БС	Доступный период наблюдений
Энергетик	262	2009 – действ.
Акъяр	333	1936 – действ.
Кизильское	316	2000 – действ.
Верхнеуральск	401	1936 – действ.
Магнитогорск	383	1974 – действ.
Карталы	298	1969 – действ.
Бреды	309	1948 – действ.

Достаточность периодов наблюдений на метеостанциях оценена на основе разностно-интегральных кривых (РИК) отклонений от середины модульных

коэффициентов слоя стока весеннего половодья по постам в бассейне р. Урал (Рис. 1). Как видно на данных графиках, полные циклы водности макроуровня охватывают периоды с 1950 по 1985 гг. (35 лет) и с 1986 по 2000 гг. (35 лет). РИК позволяют сделать вывод о том, что достаточным является период наблюдений продолжительностью не менее 35 лет.

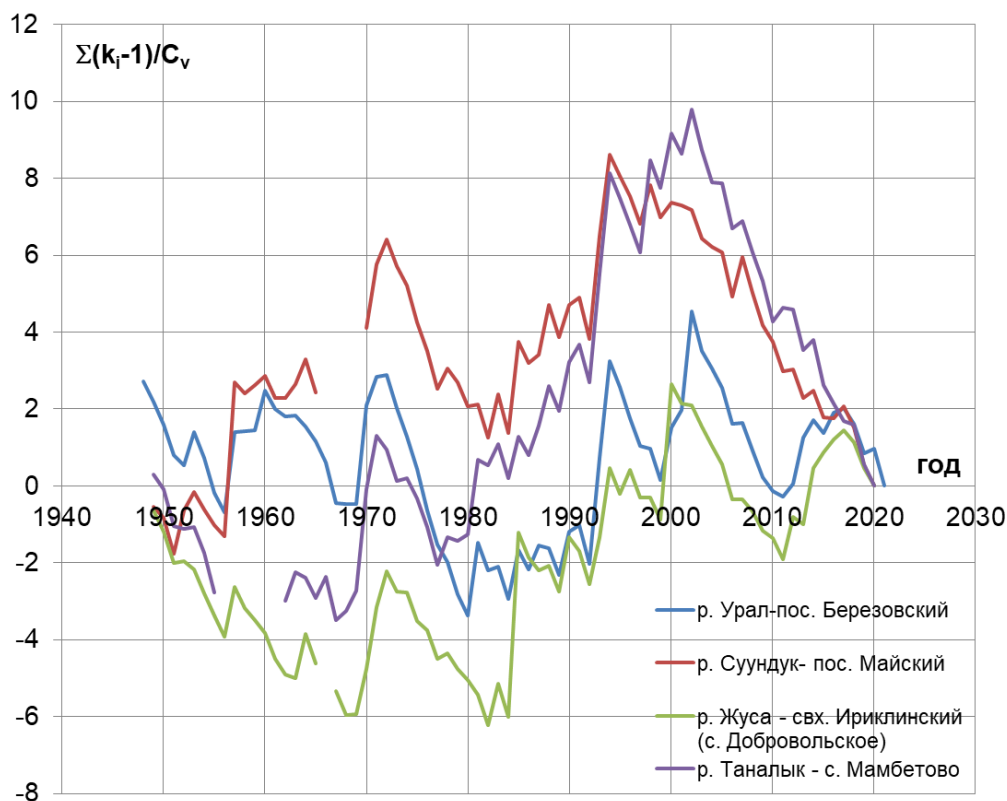


Рис. 1 Разностно-интегральные кривые отклонений от середины модульных коэффициентов слоя стока весеннего половодья по постам в бассейне р. Урал.

Для анализа пространственной связанности факторов формирования стока использован аппарат пространственно-корреляционных функций (ПКФ) [6]. Анализ многолетних колебаний сумм осадков холодного периода показывает отсутствие значимых временных трендов, стационарность рядов по критерию Стьюдента и незначительное нарушение стационарности по критерию Фишера во второй половине расчетного периода (с 1985-1990 гг.) ПКФ сумм осадков холодного периода (Рис. 2) показывают, что допустимая нормативами для гидрологических расчетов величина $r=0,75$ соответствует расстояния между метеостанциями в 60 км. Условно можно считать, что для обеспечения точности расчетов одна метеостанция должна приходиться на $3\ 600\ \text{км}^2$ территории. Учитывая тот факт, что площадь водосбора р. Урал к створу Ириклинской ГЭС составляет $36\ 900\ \text{км}^2$ и освещается данными наблюдений на 7 станциях (на одну метеостанцию приходится $5\ 270\ \text{км}^2$ территории).

Анализ временных рядов сумм осадков осеннего периода (сентябрь-октябрь) на метеостанциях показывает стационарность рядов по критерию Стьюдента и нарушение стационарности по критерию Фишера с 2000 г. Пространственный анализ сумм осенних осадков (рис. 2) показывает, во-первых, хорошее качество ПКФ, а во-вторых – гораздо большее расстояние между метеостанциями, соответствующее $r=0,75$ (около 95 км). Хорошее качество ПКФ осенних осадков (в сравнении с ПКФ зимних, т.е. снеговых, осадков) косвенно может указывать на большую роль ветрового снеготранспорта в степи (для дождей ветровой перенос осадков отсутствует).

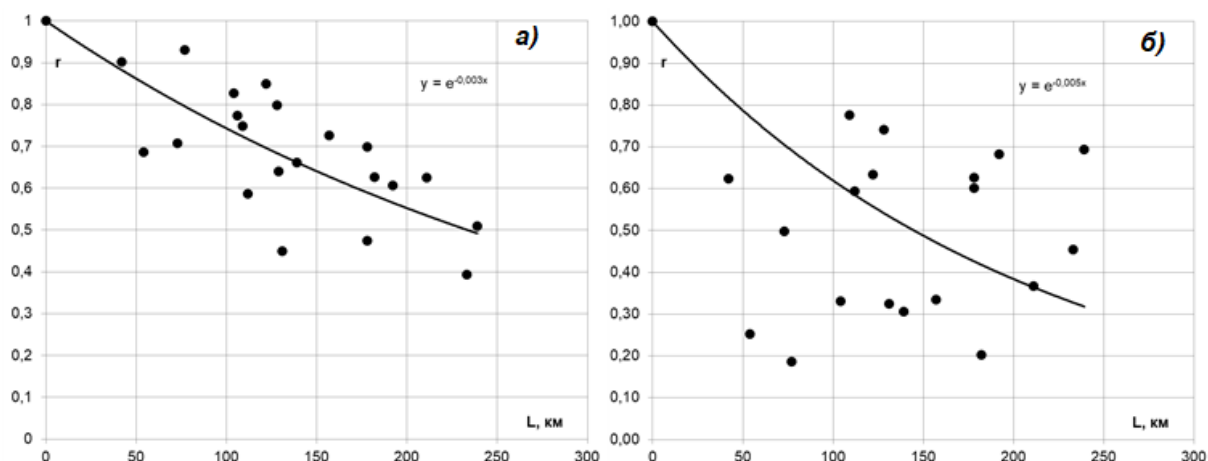


Рис. 2. Пространственно-корреляционная функция сумм осадков осеннего периода (сентябрь-октябрь) (а) и сумм осадков холодного периода (б) на метеостанциях в бассейне р. Урал.

Результаты и выводы

В результате анализа факторов формирования стока установлено, что для условий степной и лесостепной зоны определяющее влияние оказывают предшествующее переходу температур воздуха через ноль осенью увлажнение и величина снегозапаса. Ввиду отсутствия фактических данных по влажности почвы использовались суммы осадков за сентябрь-октябрь или август-октябрь, в зависимости от тесноты связи (исходя из соображений о том, что именно эти суммы осадков формируют запас влаги в почве и будут определять потери на впитывание в период снеготаяния весной). Выбор границ расчетных месяцев осенью обусловлен тем, что в среднем переход температуры воздуха через ноль приходится на последнюю пятидневку октября – первую пятидневку ноября.

В качестве исходных данных по слою стока половодий использованы материалы наблюдений на гидрологических постах.

Качество зависимостей слоя стока весеннего половодья от величин предшествующего осеннего увлажнения оказывается достаточно низким. Как будет показано ниже, все другие зависимости стока от определяющих факторов имеют еще более низкое качество. Попытки уточнить зависимости слоя стока весеннего половодья h от предшествующего увлажнения путем введения поправок на испарение осенью не привели к желаемому результату, качество зависимостей снизилось. Это может быть связано с тем, что фактических данных по испарению с грунтов нет, а расчет испарения косвенным путем содержит погрешности до 100%.

Первоочередная роль фактора предшествующего увлажнения водосборов рек степной зоны вместо величин снегозапаса отмечена также в немногочисленных исследованиях [1; 2; 3; 5], в которых говорится об отсутствии значимых связей слоя стока половодий с величиной, определяющих их снегозапасы.

Объем и слой стока половодья формируются из выпавших за предшествующий половодью период и «зарезервированных» на водосборе осадков в виде снега, влагозапасов грунтов, запасов в русловой сети и замкнутых понижениях на водосборе. Тогда как для рек лесной, тундровой зон, рек горных районов или областей распространения многолетней мерзлоты почти аксиомой является наличие зависимостей между снегозапасом и стоком половодья, для рек степной зоны этой зависимости практически не существует.

Ввиду отсутствия данных по фактическим маршрутным снегосъемкам, для оценки величин снегозапаса (запаса влаги в снежном покрове) использовались суммы

осадков зимнего периода по метеостанциям. В данном случае погрешности могли быть связаны с частичным испарением влаги с поверхности снега и выдуванием снега из осадкомеров на метеостанциях. Однако данные погрешности разнонаправлены и в расчетах мы пренебрегли ими. Введение в качестве корректирующей поправки сумм осадков в жидком виде за период снеготаяния практически не меняет картины. Этому есть ряд объяснений: в целом для данной природной зоны дожди являются редким явлением и не дают значительного притока в русловую сеть, хотя, как ранее предполагалось, могли бы способствовать ускорению схода снежного покрова за счет привнесения дополнительного тепла и механического разрушения снега.

Возможные причины плохого качества зависимостей слоя стока весеннего половодья с величиной снегозапаса (осадков холодного периода) могут быть связаны как с исключительно географическими факторами (неравномерность формирования снежного покрова и, как следствие, нерепрезентативность показаний отдельных метеостанций для водосборов в целом), так и с особенностями измерений (осадки зимнего периода измеряются на осадкомерах, расположенных на метеоплощадках; метеоплощадки находятся в населенных пунктах с искаженным термическим режимом, режимом осадков и режимом снегопереноса). Вероятно, наличие фактических данных по маршрутным снегосъемкам позволило бы скорректировать качество зависимостей слоя стока половодья от величин снегозапаса.

Сумма отрицательных температур за зиму (наряду с высотой снежного покрова, влажностью грунтов и их гранулометрическим составом) – косвенный показатель глубины промерзания грунтов, которая, в свою очередь, определяет потери воды на инфильтрацию в период снеготаяния (фактические данные в распоряжении отсутствуют). Попытки связать суммы отрицательных температур за зиму (за период формирования снегозапаса) с объемом стока половодий ни по одному посту не увенчались успехом: парная корреляция оказывается менее 0,2.

Помимо этого, предпринимались попытки связать слой стока весеннего половодья с интенсивностью снеготаяния (выбирались за каждый год даты перехода температуры через ноль весной и даты пика половодья, за этот период как косвенный показатель рассчитывалась сумма положительных температур воздуха). Однако и в данном случае получить удовлетворительные зависимости не удалось.

Перспективы исследований по поиску главных факторов формирования стока связаны с оценкой регулирующего влияния водохранилищ и озер на водосборе, а также с оценкой поверхностного задержания влаги. Однако к настоящему времени исходные данные для этих оценок отсутствуют.

В Табл. 2 представлены результаты проверки гипотез о степени влияния тех или иных факторов на слой (объем) стока весеннего половодья.

Для оценки множественной корреляции использованы только два фактора: снегозапас и предшествующее увлажнение. Введения дополнительных факторов ведет к снижению множественного коэффициента корреляции.

Учитывая то, что на данном этапе определяющее влияние оказывают именно два фактора формирования стока, были предприняты попытки построения факторных зависимостей величины слоя стока (h) от суммарных значений осадков зимнего периода (снегозапас S) и осадков предшествующего осеннего периода (X).

На определяющее влияние на сток весеннего половодья предшествующего увлажнения водосборов в степной зоне указывают авторы исследований [4].

Табл. 2. Коэффициенты парной корреляции факторов формирования стока, оцениваемых по метеостанциям, с величиной слоя стока за весь расчетный период на посту.

Гидрологический пост – метеостанция, расчетный период	Корреляция погодичных значений факторов формирования стока с величиной слоя стока r				Множественная корреляция R
	Предшествующее осеннее увлажнение X , мм	Величина снегозапаса S , мм	Сумма отрицательных температур за зиму $\sum_{T < 0} t$, °С	Интенсивность прироста температур весной, °С/сут	
р. Урал – п. Березовка – МС Магнитогорск, 1973-2021	0,42	0,52	0,10	0,17	0,46
р. Таналык – с. Мамбетово – МС Акъяр, 1973-2021	0,54	0,36	0,17	0,05	0,44
р. Суундук – п. Майский – МС Бреды, 1948-2021	0,52	0,35	0,05	0,10	0,67
р. Джуса – п. Добровольское – МС Энергетик, 2008-2021	0,69	0,20	0,05	0,07	0,71

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEUZ-2022-0030 Разработка интеллектуальной мультиагентной системы для моделирования глубоко интегрированных технологических систем в электроэнергетике).

Acknowledgments

The research was carried out within the state assignment with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (subject No. FEUZ-2022-0030 Development of an intelligent multi-agent system for modeling deeply integrated technological systems in the power industry)

Список литературы

1. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 422 с.
2. Бефани Н.Ф. Прогнозирование дождевых паводков на основе территориально общих зависимостей. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 184 с.
3. Варенцова Н.А., Киреева М.Б., Харламов М.А., Варенцов М.И., Фролова Н.Л., Повалишникова Е.С. Формирование весеннего стока рек ЕТР: основные факторы и способы их учета. II. Переоценка с учетом современных условий на примере рек бассейна Дона. Гидрометеорологические исследования и прогнозы. Т 384, № 2, с. 117-146.
4. Калинин Г.П. Проблемы глобальной гидрологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 377 с.
5. Кузник И.А. Изменения речного стока под влиянием агротехнических мероприятий в Сыртовом Заволжье. Водные ресурсы, 1975, № 5, с. 54-64.
6. Рождественский А.В., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 424 с.

Подходы к определению модулей стока общего азота и фосфора с Российской части водосбора бассейна Балтийского моря

С.М. Клубов^{1,2,3*}, В.Ю. Третьяков^{1,2}, В.В. Дмитриев¹, А.Р. Никулина¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

²Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Россия

³ГБУ ДО ДТ «У Вознесенского моста» Адмиралтейского района, г. Санкт-Петербург, Россия

klubov_stepan@mail.ru

Аннотация. Одной из важных задач по охране экосистем Балтийского моря в целом, Финского залива и Невской губы является установление максимально допустимой антропогенной нагрузки. Цель исследования заключается в оценке поступления общего азота и фосфора со стоком водотоков, на которых отсутствуют посты мониторинга объёма и химического состава стока. Полученные значения модулей стока позволят уточнить оценку поступления общего азота и фосфора без необходимости расширения существующей сети гидрохимических и гидрологических наблюдений ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» (СЗУГМС). Наиболее известной оценкой модулей стока общего азота и фосфора с Российской части водосборного бассейна Балтийского моря является оценка, выполненная в Институте озероведения РАН под руководством С.А. Кондратьева. Новизна нашего подхода состоит в использовании данных СЗУГМС для водотоков аналогов при отсутствии результатов наблюдений для исследуемых водотоков. Выделение водосборов в северной и южной части побережья Невской губы и восточной части побережья Финского залива проводится на основании разработанной нами цифровой модели рельефа (ЦМР). Модель создана по разработанной нами методике с использованием отечественных топографических карт. Определение границ водосборных бассейнов выполняется на основе ЦМР с помощью гидрологических функций ArcGIS. Выявление пространственной структуры ландшафтов и природопользования в пределах водосборов производится методом «классификации с учителем» с помощью модуля Quantum GIS “Dzetsaka classification dock”. Внутригодовое распределение стока азота и фосфора задаётся на основании обобщённых внутригодовых динамик на постах мониторинга СЗУГМС.

Ключевые слова: водосборы, модули стока азота и фосфора.

Approaches for evaluation of the total nitrogen and phosphorus unit discharges from Russian part of the Baltic Sea catchment area

S.M. Klubov^{1,2,3*}, V.Yu. Tretyakov^{1,2}, V.V. Dmitriev¹, A.R. Nikulina¹

¹St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

²Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

³Palace of Child Youth Art «At the Voznesensky Bridge», St. Petersburg, Russia

klubov_stepan@mail.ru

Abstract. There is problem of the Baltic Sea eutrophication due to anthropogenic income of total nitrogen and phosphorus. One of the significant goals is determination of maximal permissible anthropogenic load at the Baltic Sea aquatic ecosystem. Our research is pointed at assessment of the total nitrogen and phosphorus outflow from Russian part of the Baltic Sea watershed into the aquatic ecosystem with runoff of the watercourses without points of the runoff value and the chemical content monitoring. Other novelty consists in usage of North-Western Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring data of analogue watercourses if there is no any data of the researched ones. Ascertainment of the catchment areas within the Neva Bay and the eastern part of the Finnish Gulf seaboard areas is processed on the base of digital terrain model of relief, which was produced by us. Ascertainment of the watersheds borders is carried out on the base of our digital terrain model by ArcGIS hydrological functions. Ascertainment of the landscape and land use spatial structure within the catchment areas is produced by method of supervised classification by means of “Dzetsaka classification dock” module of Quantum GIS. The annual distribution of the total nitrogen and phosphorus outflow is preset on the base of the generalized annual dynamics at the monitoring points.

Keywords: catchment areas, nitrogen and phosphorus outflow.

Введение

Для оценки поступления азота и фосфора в озеро, водохранилище или морскую акваторию со стоком водотока, на котором отсутствуют створы мониторинга содержания этих субстанций в речных водах и определения расхода воды необходимо применять метод аналогов. Для этого нужно определить характеристики водосбора, и на их основании задать как модули стока, так и модули стока субстанций. Эти параметры зависят от типа поверхности, степени расчленённости рельефа, густоты речной сети т.д. Существует большое количество оценок модулей стока общего азота и фосфора. Некоторые из них представлены в Табл.

Табл. Модули стока общего азота и фосфора, т/год•км².

Водосбор	Азот	Фосфор	Ист.
Финского залива	0.226	0.014	[1]
Финского залива	0.275	0.012	[2]
Территория Петрозаводска (Карелия)	2.608	0.042	[3]
Финского залива, природные фоновые значения	0.053	0.004	[4]
Балтийского моря, природные фоновые значения	-	0.004	[6]
Калининградского/Вислинского и Куршского заливов	0.018	0.001	[7]
Канада, Новая Шотландия, лесной на магматических породах, 2000	-	0.007	[8]
Канада, Новая Шотландия, лесной на магматических породах, 2002	-	0.048	[8]
Канада, Новая Шотландия, лесной на осадочных породах, 2002	-	0.020	[8]
США, Мэн, лесной, 2000		0.0035-0.0050	[8]
США, Мэн, сельскохозяйственные территории, 2000	-	0.15-0.35	[8]
США, Мэн, селитебные территории, 2000	-	0.025-0.035	[8]
Канада, Онтарио, урбанизированные территории, 1986	-	0.11	[8]
Канада, Новая Шотландия, селитебная территория, 1986	-	0.186	[8]

Однако для определения экологически обоснованных норм антропогенного воздействия на экосистемы морских прибрежных акваторий с высокой динамикой вод и внутренние водоёмы с большой проточностью годовые модули стока биогенных элементов недостаточно информативны. В этих случаях необходимо принимать во внимание как внутригодовую динамику поступления азота и фосфора, так и соотношение концентраций субстанций в водоёме или морской акватории и в поступающих речных водах. Очевидно, что если концентрации биогенных элементов в речных водах ниже концентраций в водной экосистеме, то сколь бы большим не было количество поступающих со стоком биогенных элементов, оно не может привести к усилению антропогенного эвтрофирования. Интенсивность воздействия поступления азота и фосфора на годовой цикл функционирования экосистемы зависит от времени. Зимой это воздействие практически незаметно. Весной оно приводит к увеличению развития диатомовых водорослей, а в середине лета в условиях достаточно высокой температуры воды – к «вспышке» сине-зелёных водорослей со всеми вытекающими неприятными последствиями. Невская губа отличается крайне высокой степенью проточности. Период её условного водообмена составляет всего 7 суток. Прибрежные акватории восточной части Финского залива, примыкающие к Курортному району Санкт-Петербурга, также характеризуются высокой динамикой и значительным влиянием речного стока. Поэтому для точной оценки антропогенного эвтрофирования экосистем этих акваторий необходимо определение внутригодовой динамики поступления азота и фосфора с речным стоком.

Материалы и методы исследования

С территории Санкт-Петербурга в Невскую губу и восточную часть Финского залива впадают 26 водотоков, на которых отсутствуют створы мониторинга расхода воды и химического состава стока. Это реки: Быстрая, Каменка, Караста, Кикенка, Красненькая, Кристателька, Малая Сестра, Приветная, Стрелка, Чёрная, Чёрная, Шингарка, Юнтоловка; ручьи: Восьмой, Горский, Зеленогорский, Неизвестный, Смолячков, Стрелка, Третий, Троицкий, Ушковский, Шестой; водотоки: Водосливной канал, Дудергофский канал, Ржавая канава. Для учёта поступления азота и фосфора с их стоком используются данные водотоков-аналогов, расположенных близко от исследуемых водотоков, и на которых есть или существовали в прошлом створы мониторинга. В качестве аналогов используются следующие реки: Волчья, Вруда, Гороховка, Ижора, Коваши, Мга, Оредеж, Систа, Тосна. Для анализа используются данные СЗУГМС по этим рекам за ряд лет.

Методика исследования такова. По значениям концентраций субстанций и расходов воды для каждого водотока-аналога и для каждого календарного года, для которого имеются данные, в системе компьютерной алгебры Mathcad выполняется интерполяция с получением значений концентраций общего азота и фосфора, а также расхода воды для каждых суток периода наблюдений по отдельным годам. Затем рассчитанные ряды значений обрабатываются в программе Microsoft Excel. В результате перемножения концентрации субстанции в конкретные сутки определённого года на расход воды в эти же сутки этого же года получаем величину суточного стока субстанции с водосбора в данные сутки. Далее выполняется обработка значений, относящихся к каждому суткам внутригодовой динамики. Для этого рассматриваются значения, относящиеся к одинаковому номеру суток от начала года для всех лет наблюдений. Определяются: среднее арифметическое значение величины поступления субстанции, среднее квадратичное (стандартное) отклонение (СКО) этого поступления, а также доверительный интервал поступления субстанции: нижняя граница – среднее арифметическое минус СКО, верхняя граница – среднее арифметическое плюс СКО для каждых суток внутригодовой динамики. Делением суточного поступления общего

азота или фосфора с водосбора водотока-аналога на его площадь определяется суточный модуль стока данного биогенного элемента с этого водосбора.

Площади водосборов определяются следующим образом. В среде ГИС на основании растровых изображений топографических карт создаётся цифровая модель рельефа (ЦМР). Далее с помощью гидрологических функций ГИС и ЦМР определяются границы как частных водосборов рек-аналогов выше створов мониторинга, так и водосборных бассейнов исследуемых рек, биогенный сток которых не учитывается при определении поступления азота и фосфора в Невскую губу и восточную часть Финского залива. Площади водосборов определяются в среде ГИС. С помощью электронных карт и спутниковых снимков определяется пространственное строение водосборов, и выявляются водосборы водотоков-аналогов, наиболее сходные по своему пространственному строению с водосборами исследуемых водотоков. Далее умножением модулей стока азота и фосфора, определённых для наиболее сходных по пространственному строению водосборов водотоков-аналогов, на площадь водосборных бассейнов исследуемых водотоков определяются суточные значения поступления азота и фосфора в составе стока этих водотоков. Суммированием всех суточных значений определяется годовое поступление общего азота и фосфора со стоком этого водотока.

Результаты и выводы

В качестве примера рассмотрим результаты определения внутригодовой динамики модулей стока общего азота и фосфора с частного водосбора водотока-аналога – реки Ижоры. Здесь створы мониторинга расхода воды и химического состава речного стока не совпадают: створ мониторинга расхода расположен выше по течению. Поэтому в среде ГИС были выделены два частных водосбора р. Ижоры: выше каждого из этих створов, и рассчитаны их площади. Площадь водосбора выше створа мониторинга химического состава равна 1000 км². Отношение площади частного водосбора выше створа мониторинга химического состава к площади водосбора выше створа определений расхода воды составляет 1.49. Поэтому для получения расходов на створе мониторинга химического состава расходы умножались на 1.49. Были использованы данные мониторинга СЗУГМС за 1980-1989 гг. Данные мониторинга СЗУГМС были получены из бюллетеней: «Ежегодные данные о качестве поверхностных вод суши» и «Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши». Доступ к данным для ознакомления был предоставлен в отделе государственного фонда данных СЗУГМС.

Внутригодовая динамика модулей стока общего азота и фосфора с водосбора р. Ижоры в 1980-1989 гг. приведена на Рис. 1 и Рис. 2. Очевидны внутригодовая изменчивость модулей стока общего азота и фосфора, и существенное снижение этих величин в летний период. Поэтому при определении экологически обоснованных норм антропогенного воздействия следует принимать во внимание эту изменчивость.

Средние годовые значения поступления общего азота и фосфора в Невскую губу со стоком реки Невы и её рукавов в 1979-2019 гг. составили: азот – 56860 тонн/год, фосфор – 1716 тонн/год [5]. По нашим расчётам суммарная площадь водосборных бассейнов, с которых в Невскую губу и восточную часть Финского залива в пределах Санкт-Петербурга происходит поверхностный сток, не учитываемый при оценке поступления азота и фосфора, составляет 2281 км². В соответствии с результатами наших исследований средний годовой модуль стока общего азота с бассейна р. Ижоры равен 1.945 т/км²•год, общего фосфора – 0.106 т/км²•год. На основании этих значений получаем ориентировочные величины поступления с неучитываемых водосборов: общий азот – 4436 тонн/год, общий фосфор – 242 тонн/год, что соответственно составляет 8% и 14%.

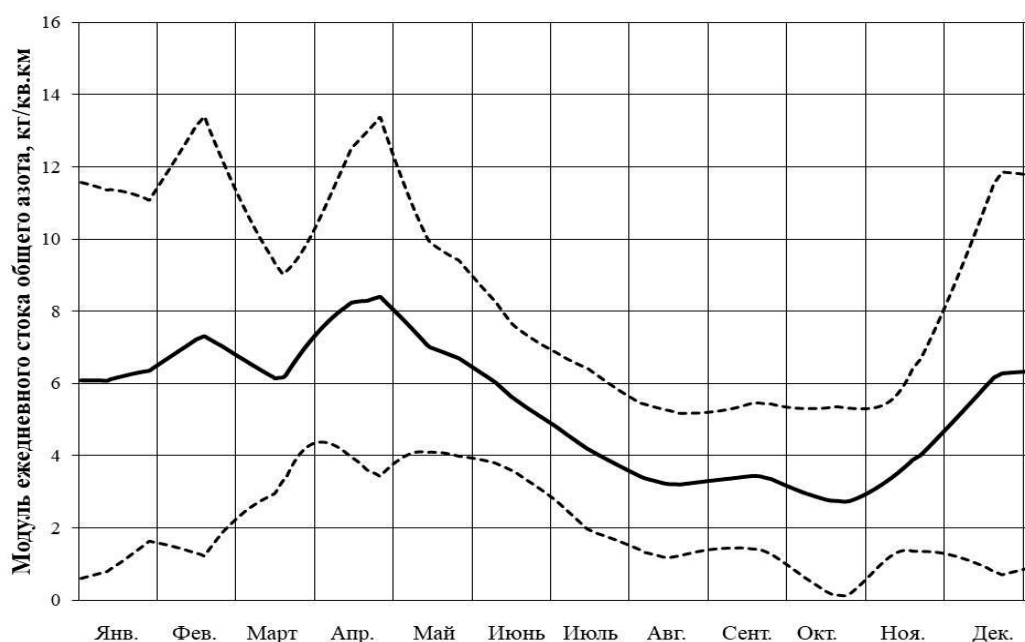


Рис. 1 Внутригодовая динамика модуля стока общего азота с водосбора р. Ижоры, среднее значение и доверительный интервал, кг/км² • сутки.

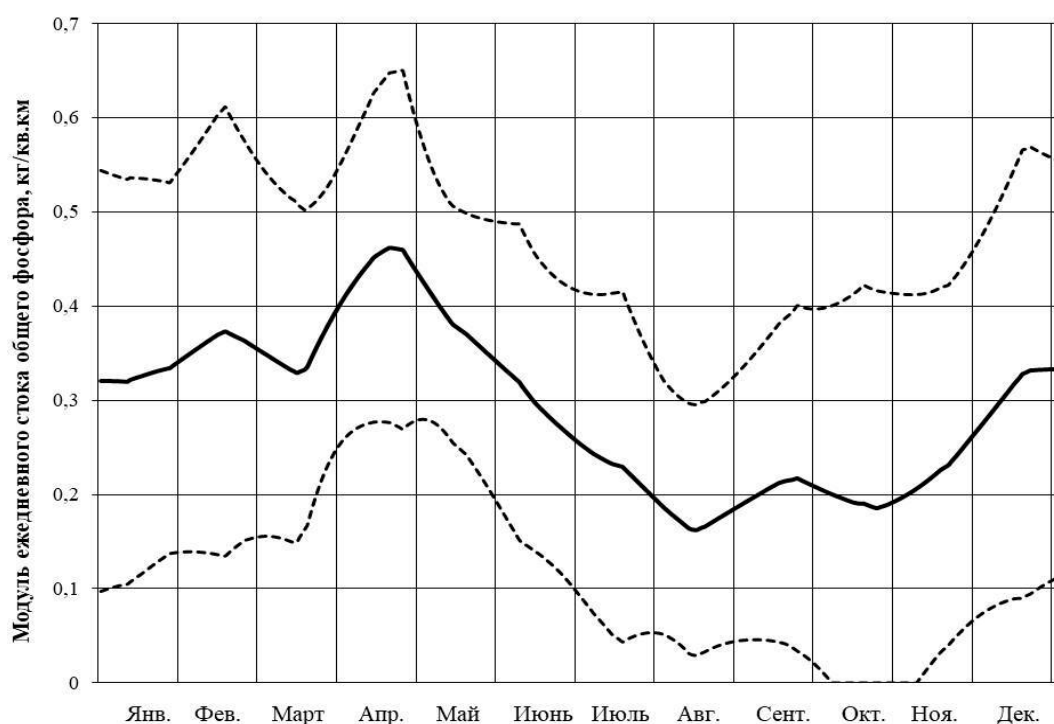


Рис. 2 Внутригодовая динамика модуля стока общего фосфора с водосбора р. Ижоры, среднее значение и доверительный интервал, кг/км² • сутки.

Разумеется, эта оценка является предварительной, без учёта пространственного строения водосборов. Однако уже очевидно, что сток азота и фосфора с неучитываемых водосборов не столь незначителен, чтобы пренебрегать им при определении экологически обоснованных норм антропогенного воздействия на экосистемы Невской губы и восточной части Финского залива.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-27-10011, и при финансовой поддержке Санкт-Петербургского научного фонда.

Acknowledgments

The work was supported by Russian Science Fund, grant No. 23-27-10011, and by Saint Petersburg Science Fund.

Список литературы

1. Владимирова О.М., Еремина Т.Р., Исаев А.В., Рябченко В.А., Савчук О.П. Модельные оценки составляющих баланса азота и фосфора в экосистеме Финского залива // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2018. № 53. С. 72-82.

2. Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Брюханов А.Ю., Викторова Н.В., Ершова А.А., Обломкова Н.С. К оценке биогенного стока в Финский залив Балтийского моря // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2018. № 51. С. 109–120.

3. Лозовик П.А., Бородулина Г.С., Карпечко Ю.В., Кондратьев С.А., Литвиненко А.В., Литвинова И.А. Биогенная нагрузка на Онежское озеро по данным натурных наблюдений // Труды Карельского научного центра РАН. № 5. С. 35-52.

4. Осипов А.Г., Осипов Г.К., Ковязин В.Ф. Методика геоинформационного моделирования выноса биогенных веществ в Финский залив из лесного растительного покрова // Материалы международной научной конференции «Интеркарто. Интергис-26» 27-28 сентября 2020, Тбилиси (Грузия). 2020. М: Издательство Московского университета, 2020. Т. 26. Ч. 2. С. 137–150.

5. Серебрицкий И.А., Григорьев И.А. Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге. СПб: Изд-во Сезам-принт, 2019, 448 с.

6. Степанова Е.В. Оценка фоновой составляющей стока валового фосфора с водами контролируемых и неконтролируемых рек бассейна Балтийского моря // Молодой ученый. 2009. № 11. С. 352-355.

7. Чубаренко Б.В., Кондратьев С.А., Брюханов А.Ю. Биогенная нагрузка на Балтийское море с Российской территории водосборов Калининградского/Вислинского и Куршского заливов // Известия Русского географического общества. 2017. № 149(4). С. 69-84.

8. Brylinsky M. Users Manual for Prediction of Phosphorus Concentration In Nova Scotia Lakes: A Tool for Decision Making. Version 1.0, Acadia Centre for Estuarine Research, Acadia University, Wolfville, Nova Scotia, B4P 2R6, Canada, 2004. 88 pp. Доступна online:

<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.489.5561&rep=rep1&type=pdf>.

Дата обращения: 5 June 2023.

Проблемы устойчивого водопользования в бассейне реки Дон

Е.В. Колесникова*, Т.С. Антоненко

*Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург,
Россия
astra-j@mail.ru*

Аннотация. Устойчивое развитие бассейна реки Дон тесно связано с обеспечением устойчивого водопользования. Однако, именно водный ресурс бассейна во многом исчерпан, что ограничивает дальнейшее развитие территории. В работе рассмотрены проблемы водных ресурсов р. Дон, связанные с климатическими изменениями, а также с низкой лесистостью бассейна. Показано, что в нижнем течении р. Дон за многолетний период произошло значительное снижение стока. Проведен статистический анализ климатических характеристик расходов воды р. Дон. Показана связь расходов воды и температуры воздуха, а также расходов воды и атмосферных осадков. Сделан подбор законов распределения для рядов стока р. Дон.

Ключевые слова: бассейн р. Дон, истощение водных ресурсов, устойчивое водопользование, однородность рядов наблюдений, законы распределения случайной величины.

Problems of sustainable water use in the Don River Basin

E.V. Kolesnikova*, T.S. Antonenko

*Russian State Hydrometeorological University St. Petersburg, Russia
astra-j@mail.ru*

Abstract. The sustainable development of the Don River Basin is closely related to the provision of sustainable water use. However, it is the water resource of the basin that has been largely exhausted, which limits the further development of the territory. The paper considers the problems of water resources of the river Don which associated with climate change, as well as low forest cover of the basin. It is shown that in the lower reaches of the river Don over a long period there was a significant decrease in runoff. A statistical analysis of the climatic characteristics of the river water discharges was carried out. The relationship between water flow and air temperature, as well as water flow and precipitation is shown. The selection of distribution laws for the data of the river runoff is made.

Keywords: Don River Basin, depletion of water resources, sustainable water use, homogeneity of time series data, random variable distribution laws.

Введение

Бассейн реки Дон всегда имел важное геополитическое значение. Благодаря теплomu климату, плодородным землям, водным ресурсам и удачному географическому расположению эта территория всегда была заселена. Найдены стоянки древних людей каменного века по всему течению Дона. Скифия, Хазария, Дикое Поле, Донской бассейн всегда имел высокую геополитическую значимость и представлял интерес для греков, римлян, арабов. С середины XVI века, начиная с Ивана Грозного, все владения казаков называют «Доном». Сейчас Донской бассейн так же захватывает регионы с высокой

плотностью населения и активным водопользованием. На его берегах расположены два города-миллионера – Ростов-на-Дону и Воронеж.

Устойчивое развитие региона тесно связано с обеспечением устойчивого водопользования, то есть с планированием и выполнением государством и общественностью мер, направленных на охрану и улучшение качественного и количественного состояния вод и водных объектов, отвечающих потребностям настоящих и будущих поколений. Однако именно водный ресурс бассейна во многом исчерпан, что ограничивает дальнейшее развитие территории. Одной из главных проблем р. Дон является его обмеление [1]. Часто эксперты указывают на климатические изменения как на его основную причину. Среди проблем водообеспечения отмечается исчерпание свободных водных ресурсов для дополнительного использования и водообеспечение орошаемого земледелия. Среди проблем негативного воздействия вод выделяются процессы затопления хозяйственно освоенных территорий половодьями и паводками, авариями на гидротехнических сооружениях.

Кроме того, анализ литературных источников показал, что основные экологические проблемы бассейна так же связаны с несоответствием качества воды по требованиям рыбохозяйственного, питьевого и коммунально-бытового водопользования, а также с эвтрофированием водоемов. Периодически отмечаются многократные превышения ПДК по таким загрязняющим веществам, как медь, железо, марганец, магний, фенолы, сульфаты, нефтепродукты, азот нитритный, азот аммонийный [5].

Актуальность работы заключается в непосредственной значимости водных ресурсов региона как определяющего фактора для здоровья населения, прогрессирования социально-экономической системы и экологического состояния в целом. Целью данных исследований стало выявление и оценка тенденций и закономерностей в динамике водности бассейна р. Дон за многолетний период.

Материалы и методы исследования

Для выявления основных экологических проблем бассейна р. Дон проведен сбор и систематизирование первичной информации наблюдений за гидрологическими и метеорологическими характеристиками из архива Российского государственного гидрометеорологического университета, а также из аналитических обзоров Донского бассейнового управления.

Материалами для исследований послужили данные о среднегодовых расходах воды р. Дон за период с 1956 по 2020 гг. Исследование временных закономерностей стока р. Дон проведено по пунктам наблюдений за водностью по всей длине реки, а именно ст. Лиски (площадь водосбора 69 500 км²), ст-ца Казанская (площадь водосбора 102 000 км²), ст-ца Раздорская (площадь водосбора 378 000 км²) [2]. Кроме того, в работе задействованы данные по среднегодовым температурам воздуха за период с 1881 по 2020 гг. и данные о атмосферных осадках за период с 1936 по 2020 гг. В работе использованы в основном статистические методы, а также анализ литературных источников.

Результаты и обсуждение

Бассейн Дона находится в южной части России и в свою очередь принадлежит Азовскому водосборному пространству. Для региона характерна выраженная зональность почв, наблюдаемая в изменении типов почв при движении с северо-северо-запада на юго-юго-восток. Также, для исследуемого региона характерен низкий процент лесистости.

Условия формирования стока рек бассейна тесно связаны с его климатическими характеристиками. Природные риски здесь связаны в основном с климатическими

особенностями: высокими летними температурам воздуха и сильными ветрами. Климат на территории бассейна умеренно континентальный с относительно холодной зимой и теплым, засушливым летом. На открытой местности с плоским рельефом сильные ветры и высокие летние температуры воздуха обеспечивают высокое испарение с территории водосбора. Ряд водохранилищ (Цимлянское, Белгородское, Веселовское и др.) так же характеризуются высоким испарением с площади своего зеркала. Действительно, при анализе многолетних ежемесячных данных температур за период с 1881 по 2020 гг. (г. Ростов-на-Дону), отмечена тенденция к повышению средних годовых температур, которое составило 2,5 °С. Интересно, что так же отмечается положительная тенденция и по среднегодовому количеству атмосферных осадков. Анализ данных (г. Ростов-на-Дону) за период с 1936 по 2020 гг. показал, что количество осадков постоянно увеличивалось и выросло на 150 мм в год.

Одной из важных проблем устойчивого водопользования мы выделили сокращение площадей водосбора, занятых лесом. Известно, что бассейн Дона распахан на 70 %. Как сказано в источнике [3; 4], лесистость в среднем составляет всего 6% и характеризуется большой неравномерностью (1-12%). В бассейне Верхнего Дона лесистость достигает 10 %, облесенность пашни защитными лесными полосами не превышает 1,5- 2,0 %.

По своему гидрологическому режиму реки бассейна относятся к типу рек с весенним половодьем и паводками в теплое время года. Реки бассейна имеют преимущественно снеговое питание, но снежный покров из-за отсутствия леса не задерживается на водосборе, весной тает быстро и переходит большей частью в поверхностный сток, не пополняя подземный. В свою очередь поверхностный сток, как было указано выше, подвержен высокому испарению. Эрозия необлесённых берегов приводит к повышению мутности вод рек. Все эти обстоятельства ведут к снижению количественной и качественной характеристики водных ресурсов региона. Таким образом, в Донском бассейне возникла проблема истощения водных ресурсов, что ставит под вопрос их сохранность для последующих поколений и основы устойчивого водопользования.

Анализ гистограмм значений водности р. Дона показал, что распределение рядов среднегодовых расходов воды симметрично для верховья и среднего течения р. Дон, где преобладают средние значения расходов. В низовье реки, ст-ца Раздорская, наблюдается положительная асимметрия распределения расходов воды, водность здесь, как правило, низкая с редкими фазами высокой водности.

Проверка рядов расходов воды на случайность проводилась по критерию длин и числа серий, по числу повышений и понижений, а также по числу экстремумов. Показано, что в нижнем и среднем течении ряды стока за многолетний период случайны, в них не обнаружены статистически значимые закономерности. Однако в нижнем течении р. Дона ряды стока оказались неслучайными, что показывает антропогенное влияние на сток в низовьях р. Дон. Оценка однородности рядов расходов воды показала, что ряды по пунктам наблюдения ст-ца Казанская и ст. Лиски однородны по среднему значению и дисперсии (критерии Стьюдента и Фишера). Для пункта ст-ца Раздорская ряд неоднороден по критерию Стьюдента. Таким образом, в нижнем течении Дона наблюдается значительное снижение расходов воды, которое нельзя объяснить случайными колебаниями. Был сделан вывод о том, что в отличие от верхнего течения, в низовьях Дона сток реки со временем заметно снижается. Показано, что за период с 1956 по 2020 гг. в нижнем течении Дона расходы воды снизились на 250 м³/с.

Для подбора закона распределения для рядов водности были построены кривые обеспеченности нормального и логарифмически-нормального закона, а также кривые Пирсона III типа, Крицкого-Менкеля, Джонсона и Гамбела. Показано, что оптимальным

законом распределения значений расходов воды для пункта р.Дон – ст-ца Раздорская является закон Джонсона. При проведении корреляционного анализа рядов гидрологических и метеорологических характеристик бассейна за многолетний период не выявлено статистически значимой связи между значениями атмосферных осадков и расходами воды. Таким образом, годовой и сезонный сток в низовьях Дона практически не зависят от количества выпавших осадков. Показано, что решающим фактором при формировании стока в нижнем течении Дона является среднегодовая температура воздуха, между этими параметрами была выявлена значимая обратная связь.

Выводы

Подводя итог вышесказанному можно выделить следующие наиболее актуальные проблемы, порождающие неэффективное водопользование в бассейн р. Дон. В нижнем течение Дона наблюдается значительное снижение расходов воды, которое нельзя объяснить случайными колебаниями стока. Показано, что за период с 1956 по 2020 гг. в нижнем течении Дона расходы воды снизились на 250 м³/с.

Значительное влияние на водность бассейна оказывает умеренно-континентальный климат и отмечающиеся положительные тенденции к повышению средних годовых температур воздуха и атмосферных осадков. Так, снижение водности реки сопровождается постепенным увеличением количества атмосферных осадков, то есть не может быть объяснено маловодными фазами климата. С 1936 по 2020 гг., отмечена тенденция к повышению среднегодового количества атмосферных осадков, в среднем на 130 мм/г. за многолетний период. При исследовании периода с 1881 по 2020 гг. отмечена тенденция к повышению средних годовых температур воздуха, в среднем на 2,2°С.

Для связи многолетних рядов расходов воды и атмосферных осадков были получены значимые отрицательные коэффициенты корреляции. Для связи рядов расходов воды и температуры воздуха были получены значимые положительные коэффициенты корреляции.

Практически все проблемы, связанные с количеством поверхностных вод, и некоторые, связанные с качеством, имеют отношение к крайне низкой степени лесистости водосбора, которая составляет от 1% до 10%.

Список литературы

1. Власенко, М. В. Регулирование устойчивого водопользования и решение экологических проблем в маловодные годы в бассейне реки Дон / М. В. Власенко, А. М. Пугачева, М. В. Шульгин // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2020. – № 1(77). – С. 10-14.
2. Гидрологический ежегодник 1956-1973гг: Том 2 бассейны Черного и Азовского морей (без Кавказа). Вып.7-9 Бассейн р.Дон- Л : Гидрометеоиздат, 1974. – 439 с.
3. Департамент лесного хозяйства Ростовской области – официальный сайт органа власти Ростовской области. Доступна online: <http://rostles.donland.ru>. Дата обращения: 31.08.2023.
4. Жердев В.Н., Полякова Н.В., Ландшафтно-экологическая оценка речного бассейна Дона // Эколого-географические исследования в речных бассейнах. – 2018. – № 1(77). – С. 198-202.
5. Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник.2018-Ростов-на-Дону: Росгидромет, ГХИ, 2019. – 560 с [Электронный ресурс]. - Доступна online: <http://gidrohim.com/node/80>. Дата обращения: 31.08.2023.

Расчет и прогноз ледникового питания в речных бассейнах

В.Г. Коновалов

*Институт географии РАН, Москва, Россия
vladgeo@gmail.com*

Аннотация. Представлены варианты регионального моделирования, расчета и прогноза составляющих гидрологического цикла в горно-ледниковых речных бассейнах. Установлено, что результаты линейной экстраполяции пространственно-временных изменений высотно-площадных характеристик совокупностей ледников в речных бассейнах являются достаточной входной информацией для расчета гидрологического режима оледенения. Получены удовлетворительные абсолютные и относительные оценки отклонений между годовыми объемами стока: измеренного и рассчитанного по уравнению водного баланса в верховье р. Роны, гидропост Порт-дю-Се в течение 1971-2016 гг., а также между измеренными и рассчитанными объемами годовых осадков в бассейне р. Роны за 1971-2016 гг. Впервые разработан и проверен метод регионального предсказания годового слоя абляции Ab на высоте фирновой границы, равной средней высоте ледника, как функции прогнозируемой средней летней температуры воздуха T_s . Средняя относительная ошибка расчета $Ab=f(T_s)$ по зависимостям $T_s=T_s(z, t)$ в бассейнах рек Роны и Кызылсу составила, соответственно, 1.6 (6.7%) и 5.0 (10.5%), в скобках приведены относительные ошибки прогноза Ab в этих же бассейнах. Впервые получены прогнозные значения средних для 2025-2054 гг. объемов годового и вегетационного стока р. Рона как функции индекса ледникового питания δ .

Ключевые слова: водный баланс, прогноз, ледниковый сток, Евразия, моделирование, абляция, осадки, испарение, реки Рона (Альпы), Кызылсу (Памир)

Calculation and Forecast of Glacial Feeding in River Basins

V.G. Konovalov

*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
vladgeo@gmail.com*

Abstract. The variants of regional modeling, calculation and forecast of the components of the hydrological cycle in mountain-glacial river basins are presented. It is established that the results of linear extrapolation of spatio-temporal changes in the altitude-area characteristics of glacier aggregates in river basins are sufficient input information for calculating the hydrological regime of glaciation. Satisfactory absolute and relative estimates of the deviations between the annual volumes of runoff: measured and calculated by the equation of water balance in the upper reaches of the river Rhone (gorging site Port du Scex) are obtained during 1971-2016, as well as between the measured and calculated annual precipitation volumes in the Rhone River basin for 1971-2016. The method of regional prediction of the annual ablation layer Ab at the height of the firm boundary, which equaled to the average height of the glacier, as a function of the predicted average summer air temperature T_s was developed and tested for the first time. For the first time, the forecast values of the average for 2025-2054 volumes of annual and vegetation runoff of the Rhone River as a function of the index of glacial nutrition δ were obtained. The average relative calculation error $Ab=f(T_s)$ according to the dependencies

$T_s = T_s(z, t)$ in the basins of the Rhone and Kyzylsu rivers was 1.6 (6.7%) and 5.0 (10.5%), respectively, and the relative forecast errors in the same basins are given in parentheses.

Keywords: water balance, forecast, glacial runoff, Eurasia, modeling, ablation, precipitation, evaporation, Rhone river (Alps), Kyzylsu river (Pamir).

Введение

Параметризация физических процессов в форме эмпирических одно- и многофакторных линейных уравнений регрессии широко используется в гидрологических и климатических расчетах. Применение этого метода в гляциологии затруднено отсутствием многолетних данных о режиме оледенения. Работа направлена на решение двух важных проблем гидрологии ледников. 1. Разработать метод параметризации и расчета ежегодных изменений ледникового стока в крупных речных бассейнах Северного полушария на основе: а) Получения и использования линейных зависимостей от времени региональных морфологических характеристик: площадь оледенения F_{gl} , высот начала Z_{beg} и конца ледников Z_{end} , средней высоты $Z_{mean} = (Z_{beg} + Z_{end}) \cdot 0.5$; б) Приближенного расчета удельной годовой абляции как функции средней летней температуры воздуха. 2. Разработать методы прогноза ледникового питания с заблаговременностью один месяц для ежегодных величин и не менее одного года для средних многолетних.

Материалы

Информационной основой для гидрологических и гляциологических расчетов, служили [1-3,6]: 1. Многолетние измерения стока на гидропостах в бассейнов рек Евразии, Северной Америки, Центральной Европы, Центральной Азии; 2. Данные мониторинга параметров оледенения в бассейне р. Рона за 1971-2016 гг. 3. Многолетние измерения осадков и температуры воздуха на метеорологических станциях, расположенных на территории Швейцарии, Памира и Тянь-Шаня.

Методы исследования

Как показано в работе [3] годовой объем W_{gl} таяния на площади оледенения F_{gl} в первом приближении можно принять равным произведению F_{gl} и годового слоя абляции $Ab(Z_{mean})$ на средней высоте $Z_{mean} = (Z_{end} + Z_{beg}) \times 0.5$.

$$W_{gl1} = Ab(Z_{mean})F_{gl}, \quad (1)$$

где Ab – годовой слой абляции (таяния) в мм на высоте Z_{mean} как функция характерной температуры воздуха $T = T(Z)$ на высоте Z_{mean} . Здесь Z_{end} , Z_{beg} – соответственно высоты конца и начала распределения $F_{gl} = F_{gl}(Z)$. Необходимо также выполнение условия линейного изменения $Ab = Ab(Z)$ и постоянства либо учета временных колебаний параметров Z_{end} , Z_{beg} .

Распространенным методом определения слоя $Ab = Ab(Z)$ служат эмпирические уравнения $Ab = f(T)$. Удобной для региональных расчетов годовой абляции $Ab = f(T)$ является формула (2), предложенная в работе [4]:

$$Ab = 1.33(T_s + 9.66)^{2.85}, \quad (2)$$

где Ab – удельная абляция (таяние + испарение) в мм, T_s – средняя летняя температура воздуха в °С. Ввиду крайне незначительного вклада слоя испарения в величине Ab , формула (2) наиболее пригодна для определения слоя таяния M поверхности ледника. Поэтому в качестве оценок M будем считать результаты расчета, полученные по формуле (2).

Репрезентативность составляющих ледникового питания в верховье р. Рона установлена на основе использования упрощенного уравнения годового водного баланса речного бассейне в виде:

$$P_{yr} + W_{gl1} - (E_{yr} + W_{yr}) = 0 \quad \text{в км}^3, \quad (3)$$

где W_{yr} – объем стока, измеренного на гидропосту Порт-дю-Се, P_{yr} – сумма осадков, W_{gl1} – объем таяния на площади оледенения без учета типов поверхности, E_{yr} – объем испарения с поверхности водосбора. Годовые объемы испарения и осадков относятся ко всей площади речного бассейна F_{bas} , включая площадь оледенения F_{gl} .

Численные значения переменных в уравнении (3) получены следующими способами. а) W_{yr} по данным измерений на гидропосту Порт-дю-Се. б) Объем P_{yr} на площади F_{bas} в уравнении (3) рассчитан в k -е годы по формуле (4):

$$P_{yr} = [\alpha_1 (k)\bar{Z} + \beta_1(k)] \cdot F_{bas} \quad (4)$$

В (4) \bar{Z} – средняя взвешенная высота бассейна в верховье р. Рона, равная 1299 м, α_1, β_1 – параметры эмпирических формул. Использование единой средней взвешенной высоты для площади F_{bas} в случаях расчета годовых объемов осадков и испарения основано на тесной линейной зависимости от высоты Z . Средний коэффициент детерминации выражений $P=P(Z)$ в 1971-2010 гг. равен 0.79.

Подтверждение репрезентативности годовых осадков, найденных по формуле (4) для бассейна р. Рона в течение 1971-2016 гг., выполнено путем сравнения результатов расчета $P(\bar{Z})$ со средними значениями осадков P_{bas} в этом бассейне. Для осреднения использованы данные 10 метеостанций, расположенных на высотах от 319 м до 2964 м над уровнем моря. Для оценки временной динамики эмпирических параметров в формуле (4) для расчета годовых сумм осадков использованы данные метеостанций Швейцарии и Германии, расположенных в верховье бассейна р. Рона. В итоге сравнительного анализа установлено, что абсолютное значение среднего за 47 лет относительного отклонения результатов расчета осадков от данных измерений составило всего 5.7%, а коэффициент корреляции между $P(\bar{Z})$ и P_{bas} равен 0.90. По данным [7] коэффициент стока η годовых осадков за 1980-2009 гг. для сходных по гляциоклиматическим показателям бассейнов альпийских рек Рона и Инн составил, соответственно, 0.74 и 0.77, что вполне согласуется с величиной $\eta=0.74$ по нашим расчетам за 1971-2010 гг.

Для определения объема ледникового стока W_{gl1} в k -е годы на площади $F_{gl}(k)$ использованы [1-2]: а) итоги расчета годового слоя абляции $Ab(Z_{mean})_k$, б) реконструированная площадь оледенения в бассейне в 1975-2016 гг.

Таким образом результаты определений переменных W_{yr}, P_{yr}, W_{gl1} считаем достаточно достоверными, для приближенного расчета испарения по формуле:

$$E_{yr} = P_{yr} + W_{gl1} - W_{yr}.$$

Отклонения измеренного годового стока р. Рона от рассчитанного по уравнению водного баланса иллюстрирует Рис. 1.

Прогноз ледникового питания

Согласно разработанного автором метода [1], прогноз ежегодных объемов W_{gl1} проводится в два этапа. На первом, выполняется реконструкция с годичным разрешением временных рядов $F_{gl}, Z_{end}, Z_{beg}, Z_{mean}$ по ограниченным данным регионального мониторинга оледенения. Эти результаты служат ключевой входной информацией для регионального расчета таких характеристик, зависящих от высоты Z , как: Ab – удельная абляция/таяние льда, фирна и снега; осадки, температура воздуха и упругость водяного пара в воздухе.

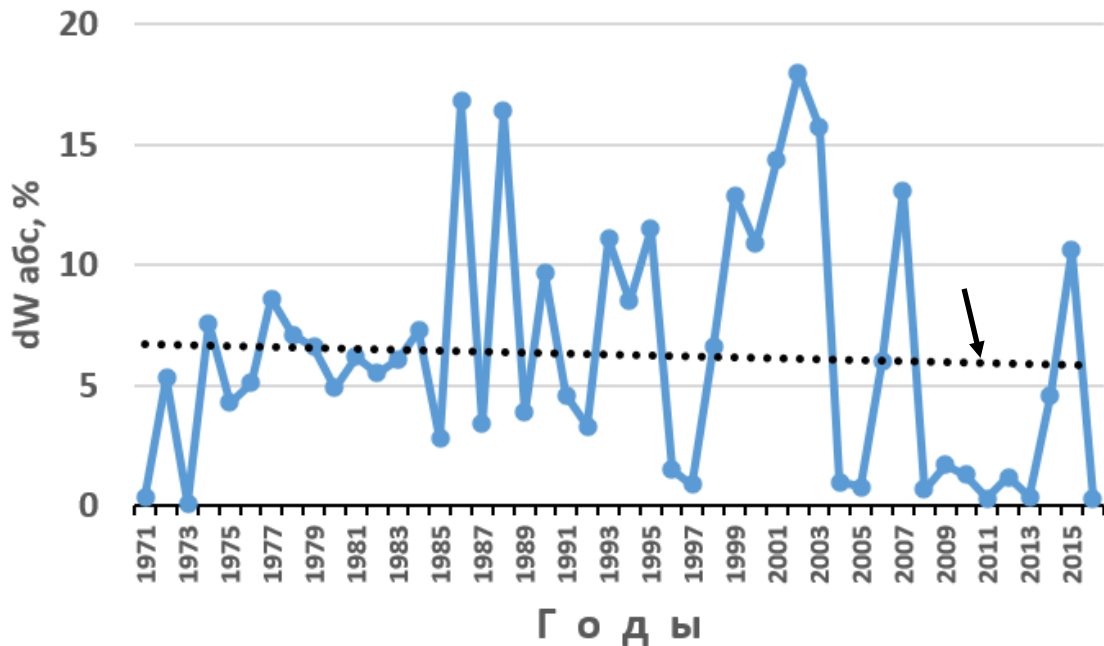


Рис. 1 Абсолютная относительная разность между измеренным годовым стоком р. Рона (гидропост Порт дю Се) и рассчитанным водным балансом по формуле (3); ··· – линейный тренд dW абс, %.

На втором этапе выполняется расчет и прогноз временного ряда температуры воздуха $T_s(Z_{mean})$, которая служит аргументом для определения слоя абляции на площади оледенения F_{gl} . Для нескольких речных бассейнов Евразии, были получены ежегодные вертикальные профили температуры воздуха $T_a=T_a(Z)$, $T_s=T_s(Z)$ и формулы для расчета T_s как функции T_a с коэффициентом детерминации более 0.90. Таким образом, в региональном масштабе впервые установлено, что средняя температура воздуха апреля T_a обеспечивает с месячной заблаговременностью прогноз T_s и соответственно прогноз слоя годовой абляции на высоте Z_{mean} . При этом региональный расчет $T_s(Z)$ в k -е годы выполняется по формуле (3):

$$T_s(Z) = -\alpha_0(k) + \beta_0(k), \quad (3)$$

где Z – высота над уровнем моря, α_0 , β_0 – эмпирические параметры, имеющие многолетний ход. Учитывалось также изменение вертикального профиля $T_s(Z)$ в результате известного явления «скачка температуры воздуха» при переходе с грунтовой поверхности на ледниковую.

Многолетнее изменение прогнозируемых величин $Ab^*(Z_{fg})$ и ошибки прогнозов относительно $Ab(Z_{fg})$, в качестве иллюстрации решения поставленной проблемы, представлено на Рис. 2.

Региональное исследование колебаний индекса ледникового питания δ [5] во времени t выполнено по многолетним ежегодным измерениям стока в бассейнах рек Евразии, Северной Америки, Центральной Европы, Азии. Индекс δ равен отношению между объемами стока W либо средними расходами воды Q за периоды июль-сентябрь (7-9) и март-июнь (3-6). Считается [5], что объем $W(7-9)$ обусловлен преобладанием ледникового питания реки, а объем $W(3-6)$ – снегового.

В итоге анализа зависимости $\delta=\delta(t)$ установлены важные региональные выводы относительно динамики и последствий изменения составляющих речного стока. Так, градиент уравнения линейного тренда для индекса δ во всех рассмотренных речных бассейнах имеет отрицательное значение, что указывает на сокращение ледниково-снегового питания, точнее только его ледниковой составляющей. Несмотря на это,

годовой сток уменьшился только в трех бассейнах, а в остальных наблюдалось увеличение Q_{year} , вследствие роста Q_{3-6} , который перекрывал уменьшение Q_{7-9} .

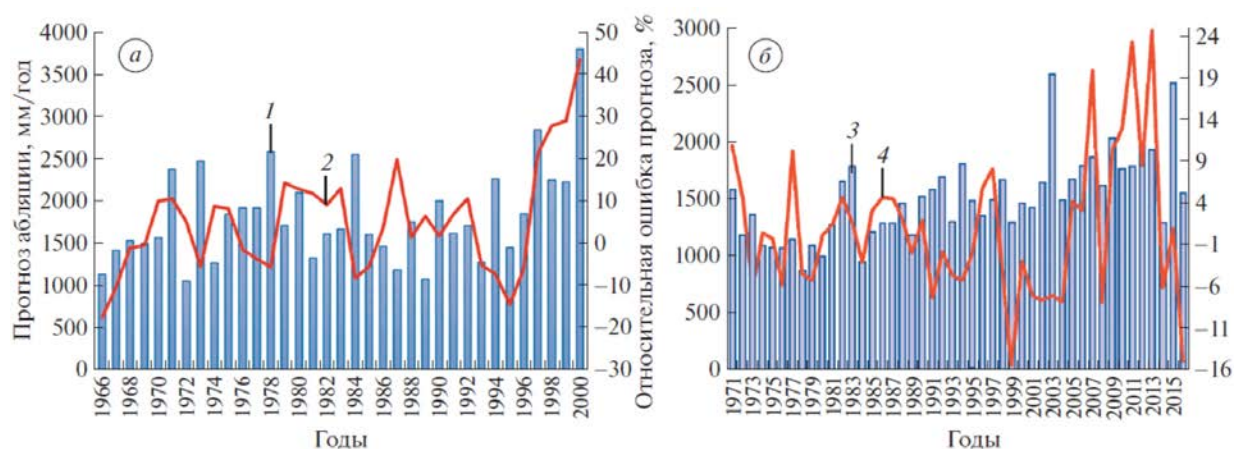


Рис. 2 Прогноз удельной абляции $Ab(t)$ мм/год на высоте $Z_{\text{mean}}=Z_{fg}$ и относительная разность между $Ab(Z_{fg})$ и $Ab^*(Z_{fg})$ в %. а: 1 и 2 – в бассейне р. Западная Кызылсу; б: 3 и 4 – в бассейне р. Рона.

Изменение в течение 1905–2054 гг. средних многолетних объемов речного стока р. Рона за календарный год W_{year} , вегетационный период (апрель-сентябрь) W_{veg} и отношения δ иллюстрируют данные в таблице 1. Ожидаемые величины δ , W_{veg} , W_{year} для 2025-2054 гг. рассчитаны по линейным уравнениям $\delta=\delta(t)$, $R^2=0.96$; $W_{\text{veg}}=f(\delta)$, $R^2=0.98$; $W_{\text{year}}=f(\delta)$, $R^2=0.94$, полученным за 1905–2024 гг. Здесь R^2 – коэффициент детерминации.

Табл. Средние значения δ и составляющих стока р. Рона в 1905–2054 гг.

Переменная	Временные интервалы, годы				
	1905–1934	1935–1964	1965–1994	1995–2024	2025–2054
δ	1.44	1.34	1.08	0.97	0.80
W_{veg} , км ³	4.488	4.400	3.862	3.793	3.498
W_{year} , км ³	5.553	5.665	5.757	5.809	5.932

Выводы

1. Универсальность методики расчета составляющих уравнения (3) свидетельствует о ее пригодности для применения в других речных бассейнах Центральной Европы, относящихся к снегово-ледниковому типу формирования стока. Это реки По, Инн, Дунай и другие бассейны, где имеются данные неоднократной каталогизация оледенения и многолетние метеорологические наблюдения для построения зависимостей $P_k=f(Z)$ и $T_k=f(Z)$ как функции высоты местности, а также неискаженные измерения месячных объемов стока на гидропосту, замыкающем площадь выбранного водосбора.

2. Верификация рассчитанных составляющих гидрологического режима оледенения, подтверждает репрезентативность значений P_{bas} , W_{gl1} , E_{bas} , η в рамках принятого уравнения годового водного баланса речного бассейна $P_{\text{bas}}+W_{\text{gl1}}-E_{\text{bas}}-W_{\text{bas}}=0$.

3. Индекс δ для верховья р. Рона оказался не только репрезентативной характеристикой изменения составляющих стока реки W_{veg} , W_{year} , но и вполне пригодным аргументом для долгосрочного прогноза этих переменных.

Благодарности

Автор выражает благодарность организациям: Франции (EauFrance), и Швейцарии (Federal Office for the Environment FOEN. Hydrological Data Service for watercourses and lakes; Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss) за информационную поддержку выполненной работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Института географии РАН темы госзадания № 0148-2018-0008 и FMGE-2019-0004 АААА-А19-119022190172-5.

Acknowledgments

The author thanks to the organizations: France (EauFrance), and Switzerland (Federal Office for the Environment FOEN. Hydrological Data Services for watercourses and lakes; Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss) for information support of the work performed.

The work was supported by the financial support of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, the topics of state task are No. 0148-2018-0008 and FMWS-2024-0004 АААААА-А19-119022190172-5.

Список литературы

1. Коновалов В.Г. Расчет и прогноз ледникового питания в речных бассейнах // Лед и снег. 2023, 63 (2): 188–198.
2. Коновалов В.Г. Характеристики ледникового питания рек // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 3, с. 31–39.
3. Коновалов В.Г. Региональный гидрологический режим горного оледенения. // Известия РАН. Серия Географическая. 2021. том 85. № 3. с. 368–379.
4. Кренке А.Н. Массообмен в ледниковых системах на территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 287 с
5. Шульц В.Л. Реки Средней Азии. Л., Гидрометеиздат, 1965, 691 с.
6. Paul F., Rastner P., Azzoni R., Diolaiuti G., Fugazza D., Le Bris R., Nemeč J., Rabatel A., Ramusovic M., Schwaizer G., and Smiraglia C. Glacier shrinkage in the Alps continues unabated as revealed by a new glacier inventory from Sentinel-2 // Earth Syst. Sci. Data, 2020, 12. pp. 1805–1821.
7. Zappa M., Bernhard L., Fundel F., und Jörg-Hess S. Vorhersage und Szenarien von Schnee- und Wasserressourcen im Alpenraum // Forum für Wissen, 2012. 19–27.

Влияние изменения климата и деградации оледенения на речной сток в высокогорной части бассейна р. Терек

Е.Д. Корнилова^{1,2*}, И.Н. Крыленко^{1,2}, Е.П. Рец², Ю.Г. Мотовилов², И.А. Корнева^{3,4},
Т.Н. Постникова (Дымова)¹, О.О. Рыбак^{2,4,5}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

³Институт географии РАН, Москва, Россия

⁴Филиал Института природно-технических систем, Сочи, Россия

⁵ФИЦ «Субтропический научный центр РАН», Сочи, Россия

ekaterina.kornilova.hydro@gmail.com

Аннотация. В данном исследовании была проведена адаптация программного комплекса ECOMAG для моделирования речного стока в высокогорном бассейне р. Терек на основе данных о подстилающей поверхности водосбора (рельефа, почв, растительности) и суточных данных о температуре, дефиците влажности воздуха и осадках. Для учета региональных особенностей был подключен дополнительный блок модели, учитывающий оледенение. По результатам калибровки и верификации модель позволяет с удовлетворительной точностью воспроизвести наблюдаемые гидрографы суточного стока за многолетний период. Также была произведена оценка изменений водных ресурсов в бассейне р. Терек до конца 21 века, для этого были проведены сценарные расчеты стока на основе модели формирования стока ECOMAG с использованием климатических сценариев RCP 2.6 и RCP 8.5 и результатов оценки отступления ледников для аналогичных сценариев на основе гляциологических моделей. Показано, что главным образом, изменение стока в конкретных створах будет зависеть от особенностей зоны ледникового питания и интенсивности деградации оледенения, доли ледникового питания. Значительное влияние на изменения стока также оказывает прогнозируемое в регионе увеличение осадков.

Ключевые слова: горная гидрология, моделирование стока горных рек, модель формирования стока ECOMAG, изменение климата, деградация оледенения.

River flow in the glaciated high-mountainous basin under changing climatic conditions (a case study of the high-mountain part of the Terek River basin)

E.D. Kornilova^{1,2*}, I.N. Krylenko^{1,2}, E.P. Rets², Yu.G. Motovilov², I.A. Korneva^{3,4},
T.N. Postnikova (Dymova)¹, O.O. Rybak^{2,4,5}

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁴Branch of the Institute of Natural and Technical Systems, Sochi, Russia

⁵Federal Research Center the Subtropical Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Sochi, Russia

ekaterina.kornilova.hydro@gmail.com

Abstract. In this study, an adaptation of the software package ECOMAG was conducted to simulate river runoff in the high-mountain basin of the Terek River based on data on the underlying surface of the catchment (topography, soils, vegetation) and daily data

on temperature, air humidity deficit, and precipitation. To account for regional peculiarities, an additional model component incorporating glacier dynamics was included. After calibration and verification, the model was able to reproduce observed daily streamflow hydrographs with satisfactory accuracy over a multi-year period. Furthermore, an assessment of water resource changes in the Terek River basin until the end of the 21st century was conducted. Scenario-based calculations of streamflow were performed using the ECOMAG runoff formation model, incorporating climate scenarios RCP 2.6 and RCP 8.5, as well as glacier retreat estimates for corresponding scenarios. It has been demonstrated that the primary factors influencing changes in runoff in specific reaches are the characteristics of the glacier feeding zone, the intensity of glacial degradation, and the proportion of glacier-fed runoff. Additionally, the projected increase in precipitation in the region has a significant impact on changes in runoff.

Keywords: mountain hydrology, modeling of streamflow in mountainous regions, runoff formation model ECOMAG, climate change, glacier degradation.

Введение

Глобальные изменения климата, в том числе повышение температуры воздуха, могут привести к существенной трансформации природной среды в горных регионах [1; 4]. Особенно это скажется на оледенении [10] и снежном покрове [5], что вызовет значительные изменения водного режима горных рек [6]. Ожидаемым следствием дегляциации является увеличение стока рек за счет усиления таяния. Однако отрицательный баланс массы ледников приводит к уменьшению объема и площади оледенения, что в конечном итоге приводит к уменьшению общего количества талой воды. Таким образом, потепление климата может привести либо к увеличению, либо к уменьшению речного стока, в зависимости от степени отступления ледников [2; 9].

Современные исследования указывают на широкое использование моделей формирования стока для изучения изменений и прогнозирования стока в различных высокогорных бассейнах мира [8]. Эти модели также позволяют оценить возможное климатическое воздействие и сокращение оледенения на изменение стока [2; 3]. Целью данного исследования является оценка изменений водных ресурсов в высокогорном бассейне р. Терек до конца 21 века.

Материалы и методы исследования

В работе используется информационно-моделирующий комплекс (ИМК) ECOMAG (ECOLOGICAL MODEL FOR APPLIED GEOPHYSICS) (автор Ю.Г. Мотовилов) [7] – модель с распределенными параметрами, где поверхность бассейна разделяется на отдельные ландшафтные элементы – элементарные водосборы. Модель описывает основные процессы гидрологического цикла суши: инфильтрацию, испарение, термический и водный режим почв, формирование снежного покрова и снеготаяние, формирование поверхностного, внутрпочвенного, грунтового и речного стока. Исходными данными для модели являются среднесуточные данные о температуре воздуха, осадках и дефиците влажности воздуха, для адаптации модели необходима информация о подстилающей поверхности, включая почвенные и ландшафтные карты.

Для адаптации модели формирования стока к исследуемому бассейну необходимо было провести калибровку и верификацию ее параметров. В качестве базовой метеорологической информации на данном этапе использовались данные метеорологических станций за период 2000 – 2017 гг. Для калибровки и верификации использовались данные четырёх гидрологических постов: р. Баксан - г. Тырнауз, р. Баксан - с. Заюково, р. Чегем – с. Нижний Чегем, р. Малка – с. Каменноостское (Табл.). Результаты расчетов суточного стока признаются хорошими при значениях $NSE > 0.7$ и $BIAS < 10\%$, удовлетворительными – при $NSE > 0.5$ и $BIAS < 15\%$.

Согласно приведенным выше градациям критериев качества NSE и BIAS, получены хорошие и удовлетворительные результаты расчета суточных и среднемесячных гидрографов.

Табл. 1 Результаты калибровки и верификации модели.

Гидрологический пост	Оледенение, %	Площадь водосбора, км ²	Период калибровки 2000–2008гг.			Период верификации 2009–2017 гг.		
			сутки		месяц	сутки		месяц
			NSE	BIAS	R ²	NSE	BIAS	R ²
р. Баксан – г. Тырнауз	17.5	838	0.76	-12.8	0.90	0.74	-10	0.90
р. Баксан – с. Заюково	7.4	2100	0.66	15.2	0.91	0.53	20	0.88
р. Чегем – с. Нижний Чегем	7.3	739	0.73	-12.4	0.84	0.62	-1.7	0.80
р. Малка – с. Каменноостское	3.4	1540	0.42	5.1	0.65	0.48*	5.3*	0.70*

*2009-2014 гг.

Для оценки изменений водных ресурсов в бассейне р. Терек до конца 21 века использовались метеорологические данные для климатических сценариев RCP 2.6 и RCP 8.5 по данным модели CORDEX и результаты оценки отступления ледников для аналогичных сценариев по данным гляциологических моделей GloGEMFlow и HO-model. На их основе разрабатывались схемы усвоения данных климатического и гляциологического моделирования моделью формирования стока ECOMAG (Рис. 1).

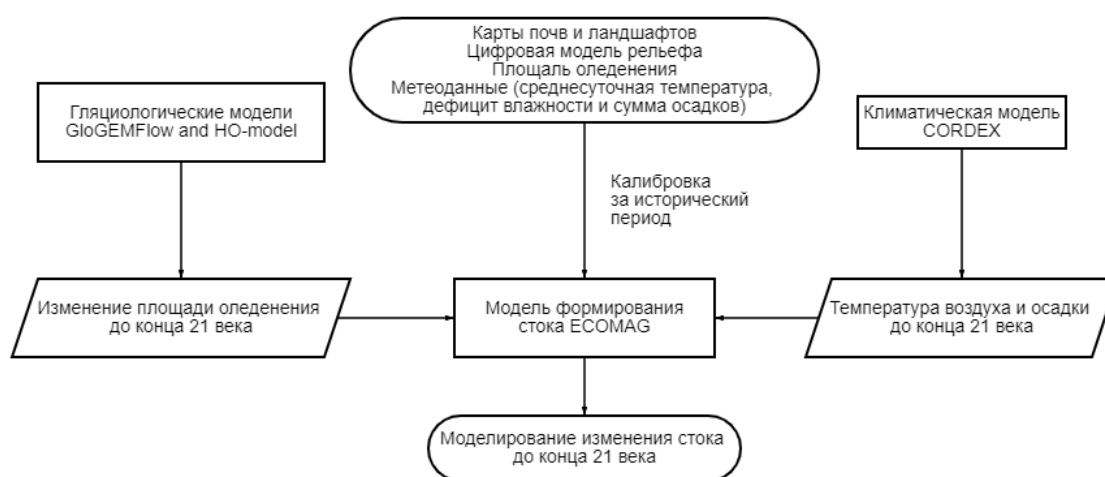


Рис. 1 Схема усвоения данных климатического и гляциологического моделирования моделью формирования стока ECOMAG.

Результаты и выводы

Для прогнозирования изменения стока высокогорной части бассейна реки Терек использовались два сценария RCP – 2.6 («мягкий») и 8.5 («жесткий»). По сравнению с историческим периодом (1977-2005 гг.) среднегодовые температуры на территории

Центрального Кавказа могут повыситься на 2°C к середине 21 века (2040-2069 гг.) и на 4°C к концу 21 века (2070-2099 гг.) при сценарии с высоким уровнем выбросов двуокиси углерода (RCP 8.5). В соответствии с мягким сценарием (RCP 2.6) средняя температура может повыситься на 0,8-1,2 °C в течение 2040-2069 гг. и на 0,8-1,4 °C в течение 2070-2099 гг.

В большинстве случаев ожидается увеличение годовой суммы осадков в середине и конце 21 века. Но в отличие от прогнозируемых тенденций температуры, годовые суммы осадков будут увеличиваться интенсивнее на равнинных территориях и в предгорьях Северного Кавказа. В соответствии со сценарием RCP 2.6 годовая сумма осадков может увеличиться на 15%, а по сценарию RCP 8.5 – на 30 % к концу 21 века.

Согласно результатам гляциологического моделирования, до 2040 г. площадь оледенения будет снижаться с одинаковой интенсивностью по обоим сценариям радиационного форсинга и может уменьшиться на 30% по сравнению с оледенением 1990 г. (Рис. 2). В соответствии со сценарием RCP 2.6 площадь оледенения к 2080 г. уменьшится на 55% и стабилизируется до конца 21 века. Однако по жёсткому сценарию RCP 8.5 площадь оледенения будет снижаться вплоть до конца столетия и уменьшится суммарно на 90%.

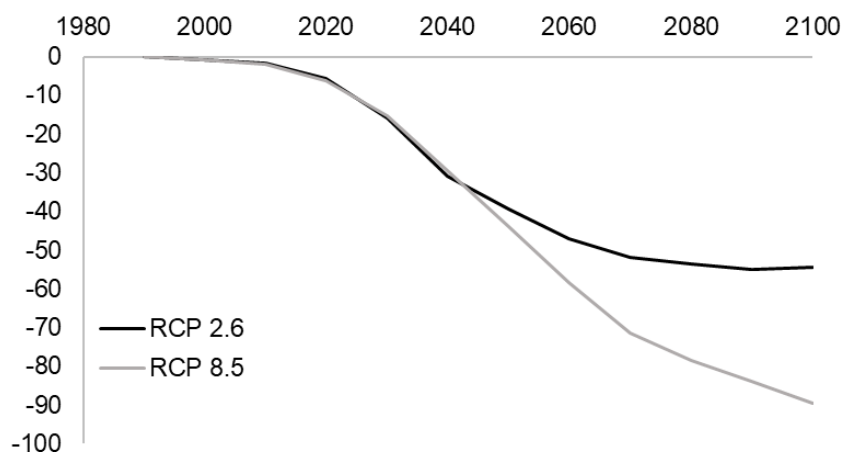


Рис. 2 Прогнозируемое изменение площади оледенения (%) на территории исследуемого бассейна р. Терек для двух сценариев (RCP 2.6 и RCP 8.5).

Для анализа результаты моделирования осреднялись за 30-летние периоды (2006-2039, 2040-2069, 2070-2099), и далее вычислялись аномалии объемов стока относительно аналогичных, смоделированных за базовый исторический период 1977-2005 гг. По результатам моделирования процессов формирования стока с учетом изменения климата и оледенения в 21 в. получено, что при сочетании указанных факторов возможно как снижение, так и увеличение стока в высокогорной зоне в зависимости от степени деградации оледенения (Рис. 3).

Изменение стока в конкретных створах будет зависеть от доли ледникового питания. Значительное влияние на изменения стока оказывает также прогнозируемое увеличение осадков. При сочетании данных факторов на р. Баксан в створе Тырнауз увеличение стока к середине 21в по сценарию RCP 8.5 может составить 25%, для расположенного ниже по течению створа Заюково изменения при аналогичном сценарии составят 15%. Интересно отметить, что в бассейне р. Баксан и р. Малка, где зона питания преимущественно расположена на склонах г. Эльбрус, при более жестком сценарии RCP 8.5 изменения стока несколько больше, чем при сценарии RCP 2.6, что связано со значительным ростом температур при более жестком сценарии и таянии высокогорных многолетних снегов на участках выше современной снеговой линии.

Также стоит отметить, что изменение стока в конкретном створе будет зависеть от особенностей зоны ледникового питания. Например, в пределах водосбора р. Малка, которая питается преимущественно стоком с ледников, расположенных на г. Эльбрус, площадь оледенения по сценарию RCP 8.5 может сократиться к концу столетия на 75%, в то время как в пределах водосбора р. Чегем – практически на 100%. При этом сток р. Чегем снижается на 5% относительно исторического периода, сток р. Малка, наоборот, увеличивается на 20% к концу 21 века. То есть при жестком сценарии значительное увеличение температуры воздуха способствует таянию ледников, расположенных даже на высокогорных территориях, вплоть до полного их исчезновения.

При мягком сценарии RCP 2.6 изменения стока не столь значительны, как при жестком сценарии. Во всех створах наблюдается увеличение стока в период 2006-2039 гг., затем снижение в период 2040-2069 гг. и последующее увеличение до конца 21 века, что также коррелирует с ходом изменения площади оледенения. В период 2006-2039 гг. наблюдается резкое снижение площади оледенения, что вызывает увеличение стока. К середине столетия значительно уменьшается площадь оледенения, в то время как увеличение температуры воздуха не настолько интенсивное, как при жестком сценарии, что приводит к снижению общего количества талой воды. Во второй половине 21 века площадь оледенения при мягком сценарии стабилизируется, при этом температура воздуха продолжает увеличиваться, что приводит к повторной активизации таяния и увеличению стока.

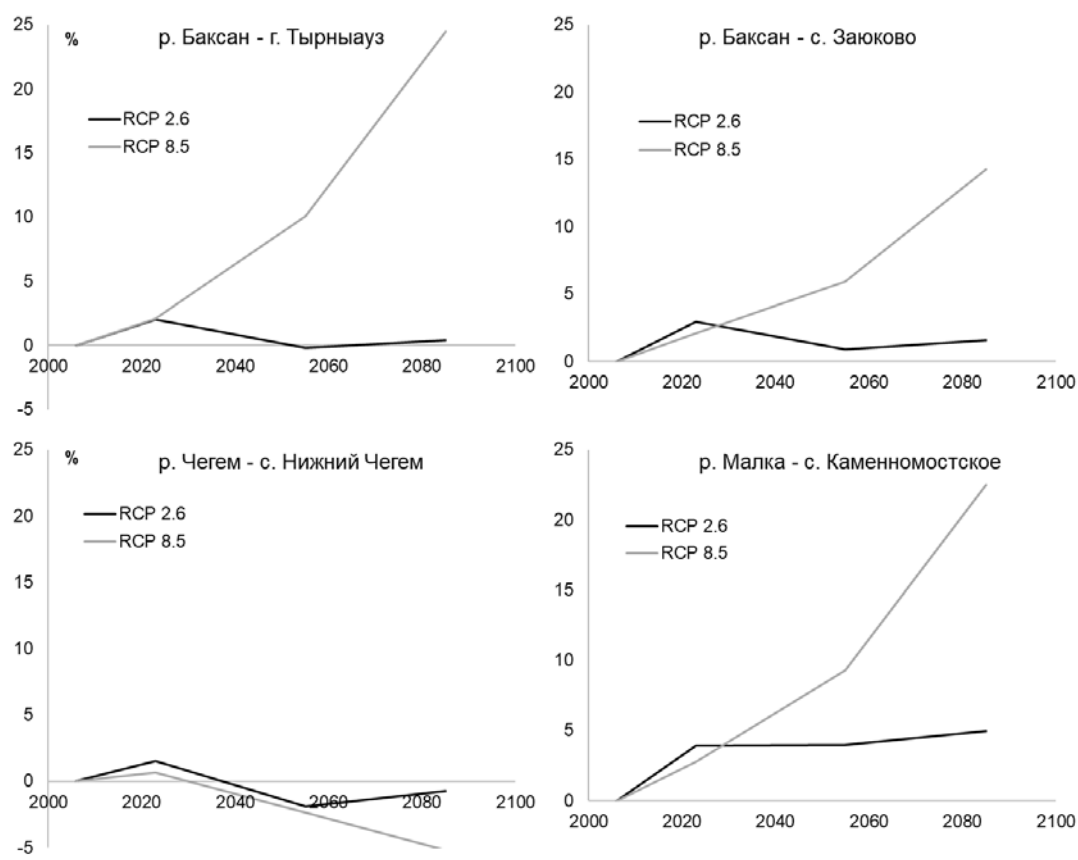


Рис. 3 Аномалии стока (%) при различных климатических сценариях относительно базового исторического периода для различных створов в высокогорной части бассейна р. Терек.

На основе обширной информационной базы (гидрометеорологические данные, карты подстилающей поверхности) разработана модель формирования речного стока

для высокогорной части бассейна р. Терек. Для учета региональных особенностей был подключен дополнительный блок модели, учитывающий оледенение. Модель позволяет с удовлетворительной точностью воспроизвести наблюдаемые гидрографы суточного стока за многолетний период. Разработана схема усвоения моделью ECOMAG результатов гляциологических и климатических моделей и на ее основе проведены сценарные расчеты изменения стока до конца 21 века, необходимые для эффективного управления водными ресурсами.

Благодарности

Авторы выражают благодарность центру по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Кабардино-Балкарской Республики за предоставленную гидрометеорологическую информацию.

Работа выполнена по госзаданию Института водных проблем РАН, тема FMWZ-2022-0001 (1.6 — адаптация модели ECOMAG, 1.12 – расчеты и анализ гидрографов), тема № FMWZ-2022-0003 (3.1 – совершенствование модели), госзаданию кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (раздел I.10 (ЦИТИС 121051400038-1) – параметризация характеристик подстилающей поверхности).

Acknowledgments

The authors thank to the Centre for Hydrometeorology and Environmental Monitoring of the Kabardino-Balkar Republic for providing hydro-meteorological information.

The study was carried out under the Governmental Order to the Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, subject FMWZ-2022-0001 (1.6 – adaptation of the ECOMAG model, 1.12 – calculation and analysis of hydrographs); subject FMWZ-2022-0003 (3.1 – model improvement), Governmental Order to the Chair of Land Hydrology, Faculty of Geography, Moscow State University (section I.10 (Tsitis 121051400038-1) – parameterization of underlying surface characteristics).

Список литературы

1. Adler C., Huggel C., Orlove B., Nolin A. Climate change in the mountain cryosphere: Impacts and responses // *Reg. Environ. Changes*. 2011. № 19, P. 1225–1228.
2. Bliss A., Hock R., Radic V. Global response of glacier runoff to twenty-first century climate change // *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 2014. № 119 (4). P. 717–730.
3. Huss M., Fischer M. Sensitivity of very small glaciers in the Swiss Alps to future climate change // *Frontiers in Earth Science*. 2016. № 4. P. 34.
4. Jones J.A. Hydrologic responses to climate change: Considering geographic context and alternative hypotheses // *Hydrol Process*. 2011. № 25. P. 1996–2000.
5. Lüthi S. et al. Projections of alpine snow-cover in a high-resolution climate simulation // *Atmosphere*. 2019. № 10. P. 463.
6. Milner A.M., Khamis K., Battin T.J. et al. Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems // *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2017. № 114(37). P. 9770–9778.
7. Motovilov Y.G., Gottschalk L., Engeland K., Belokurov A. ECOMAG—Regional Model of Hydrological Cycle. Application to the NOPEX Region, 1999. 88 p.
8. Omani N., Srinivasan R., Karthikeyan R., Smith P. Hydrological modeling of highly glacierized basins (Andes, Alps, and Central Asia) // *Water*. 2017. № 9(2). P. 111.
9. Pellicciotti F., Bauder A., Parola M. Effect of glaciers on streamflow trends in the Swiss Alps // *Water Resour. Res.* 2010. № 46 (10).
10. Rafq M., Mishra A. Investigating changes in Himalayan glacier in warming environment: A case study of Kolahoi glacier // *Environ. Earth Sci.* 2016. № 75. P. 1–9.
11. Rahman K., Maringanti C., Beniston M. Widmer F., Abbaspour K., Lehmann A. Streamflow modeling in a highly managed mountainous glacier watershed using SWAT: the Upper Rhone River watershed case in Switzerland // *Water resources management*. 2013. № 27 (2). P. 323–339.

Загрязнение водных объектов в бассейне Дона сточными и возвратными водами и диффузным стоком с водосборов

Н.И. Коронкевич¹, Г.М. Черногаева^{1,2}, С.В. Долгов¹, Е.А. Барабанова¹, Е.А. Кашутина¹

¹*Институт географии РАН, г. Москва, Россия*

²*Институт глобального климата и экологии им. Ю.А. Израэля, г. Москва, Россия
koronkevich@igras.ru*

Аннотация. Рассматривается вклад в загрязнение вод в бассейне Дона сточных и возвратных вод и диффузного стока по величине их ежегодного объема за три десятилетия – 1981–1990 (период наибольшего антропогенного воздействия на водные ресурсы), 1995–2004 (период наибольшего снижения антропогенного воздействия на водные ресурсы) и современный период (2011–2020 гг.). Сделан вывод, что диффузное загрязнение, поступающее в реки и водоемы с сельскохозяйственных угодий и урбанизированных территорий, соизмеримо с загрязнением, вносимым сточными и возвратными водами, причем со временем возрастает вклад в диффузное загрязнение стока с урбанизированных площадей. Кратность разбавления всех антропогенно измененных вод речной водой недостаточна, что является косвенным показателем загрязненности вод в бассейне Дона.

Ключевые слова: объем сточных и возвратных вод, диффузный сток с урбанизированных площадей и пахотных угодий, речной сток, загрязнение, кратность разбавления.

Pollution of water bodies in the Don River basin by sewage, return waters and diffuse runoff from catchments

N.I. Koronkevich¹, G.M. Chernogaeva^{1,2}, S.V. Dolgov¹, E.A. Barabanova¹, E.A. Kashutina¹

¹*Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences*

²*Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology
koronkevich@igras.ru*

Abstract. The contribution of wastewater, return water and diffuse runoff to water pollution in the Don basin is considered in terms of their annual volume over three decades – 1981–1990 (the period of the highest anthropogenic impact on water resources), 1995–2004 (the period when the anthropogenic impact on water resources was maximally reduced) and the modern period (2011–2020). It is concluded that diffuse pollution running into the rivers and reservoirs from agricultural lands and urbanized territories is comparable to the pollution that comes with sewage and return waters, and over time the contribution to diffuse pollution of runoff from urbanized areas increases. The multiplicity of dilution of all anthropogenically modified waters by river water is insufficient, which is an indirect indicator of water pollution in the Don basin.

Keywords: waste and return water, runoff from urbanized areas and arable land, multiplicity of dilution.

Воды Дона и большинства его притоков давно уже загрязнены. В последние десятилетия, несмотря на сокращение объема сточных и возвратных вод с орошаемых земель (коллекторно-дренажных вод), качество воды р. Дон, согласно [11], характеризуется в диапазоне от «слабо загрязненной» до «грязной» ниже Ростова. Очевидна роль в этом сточных и возвратных вод, причем не только официально относимых к загрязненным, но и так называемых условно чистых, очищенных,

требующих разбавления речной водой, поскольку они тоже содержат загрязняющие вещества, хотя, конечно, их концентрация значительно ниже. Гораздо меньшее внимание уделяется диффузному загрязнению рек и водоемов, которое может быть соизмеримо с загрязнением сточными и возвратными водами или даже превосходит его, как это показано на примере бассейна Волги [4]. Наши полевые исследования в последние годы подтвердили, что диффузное загрязнение, особенно формирующиеся на урбанизированных территориях, существенно и в бассейне Дона. Так, концентрация минерального азота в водах поверхностного стока в городах составляет в среднем около 3 мг/л, а фосфора 0,6 мг/л. Довольно высокое содержание этих биогенов (соответственно 2,2 и 0,5 мг/л) характерно и для вод, стекающих с полей, распаханых с осени (с зяби). Имеются биогены и в стоке с других сельскохозяйственных угодий. К сожалению, мы не располагаем данными о выносе загрязняющих веществ как со сточными и возвратными водами, так и особенно с диффузным стоком с водосборов за длительный период времени. Поэтому попытаемся дать косвенную оценку вклада в загрязнение вод бассейна Дона сточных и возвратных вод, а также диффузного поверхностного стока, то есть антропогенно измененных вод, по величине их годового объема за три десятилетия – 1981–1990 (период наибольшего антропогенного воздействия на водные ресурсы), 1995–2004 (период наибольшего снижения антропогенного воздействия на водные ресурсы) и современный период (2011–2020 гг.).

Данные об объеме сточных и возвратных вод почерпнуты из ежегодников Государственного водного кадастра (Государственный..., 1982–2018) [3], справочников «Водные ресурсы и водное хозяйство России» (2006–2018) [2], «Использование и охрана водных ресурсов в СССР» (1983) [6], литературных источников.

Сток с пахотных угодий, формирующийся в основном в период половодья, рассчитан по данным воднобалансовых станций [8; 1; 5; 7] с учетом соотношения площадей, занятых зяблевой (осенней) вспашкой и полями нераспаханными с осени, сток с которых заметно (до двух и более раз) выше чем с зяби. Сток с урбанизированных площадей, которые в бассейне Дона занимают примерно 2%, рассчитывался отдельно для холодного сезона, включая половодье на водосборе (ноябрь–март), и теплого сезона года (апрель–октябрь) с учетом атмосферных осадков, определенных для этих сезонов, и коэффициентов стока с этих площадей. Осадки находились по данным восьми метеорологических станций, расположенных в бассейне Дона и вблизи от него. При этом учтено, что до начала половодья на урбанизированных территориях остается примерно половина выпавших в холодный сезон года осадков. Коэффициенты стока с этих территорий определены по результатам экспериментальных исследований в г. Курске, расположенном недалеко от бассейна Дона. Они приняты согласно М.И. Львовичу [10], Е.П. Чернышеву (1983) за половодье в размере 0,6, а для теплого сезона года 0,1.

Более детально методика определения величины осадков, диффузного стока, а также объема сточных и возвратных вод представлена в работе [9].

Как видно из Табл. 1, последний период (2011–2020 гг.) отличался наименьшим количеством осадков, что в значительной мере, наряду с повышенной температурой воздуха, особенно в зимний период, определило пониженную величину стока Дона этого периода.

В Табл. 2 приведены результаты расчетов за рассматриваемые периоды годового стока Дона и объема антропогенно измененных вод в его бассейне, а также кратности их разбавления речным стоком.

Из анализа Табл. 2 следует, что в целом последнее десятилетие характеризуется пониженными величинами стока Дона, диффузного стока и сброса сточных и возвратных вод, в том числе официально считающихся «загрязненными». Если снижение диффузного стока, как и в целом стока Дона, обусловлено в основном климатическими факторами, то уменьшение объема сточных и возвратных вод объясняется кризисными явлениями в экономике после распада СССР и отчасти осуществлением водоохранных мероприятий.

Если в 1981–1990 гг. величина диффузного стока составляла 63% от величины сточных и возвратных вод, в 1995–2004 – 84%, то в последнее десятилетие она снизилась до 30%. Вместе с тем, в диффузном стоке резко возросла с 18 до почти 70% доля стока с урбанизированных площадей.

Табл. 1 Атмосферные осадки в бассейне Дона, мм.

Сезон	Периоды		
	1981–1990 гг.	1995–2004 гг.	2011–2020 гг.
Ноябрь-март	229	234	209
Апрель-октябрь	336	350	319
Итого за год	565	583	527

Табл. 2 Сток Дона, объем антропогенно измененных вод в его бассейне и кратность их разбавления.

Показатели	Периоды		
	1981–1990 гг.	1995–2004 гг.	2011–2020 гг.
Годовой сток, км ³ /год	20,7	22,1	14,7
Поверхностный сток с сельскохозяйственных угодий, км ³ /год	5,8	3,9	0,5
Поверхностный сток с урбанизированных территорий, км ³ /год	1,3	1,5	1,3
Общий объем антропогенно измененного поверхностного стока, км ³ /год	7,1	5,4	1,8
Сброс сточных и возвратных вод, км ³ /год в том числе «загрязненных»	11,2 1,2	6,4 1,1	6,0 0,8
Общее количество антропогенно измененных вод, км ³ /год	18,3	11,8	7,8
Кратность разбавления «загрязненных» сточных и возвратных вод	17,2	20,1	18,4
Кратность разбавления общего количества антропогенно измененных вод	1,1	1,9	1,9
Кратность разбавления «загрязненных» сточных и возвратных вод и поверхностного диффузного стока	2,5	3,4	5,7

По сравнению с периодом наибольшего антропогенного воздействия на водные ресурсы (1981–1990 гг.) в 2011–2020 гг. возросла общая кратность разбавления антропогенно измененных вод, несмотря на пониженный сток Дона. Однако ее все равно следует считать явно недостаточной, что довольно очевидно свидетельствует о загрязненности Дона.

Без детального расчета состава и объема загрязняющих веществ трудно очень точно оценить вклад диффузного стока в общее загрязнение вод в бассейне Дона, но во всяком случае можно полагать, что оно вполне соизмеримо с тем вкладом, который вносят сточные и возвратные воды. Необходимым условием более точного суждения об этом является организация мониторинга диффузного загрязнения рек и водоемов, причем не только поверхностным стоком с водосборов, но и подземным, который, как показывают отрывочные данные, начинает играть все большую роль в связи с изменением климата и существенно улучшившимися условиями инфильтрации в почву и грунты атмосферных осадков.

Список литературы

1. Барабанов А.Т., Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Панов В.И., Петелько А.И. Поверхностный сток и инфильтрация в почву талых вод на пашне в лесостепной и степной зонах Восточно-Европейской равнины. – Почвоведение. – 2018. – № 1. – С. 74–81.
2. Водные ресурсы и водное хозяйство России. Ежегодный статистический сборник за 2006–2018 гг. / Под редакцией Н.Г. Рыбальского и А.Д. Думнова. – М.: НИИ-Природа.
3. Государственный водный кадастр Российской Федерации. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. Ежегодное издание. 1982–2018 гг.
4. Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения / Научный руководитель издания: В.И. Данилов-Данильян. – Москва, Российская академия наук, Институт водных проблем РАН, 2020. 512 с.
5. Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А. Ландшафтно-гидрологические изменения в бассейне Дона. – Водные ресурсы. – 2020. – Т. 47. – № 6. – С. 674–685.
6. Использование и охрана водных ресурсов в СССР. Выпуск 4. Анализ данных государственного учета использования вод за 1982 г. – Минск: ЦНИИКИВР, 1983. 267 с.
7. Кашутина Е.А., Ясинский С.В., Коронкевич Н.И. Весенний поверхностный склоновый сток на Русской равнине в годы различной водности. – Изв. РАН. Сер. геогр. – 2020. – № 1. – С. 37–46.
8. Коронкевич Н.И. Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. – М.: Наука, 1990. 205 с.
9. Коронкевич Н.И., Черногаева Г.М., Долгов С.В., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А., Лукьянов К.В. Антропогенно-измененные воды, поступающие в водные объекты в бассейне Дона // Метеорология и гидрология. – 2023. – № 6. – С. 74–82. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-6-74-82
10. Львович М.И., Чернышев Е.П. Водный баланс и вещественный обмен в условиях города. – Изв. АН СССР, сер. географ. – 1983. – № 3. – С. 34–48.
11. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2020 год. / Под ред. Г.М. Черногаевой. – М.: Росгидромет, 2021. 204 с.

Деление расхода воды по рукавам при разветвлении русла в лабораторных условиях

Е.М. Кривошеина*, И.В. Вахрушев*, Н.А. Саноцкая

*Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург
minilore1809@gmail.com*

Аннотация. В данной работе были рассмотрены различные способы вычисления расхода воды по рукавам каналов, а также был выполнен анализ полученных результатов. В ходе работы были произведены расчеты деления расхода воды по эмпирическим данным и теоретическим формулам с последующим сравнением результатов. Данная работа позволит провести сравнение и анализ методов расчетов расходов воды по рукавам, что поспособствует более детальному изучению моделирования речных потоков. В результате проведенной работы можно сделать вывод о том, что теоретические результаты сильно зависят от введенных характеристик, в особенности от уклона дна и шероховатости поверхности канала. СП и СНиПы не могут в полной мере предоставить данные для достижения максимальной точности расчетов. Мы рекомендуем использовать лабораторные модели для расчета деления расхода воды по рукавам при разветвлении русла.

Ключевые слова: разветвление русла, формула Шези, формула Маннинга, моделирование речных потоков.

Division of water flow along the sleeves in a branching channel in laboratory conditions

E.M. Krivosheina*, I.V. Vakhrushev*, N.A. Sanotskaya

*Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg
minilore1809@gmail.com*

Abstract. In this paper, various methods of calculating the water flow through the channel sleeves were considered, and the results were analyzed. The division of water consumption was calculated according to empirical data and theoretical formulas, then the results were compared. This work will allow to compare and analyze methods for calculating water flow rates along the sleeves, which will contribute to a more detailed study of river flow modeling. It was shown that the theoretical results strongly depend on the introduced characteristics, especially on the slope of the bottom and the roughness of the channel surface. Rule books and building standards cannot fully provide data to achieve the highest possible accuracy of calculations. We recommend using laboratory models to calculate the division of water flow along the arms in a branching channel.

Keywords: branching channel, Shezi formula, Manning formula, river flow modeling.

Введение

В гидрологии разветвление русла имеет огромное влияние на распределение расходов воды в оросительных и мелиоративных системах. Распределение расхода по рукавам также зависит от пропускной способности рукавов, уклонов в узлах их разделения и материалов складывающих стенки каналов. Насколько нам известно, влияние разветвления русла на распределения расходов воды еще не было до конца исследовано. Разработке методов расчета водного и руслового режима в русловых разветвлениях уделяется постоянное внимание [1].

Объектом исследования данной работы являются уровни воды, а предметом исследования - деление расхода воды по рукавам при разветвлении русла.

В ходе работы были поставлены следующие задачи:

- Расчет деления расхода воды по эмпирическим данным;
- Расчет деления расхода воды по теоретическим формулам;
- Сравнение полученных результатов.

Материалы и методы исследования

Исходными данными (Табл. 1) для этой работы являются такие характеристики, как: уровни воды, ширина канала, скорости на заданных створах на лабораторной установке (Рис. 1).

Подготовка данных для расчета производилась при помощи системы MS Office Excel. В процессе был написан макрос для автоматизированного расчета массива данных, включающих в себя площадь живого сечения и расходы воды.

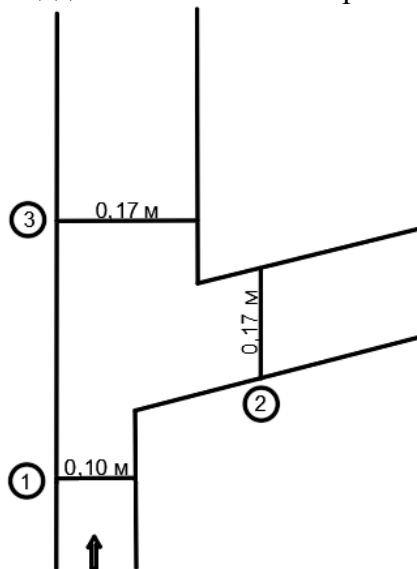


Рис. 1 Схема исследуемой модели.

Как было заявлено ранее, расчет расходов воды производился двумя способами: эмпирическим и теоретическим.

Для эмпирического расчета была построена модель (Рис. 1) на специальной установке, имитирующей разветвляющийся канал, где были сняты уровни воды с помощью шпигел-масштаба, ширина русла рулеткой, а также скорости течения микровертушкой во всех трех створах. Далее были посчитаны расходы воды по формуле [2]:

$$Q = \omega V \quad (1)$$

Для расчета теоретического расхода воды использовался графо-аналитический способ. Он состоит из трех частей:

- 1) Определение расхода воды в канале при разных уровнях воды. Для этого использовалась формула Шези:

$$Q = \omega C \sqrt{Ri} \quad (2)$$

Где C – коэффициент Шези, рассчитанный по формуле Маннинга:

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}, \quad (3)$$

R – гидравлический радиус, i – уклон дна. Коэффициенты брались из гидрологического справочника ($n=0,012$ для стенок, $n=0,014$ для дна), а затем считалась приведенная шероховатость по формуле:

$$n_{пр} = \sqrt{\frac{x_1 n_1^2 + x_2 n_2^2}{x_1 + x_2}} \quad (4)$$

где n_1 и n_2 – шероховатости стенок и дна, а x_1 и x_2 – смоченные периметры соответствующих поверхностей [3].

- 2) Построение графиков зависимости $Q = f(H)$ по данным уровней воды и соответствующих им расходов воды для каждого створа.
- 3) Снятие данных с графика. Для этого проводится перпендикуляр от оси H на необходимом нам уровне воды на неразветвленном участке (в нашем случае это уровень воды при Q_1 эмпирическом). Эта прямая пересекает графики зависимости $Q = f(H)$ всех трех створов. Из точек пересечения проводятся перпендикуляры к оси Q , таким образом получая теоретические значения расхода воды на всех трех створах.

Результаты и выводы

По итогу исследования были получены следующие результаты и записаны в Табл. 1. По Табл. 1 строится график зависимости $Q = f(H)$ по данным уровней воды и соответствующих им расходов воды для каждого створа (Рис. 2).

Табл. 1 Измеренные и рассчитанные данные расходов воды на створах исследуемой модели.

№ створа	H, м	b, м	w, м ²	V, м/с	Q, м ³ /с
1	0.033	0.10	0.0033	1.89	0.0062
2	0.031	0.17	0.0053	0.522	0.0028
3	0.036	0.17	0.0061	0.515	0.0032

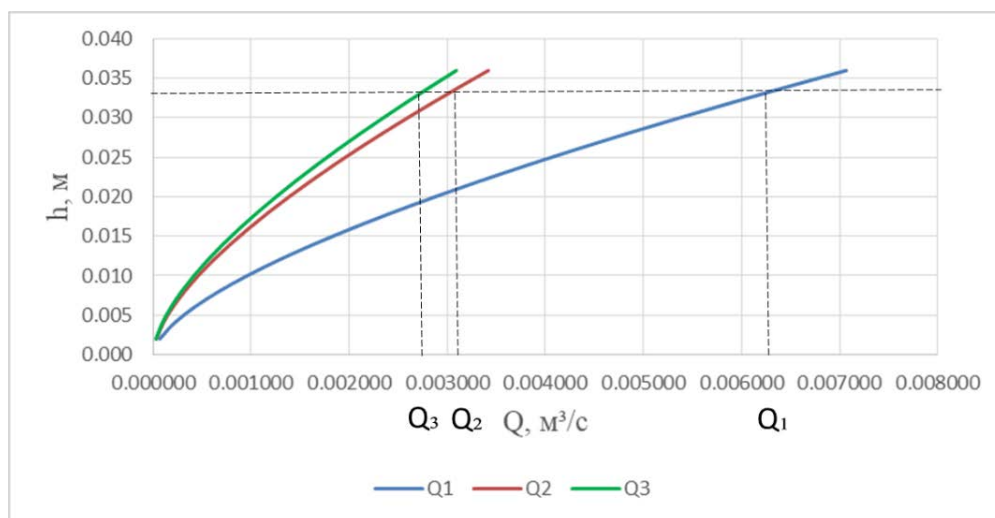


Рис. 2 Графики зависимости $Q = f(H)$ по данным уровней воды и соответствующих им расходов воды для каждого створа.

На Рис. 2 изображен график зависимости расхода воды от уровня в створе. Видно, что распределение расходов по рукавам происходит не в равном количестве, а также сумма расходов воды на створах после разделения канала меньше, чем расход воды в начальном створе. Это говорит нам о том, что модель не идеальна и присутствуют потери воды, и, следовательно, можно сделать вывод, что необходимо более качественно подбирать параметры модели. Полученные результаты записываются в Табл. 2.

Табл. 2 Рассчитанные данные теоретических расходов воды.

	Q ₁ теор	Q ₂ теор	Q ₃ теор
Q, м ³ /с	0.0062	0.0027	0.0031
%	100	44	50

Полученные расходы воды по результатам теоретических расчетов и на основе эмпирических данных из Табл. 1 и 2 записываются в Табл. 3.

Табл. 3 Результаты сравнения полученных расходов воды по результатам теоретических расчетов и на основе эмпирических данных.

	Q эмпир	Q теор	%
Q ₁ , м ³ /с	0.0062	0.0062	99.3
Q ₂ , м ³ /с	0.0028	0.0027	99.1
Q ₃ , м ³ /с	0.0032	0.0031	98.1

В Табл. 3 представлены результаты сравнения полученных расходов воды по результатам теоретических расчетов и на основе эмпирических данных. Видно, что относительная погрешность теоретических расчетов от расчетов на основе эмпирических данных отличаются не более чем на 2%. Это говорит нам о том, что при правильном подборе характеристик теоретические расчеты имеют высокую точность.

В ходе выполнения работы был произведена оценка точности теоретических формул для расчета деления расхода воды по рукавам при разветвлении русла в лабораторных условиях

В результате проведенной работы можно сделать вывод о том, что теоретические результаты сильно зависят от введенных характеристик, в особенности от уклона дна и шероховатости поверхности канала. СП и СНиПы не могут в полной мере предоставить данные для достижения максимальной точности расчетов. Мы рекомендуем использовать лабораторные модели для расчета деления расхода воды по рукавам при разветвлении русла.

Список литературы

1. Алабян А.М., Сидорчук А.Ю. Метод расчета переформирований русел, разветвленных на рукава рек, при изменении гидрологического режима // Метеорология и гидрология. 1987
2. Спицын И.П., Соколова В.А. Общая и речная гидравлика. – 1990 – Гидрометиздат
3. Киселев П.Г. Справочник по гидрологическим расчетам. – 1957 – Госэнергоиздат

Опыт расчёта притока талой воды к озеру Лоу (оазис Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида)

М.Р. Кузнецова^{1,2*}, Г.В. Пряхина²

¹Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия
rotefliege@mail.ru

Аннотация. Дефицит данных натуральных гидрологических наблюдений в антарктическом регионе при необходимости решения научных и прикладных задач обуславливает актуальность рассмотрения расчётных методов применительно к процессам и объектам данных территорий. В настоящей работе представлен алгоритм расчёта притока талой воды к озеру Лоу, расположенному в оазисе Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида). Используются материалы полевых работ, полученные в периоды сезонных работ Российской Антарктической экспедиции (РАЭ) в 2019/2020 гг. (65-я РАЭ) и 2021-2022 гг. (67-я РАЭ): изменения уровня воды, снегомерные съёмки; а также данные метеорологических измерений станции Прогресс. Исходя из наличия данных, были выбраны следующие расчётные периоды 01.12.2019–29.02.2020, 24.11.2021–22.02.2022. Входными данными являются распределение запасов воды в снегу на водосборе, метеорологическая информация. Водосбор разбивается сеткой квадратов, в центре которых назначаются расчётные точки. На первом этапе рассчитываются альbedo снега, слои таяния и испарения; затем для каждой расчётной точки рассчитывается водоотдача. Поступление воды по грунту предполагает инфильтрацию и задержку стока в грунте. Для оценки адекватности полученных объёмов притока талой воды к озеру рассчитан ход уровня воды на основе уравнения водного баланса. Рассчитанный график хода уровня сопоставлен с данными уровенных измерений. Результат признан удовлетворительным; коэффициент корреляции составляет 0.98 для сезона 2019/2020 и 0.95 для сезона 2021/2022 гг.

Ключевые слова: моделирование талого притока, уровень воды озера, антарктические оазисы, снежники.

Experience in calculating of the meltwater inflow to Low Lake (the Larsemann Hills, East Antarctica)

M.R. Kuznetsova^{1,2}, G.V. Pryakhina²

¹Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

²St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia
rotefliege@mail.ru

Abstract. The lack of hydrological in situ data in the Antarctic region and the need to solve scientific and applied tasks make the consideration of calculation methods relevant to the processes and objects of these territories topical. This paper presents an algorithm for calculating the meltwater inflow to Low Lake which is located in the Larsemann Hills (East Antarctica). Used data are field materials obtained during seasonal Russian Antarctic expedition (RAE) in 2019/2020 (the 65th RAE) and 2021-2022 (the 67th RAE): water level changes, snow-measuring imagery, and meteorological data from Progress station. Based on the availability of data, the calculation periods are 01.12.2019–29.02.2020, 24.11.2021–

22.02.2022. Input data are water content distribution in the snow on the catchment, meteorological information. The catchment is divided by a grid of squares; calculation points are assigned in centers of squares. In the first stage, the snow albedo, layers of melting and evaporation are calculated; then the water return is calculated for each calculation point. The entry of water on the ground implies infiltration and time delay of the inflow. In order to assess the adequacy of the obtained graphs of meltwater inflow, the lake water level was calculated based on the water balance equation. The calculated lake water level graph is compared with measured data. The result is satisfactory; the correlation ratio is 0.98 for the 2019/2020 and 0.95 for the 2021/2022.

Keywords: modelling of meltwater inflow, lake water level, Antarctic oases, snowfields.

Введение

Необходимость получения информации о гидрологических процессах и объектах антарктических оазисов возникает при организации научных исследований (гидробиологических работах, экологических оценках и др.) и решении ряда прикладных задач (организация забора воды, мониторинг прорывоопасности озёр). В условиях труднодоступности региона, актуальным является применение расчётных методов. Целью настоящей работы является разработка алгоритма расчёта притока талой воды к антарктическому водоёму. Внимание именно к этому процессу обусловлено тем, что поступление талой воды со снежников является одним из основных элементов приходной части водного баланса озёр [2].

Материалы и методы

Применение расчётной модели показано на примере озера Лоу (оазис Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида; Рис. 1).

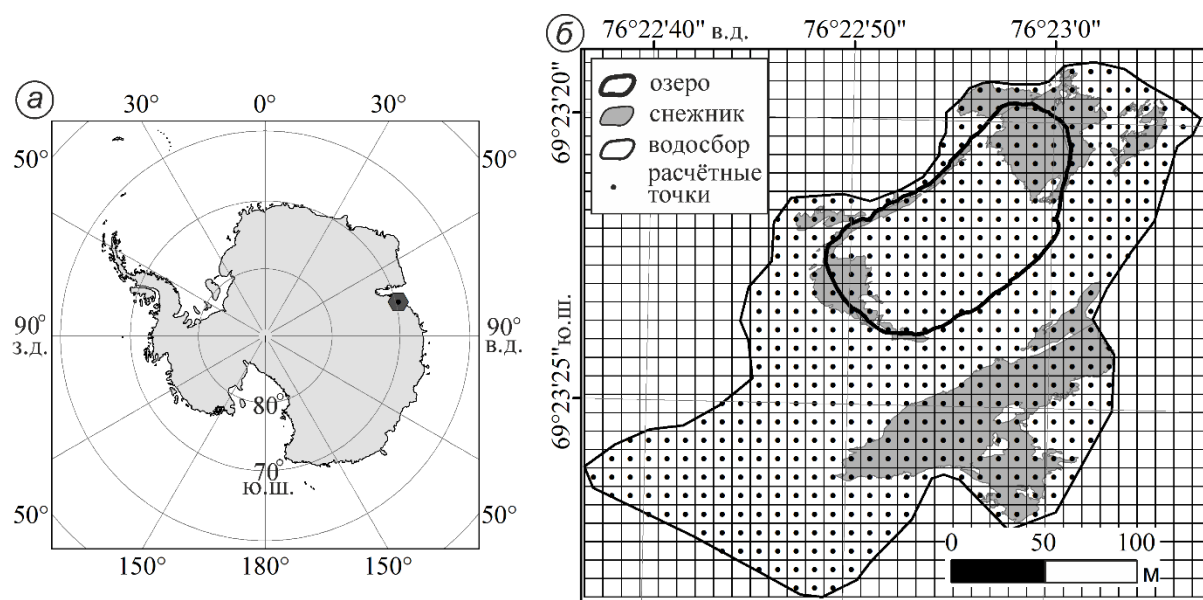


Рис. 1 Объект исследования. а – расположение оазиса Холмы Ларсеманн, б – схематизация водосбора озера Лоу.

Материалами для работы стали полевые данные, полученные в периоды сезонных работ Российской Антарктической экспедиции (РАЭ) в 2019/2020 гг. (65-я РАЭ) и 2021/2022 гг. (67-я РАЭ) – материалы мониторинговых измерений уровня воды озера Лоу, снегомерных съёмок на водосборе; также задействованы данные метеорологических измерений на станции Прогресс.

Основные изменения водности происходят в тёплый период года [3]; с учётом продолжительности наблюдений были выбраны расчётные периоды: 01.12.2019–29.02.2020 и 24.11.2021–22.02.2022. Входной информацией являются метеорологические данные и распределение запасов воды в снегу на водосборе. Шаг расчёта равен 1 суткам.

Алгоритм расчёта предполагает несколько этапов. На первом этапе за сезонный (выбранный расчётный) период рассчитываются альbedo снега (согласно подходу Rohrer M.B. и Braun L.N., 1994) [8], слои таяния и испарения снега (формулы Кузьмина П.П., 1961) [4]. Водосбор разбивается сеткой квадратов, в каждом из которых находится расчётная точка. Затем для каждой расчётной точки рассчитывается водоотдача (по алгоритму Жидиков А.П., Нечаева Н.С., 1982) [1]. Принимая время добегающего порядка 24 м/сут [6], точки объединяются в группы относительно расстояния до края снежника, рассчитывается поступление воды со снежника на водосбор. Поступление воды по грунту предполагает инфильтрацию и задержку стока в грунте; для чего предложен алгоритм, учитывающий величины максимальной и минимальной влагоёмкостей; последние приняты по [5].

Для оценки адекватности результатов рассчитан ход уровня воды на основе уравнения водного баланса: элементами приходной части являются талый приток и выпадающие на акваторию осадки (по данным метеостанции Прогресс), расходной части – испарение с акватории (использована формула ГГИ) [7], степень покрытия льдом акватории оценена по данным фактических измерений. Выполнено сравнение с данными натурных наблюдений за уровнем воды.

Результаты и выводы

Получены удовлетворительные результаты расчета (Рис. 2): коэффициент корреляции характеризуется как сильный и составляет 0.98 для сезона 2019/2020 гг. и 0.95 для сезона 2021/2022 гг. Таким образом, предлагаемый расчётный алгоритм расчёта притока талой воды к бессточному антарктическому водоёму на данном (начальном) этапе показал адекватные результаты. Предполагается продолжение работы, апробация на других объектах оазиса за разные годы, проработка отдельных шагов алгоритма, в том числе решение вопроса назначения входной информации – распределения снега на водосборе, на данном этапе задаваемого по данным снегомерных съёмов.

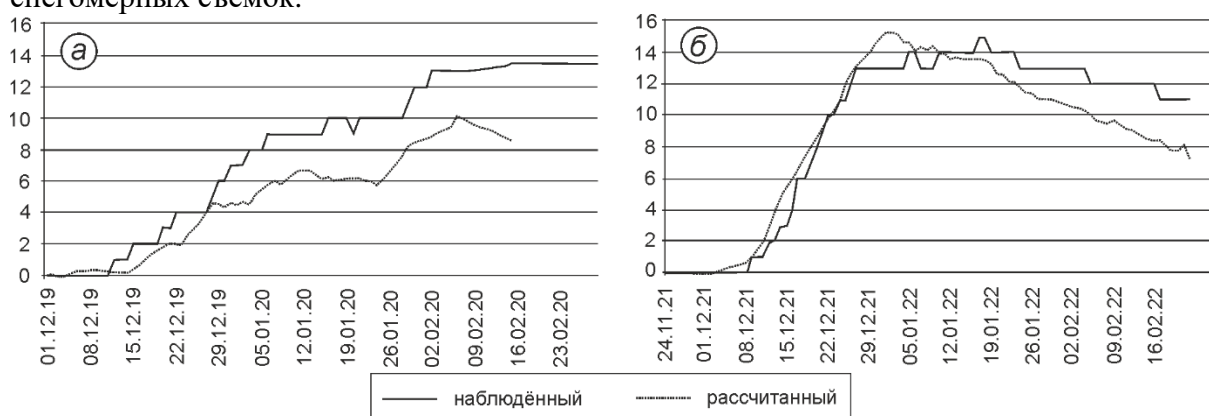


Рис. 2 Результаты расчёта хода уровня воды с использованием алгоритма расчёта притока. а – сезон 2019/2020 гг., б – сезон 2021/2022 гг.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Российской Антарктической Экспедиции за возможность участия в полевых работах, а также коллегам по экспедициям за предоставленные материалы и содействие при проведении полевых работ.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to the Russian Antarctic Expedition for the opportunity to participate in the field works, as well as to colleagues on expeditions for the materials provided and assistance in the field works.

Список литературы

1. Жидиков А.П., Нечаева Н.С. Методические указания по разработке схем краткосрочных прогнозов расходов воды рек и притока воды в водохранилища в период половодья на основе моделей талого стока (на примере бассейна р. Волги). Под ред. Бела В.А. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 66 с.
2. Кузнецова М.Р., Пряхина Г.В. Водный баланс озёр оазиса холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида) // Природная среда Антарктики: междисциплинарные подходы к изучению: Сборник материалов IV-й Международной научно-практической конференции, посвященной 15-летию Государственного учреждения «Республиканский центр полярных исследований», Домжерицы, 21–23 сентября 2022 года, Минск: Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», 2022. С. 173-176.
3. Кузнецова М.Р., Пряхина Г.В., Григорьева С.Д., Киньябаева Э.Р. Факторы формирования поверхностного притока к озерам антарктического оазиса Холмы Ларсеманн // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 3. С. 293–309. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-293-309>.
4. Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 345 с.
5. Мергелов Н.С. Почвы влажных долин в оазисах Ларсеманн и Вестфолль (Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида) // Почвоведение. № 9. 2014. С. 1027–1045.
6. Рихтер Г.Д. Снежный покров, его формирование и свойства. Изд-во Академии наук СССР, 1945. 120 с.
7. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Глав. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. М-во энергетики и электрификации СССР. М-во мелиорации и водного хоз-ва СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 84 с.
8. Rohrer M.B., Braun L.N. Long-Term Records of Snow Cover Water Equivalent in the Swiss Alps // Nordic Hydrology. № 25. 1994. 65-78 pp.

Внезапные ливневые паводки на Черноморском побережье Западного Кавказа и Крыма

Л.В. Куксина^{1*}, В.Н. Голосов^{1,2}, П.А. Белякова³, Е.Ю. Жданова¹, М.М. Иванов^{1,2},
А.С. Цыпленков¹, А.Л. Гуринов²

¹Московский государственный университет, г. Москва, Россия

²Институт географии РАН, г. Москва, Россия

³Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия
ludmilakuksina@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены основные факторы формирования и развития внезапных ливневых паводков (ВЛП), происходивших в 1990–2021 гг. в малых речных бассейнах Черноморского побережья Кавказа (ЧПК) и Крыма. Показано, что главная причина формирования ВЛП – выпадение осадков редкой повторяемости, однако в некоторых случаях формирование ВЛП определяется сочетанием ряда параметров, не достигших критических значений. Параметры рельефа (вытянутая конфигурация речных бассейнов, значительные уклоны) зачастую способствуют быстрой концентрации стока в бассейне. Установлено, что формирование ВЛП в речных бассейнах исследуемого региона происходит в летне-осенний период с максимумом зафиксированных случаев в августе. Описанные события характеризуются крайне высокими скоростями роста уровней воды (1.2–1.3 м/ч), а сток наносов за одно событие может быть сопоставим со среднегодовыми значениями. На основе статистического анализа данных продолжительных рядов наблюдений за осадками сделано предположение о более частом возникновении ВЛП на ЧПК и в Крыму в сравнении с количеством зафиксированных и описанных случаев.

Ключевые слова: внезапный ливневый паводок (ВЛП), осадки, повторяемость, интенсивность, малый речной бассейн, Черноморское побережье, Крым, Кавказ.

Flash floods in the Black Sea Coast of the Western Caucasus and Crimea

L.V. Kuksina^{1*}, V.N. Golosov^{1,2}, P.A. Belyakova³, E.Yu. Zhdanova¹, M.M. Ivanov^{1,2},
A.S. Tsyplenkov¹, A.L. Gurinov²

¹Moscow State University, Moscow, Russia

²Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

³Water Problems Institute, Moscow, Russia
ludmilakuksina@gmail.com

Abstract. The main stochastic parameters of the flash floods formation and development are examined for events in small river basins in the Caucasus Black Sea Coast and Crimea in 1990–2021. The key reason of the flash flood formation is precipitation of rare frequency. However, flash flood formation could be provoked by combination of several parameters with non-critical values in some cases. Relief (elongated shape of river basin, significant slopes) often promotes rapid flow concentration. Flash floods are formed in summer and autumn period with maximum of cases in August in the studied region. All described events are characterized by very rapid water level rise (1.2–1.3 m h⁻¹), and sediment yield could be compared with mean annual values. Statistical analysis of the long observation data about

precipitation allows us to suggest more frequent flash floods appearance in the Black Sea Coast and Crimea river basins in comparison with a number of fixed and described cases.

Keywords: flash flood, precipitation, frequency, intensity, small river basin, Black Sea Coast, Crimea, Caucasus.

Введение

Внезапные ливневые паводки (ВЛП) являются одними из наиболее опасных стихийных гидрометеорологических явлений в мире. Однако до недавнего времени (наводнение в Крымске в 2012 г.) в российской гидрологии отсутствовал специальный термин [1, 2], и по-прежнему не существует четкой системы критериев, позволяющих отделять ВЛП от селей и других подобных событий. Этот факт, наряду с практически полным отсутствием публикаций, освещающих ВЛП в Восточной Европе, на английском языке, приводит к тому, что многие события такого типа до сих пор не находят отражения в общемировых базах данных, хотя ежегодно сообщается о наводнениях на Черноморском побережье Кавказа (ЧПК).

ВЛП обычно определяется как быстро развивающийся паводок (в течение 3–6 часов) после спровоцировавшего его ливня (или другой причины) и, как правило, происходит в горных районах [7]. ВЛП представляет собой комплексное явление, возникновение, развитие и последствия которого обусловлены взаимодействием гидрометеорологических, литолого-геоморфологических и антропогенных факторов.

Районирование мировых событий [5] позволяет предположить, что на северном побережье Чёрного моря и на некотором удалении от него наиболее подверженными возникновению ВЛП являются речные водосборы, расположенные в горах и предгорьях Крыма и Западного Кавказа. Помимо климатических характеристик, формированию ВЛП в регионе способствуют также особенности строения речных водосборов – вытянутая по длине конфигурация большей части бассейнов, способствующая быстрому добеганию склонового стока до основного русла, и значительные уклоны русел благоприятствуют крайне быстрому формированию стока. Анализ климатических изменений на территории ЧПК и Крымского полуострова указывает на рост температуры воздуха, а для ряда районов отмечается рост индексов экстремальности осадков, что, несомненно, должно найти свое отражение в характере проявления ВЛП на исследуемой территории. Нередко ВЛП становятся причиной человеческих жертв на севере Черноморского побережья, где последние мощные паводки в результате выпадения ливней наблюдались в июле 2023 года. Важным фактором роста социально-экономического ущерба вследствие прохождения ВЛП на северном побережье Чёрного моря является неконтролируемая хозяйственная деятельность. Это, в частности, проявляется в несанкционированном застраивании речных пойм, отсутствии дренажных систем у жилых домов, зарастании и засорении русел.

Основная цель данного исследования – анализ основных факторов формирования ВЛП, зафиксированных в речных бассейнах Черноморского побережья Крыма и Западного Кавказа.

Материалы и методы исследования

Исследуемая территория включает в себя бассейны рек, впадающих в Черное море от р. Кудепста (19 на рис. 1) на востоке до р. Дюрсо (11 на Рис.) на западе ЧПК (исключение – р. Адагум (12 на рис. 1), относящаяся к бассейну р. Кубань) и реки Керченского полуострова и Южного берега Крыма (ЮБК) (см. рис. 1). Бассейны рек расположены в зонах умеренного и субтропического климатов и могут быть разделены на районы влажных (Туапсе – Сочи) и сухих (р. Ашамба (13 на Рис.), Алушта – Ялта) субтропиков, что сказывается на условиях формирования ВЛП, в том числе через предшествующее увлажнение почвенного покрова.

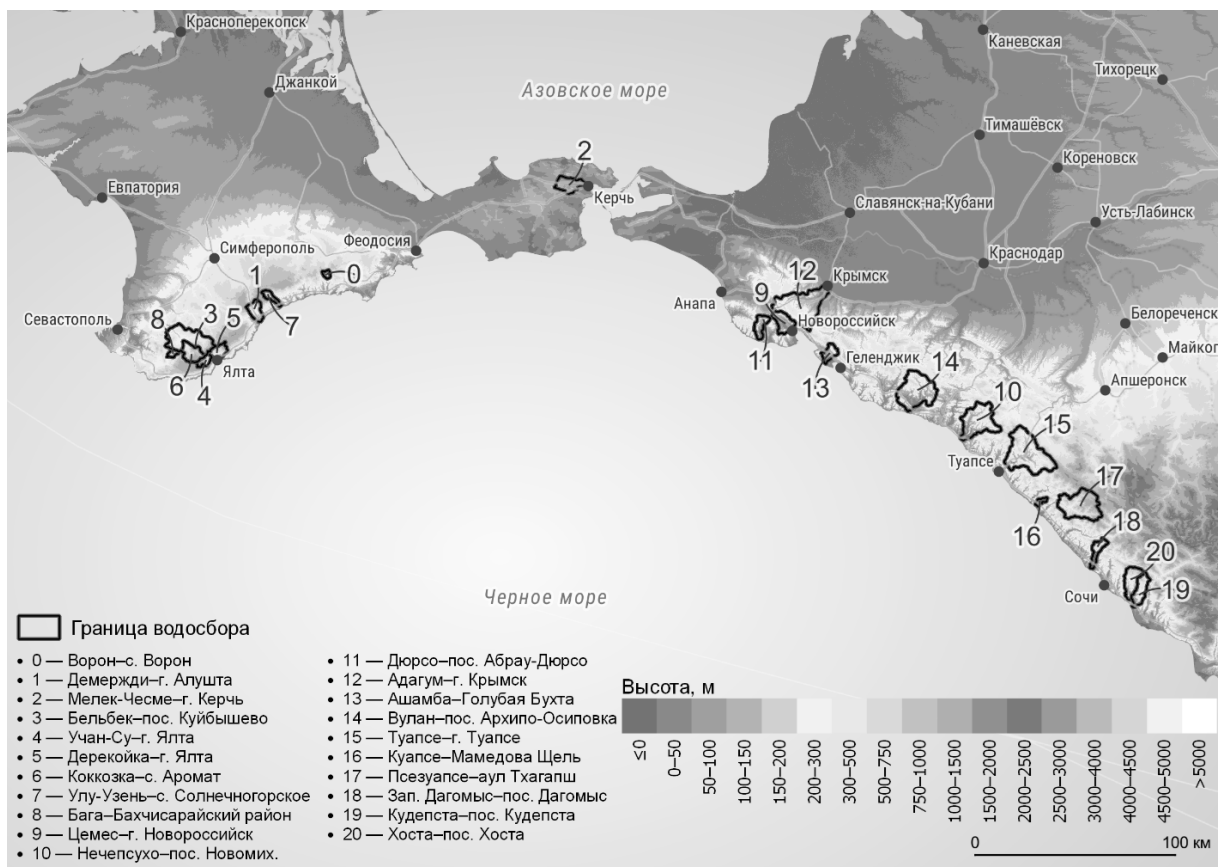


Рис. Изучаемые бассейны рек Западного Кавказа и Крыма.

На основе статистического анализа данных о ВЛП в мире в 1985–2018 гг. установлено, что основной причиной (в 95% случаев) их формирования являются интенсивные осадки небольшой продолжительности [5].

Для каждого из рассматриваемых ВЛП оценивалась повторяемость осадков, спровоцировавших паводок, а за предшествующий период (5–10–20–30 суток) оценивалось увлажнение в бассейне. На основе данных о суточных суммах осадков на метеорологических станциях, выявлялись тенденции (или их отсутствие) в изменчивости количества осадков и их максимума, а также в индексах экстремальности осадков.

При характеристике прошедших ВЛП на Черноморском побережье важной задачей являлась оценка максимальных расходов воды на различных замыкающих створах. Максимальные расходы воды экстремальных быстроразвивающихся паводков оценивают косвенными методами по меткам уровней высоких вод.

В результате обработки данных, собранных таким образом для событий на территории речных бассейнов исследованной части Черноморского побережья (Рис.), были обобщены сведения о характеристиках ВЛП, прошедших в речных бассейнах в 1990–2021 гг. Кроме того, для нескольких событий удалось оценить вклад стока наносов за ВЛП в суммарный годовой сток наносов.

Результаты и выводы

ВЛП на ЧПК и в Крыму в 1990–2021 гг. происходили в летне-осенний период с максимум случаев в августе, что соответствует общей тенденции для малых рек Северного полушария, в бассейнах которых формируются ВЛП [5], и повторяемости наиболее катастрофических наводнений на Северном Кавказе, а также отражает

особенности формирования экстремальных дождей в теплый период года в изучаемом регионе.

Количество осадков, выпадавших за период ВЛП, для исследуемого региона практически во всех случаях соответствует очень низкой обеспеченности (менее 1%), за исключением ВЛП на р. Цанык в сентябре 2018 г., когда вследствие предшествующего увлажнения почвы резкий подъем уровня был спровоцирован осадками относительно частой повторяемости [3]. Стоит отметить, что все измерения осадков получены для стационарных метеорологических постов, зачастую расположенных в нижних частях речных бассейнов, и, учитывая пространственную неоднородность выпадения осадков, особенно в горных и предгорных районах, по всей видимости, не дают объективного представления об их изменчивости в бассейне, прежде всего, в верхних звеньях флювиальной сети, являющихся зоной зарождения ВЛП. Наиболее частой причиной формирования экстремальных осадков и, соответственно, ВЛП являются блокирующие антициклоны над ЕТР, способствующие интенсификации циклонической деятельности на их периферии, что связано с изменениями циркуляции атмосферы в Северном полушарии.

Анализ продолжительных рядов метеорологических наблюдений показал, что осадки редкой повторяемости на исследуемой территории фиксируются значительно чаще, чем ВЛП. Всего за период 1991–2020 гг. на метеостанции Туапсе, к примеру, было зафиксировано 44 случая выпадения осадков редкой повторяемости, в то время как в бассейне р. Туапсе за этот же период описано всего 3 ВЛП; в Керчи – 33 случая выпадения осадков редкой повторяемости и ни одного ВЛП на р. Мелек-Чесме за этот же период. Это отчасти указывает на степень изученности данных событий. К примеру, в бассейне р. Туапсе 8 июля 2014 г. были зафиксированы осадки 118 мм (повторяемость 0,1%), спровоцировавшие мощный паводок, однако данное событие нашло отображение только в местных новостных источниках и социальных сетях. Кроме того, значительно большее число случаев выпадения экстремальных дождей по сравнению с зафиксированными ВЛП свидетельствует о большой пространственной неоднородности осадков, когда зафиксированный на метеостанции ливень не всегда предполагает выпадение аналогичного количества осадков схожей интенсивности в других частях речного бассейна. Эти особенности указывают на необходимость применения в регионе учащенной сети гидрометеорологических наблюдений, что позволило бы оценивать слой, интенсивность выпадения осадков и их пространственную неоднородность в пределах бассейнов малых рек и достоверно фиксировать связанные с ними резкие подъемы уровней воды.

Анализ синоптической ситуации, предшествующей отобранными событиями, показал, что в зависимости от характеристик почвенного покрова, формирование ВЛП также зависит от предварительной увлажненности почвы. Во всех рассмотренных случаях ВЛП выпадению экстремальных осадков предшествовали менее интенсивные дожди в условиях влажных субтропиков (р. Туапсе, см. 15 на рис. 1), отсутствовали дожди в умеренном климате (р. Адагум, см. 12 на рис. 1) и сухих субтропиках (рр. Мелек-Чесме, Учан-Су, см. 2, 4 на Рис.).

Прошедшие события характеризуются очень высокой скоростью подъема уровня воды – порядка 1.2–1.3 м/ч, а максимальная зарегистрированная интенсивность роста составляет 1.7 м в течение 10 мин (р. Западный Дагомыс 24–25 октября 2018 г.). Подъем уровня воды происходил в течение очень быстрого времени, как правило, менее 5-6 часов, в отдельных случаях – порядка 20–40 мин. Наиболее разрушительные ВЛП характеризовались ростом уровня воды в течение 3–5 ч, причем для ВЛП на р. Адагум максимальный рост уровня воды составил 7 м.

Сведения о стоке наносов при прохождении ВЛП крайне обрывочны и практически отсутствуют, однако согласно имеющимся данным гидрологических ежегодников для рр. Вулан, Мзымта, а также опубликованным сведениям для рр. Хоста [6], Цанык [3] их количество за одно событие (ВЛП) оказывается сопоставимо со среднегодовым стоком наносов, что согласуется со сведениями, полученными для рек в других регионах мира [4].

Антропогенная деятельность может оказывать как прямое, так и косвенное воздействия на условия формирования и прохождения ВЛП. При выпадении экстремальных осадков нередко возникают случаи экстренного сброса воды из водохранилищ во избежание их перелива и последующего разрушения плотины из-за резкого повышения уровней воды и её перелива через тело плотины. Подобная ситуация наблюдалась в июне 2021 г., когда были размывы плотины прудов, расположенных на рр. Мелек-Чесме и Булганак в районе г. Керчь, а в Бахчисарайском районе был произведен экстренный спуск водоемов. Серьезные социально-экономические последствия ВЛП также связаны с такими особенностями хозяйственного воздействия, как неконтролируемая застройка территории и засорение русел.

Выполненный анализ позволяет сделать ряд выводов. Показано, что «пусковым» фактором начала ВЛП, как правило, выступают осадки высокой интенсивности. Однако нередко возникновение ВЛП и, главное, наиболее катастрофические последствия их формирования, возникают при совокупном сочетании различных факторов, характеризующих предшествующее состояние бассейна, достигшего некой «критической» точки и характеризующегося достаточным количеством накопленного на склонах материала, способного вовлекаться в движение. В таком случае спровоцировать начало ВЛП могут и осадки, не достигающие максимальных значений (слой и интенсивность) для данной территории. Антропогенные факторы редко выступают причиной, инициирующей возникновение ВЛП, но часто способствуют усилению их мощности, тем самым провоцируя рост негативных последствий ВЛП и значительный социально-экономический ущерб.

Анализ данных наблюдений за осадками позволил предположить, что вероятно, ВЛП на северном побережье Черного моря формируются чаще, чем фиксируются. Однако учитывая крайнюю неравномерность выпадения жидких осадков, особенно в горных районах, можно предположить, что данные наблюдений за осадками на стационарных постах не могут распространяться на близлежащие речные бассейны в связи с высокой пространственной вариабельностью ливневых дождей высокой интенсивности.

Основными причинами возрастающего социально-экономического ущерба является несанкционированная хозяйственная деятельность на периодически затапливаемых участках речных долин, а также отсутствие или снижение работ по расчистке и укреплению речных русел, отсутствие превентивных защитных мер в верхних звеньях речной сети, являющихся основными зонами зарождения ВЛП.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-70035 (сбор данных о ВЛП на ЧПК и в Крыму) и проекта РНФ № 19-17-00181 (сбор и анализ данных о характеристиках стока наносов).

Acknowledgments

The reported study was funded by RFBR, project number 20-35-70035 (collection of data about flash floods in the Caucasus Black Sea Coast and Crimea) and RSF, project number 19-17-00181 (collection and analysis of data about sediment yield characteristics).

Список литературы

1. Болгов М.В., Коробкина Е.А. Реконструкция дождевого паводка на реке Адагум на основе математических моделей формирования стока // Водное хозяйство России. 2013. №3. С. 87–102.
2. Котляков В.М., Десинов Л.В., Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Лихачёва Э.А., Маккавеев А.Н., Медведев А.А., Рудаков В.А. Наводнение 6–7 июля 2012 года в городе Крымске // Известия РАН. Серия географическая. 2012. № 6. С. 80 –88.
3. Цыпленков А.С., Иванова Н.Н., Ботавин Д.В., Кузнецова Ю.С., Голосов В.Н. Гидрометеорологические предпосылки и геоморфологические последствия экстремального паводка в бассейне малой реки в зоне влажных субтропиков (на примере р. Цаньк, район Сочи) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2021. 66(1). С. 144 – 166. DOI: 10.21638/spbu07.2021.109.
4. Cohen H., Laronne J. B. High rates of sediment transport by flashfloods in the Southern Judean Desert, Israel // Hydrological Processes. 2005. V. 19. P. 1687–1702.
5. Kuksina, L.; Golosov, V. Flash Floods: Formation, Study and Distribution. E3S Web Conf. 2020, 163, 02005, doi:10.1051/e3sconf/202016302005.
6. Korshenko E., Zhurbas V., Osadchiev A., Belyakova P. Fate of river-borne floating litter during the flooding event in the northeastern part of the Black Sea in October 2018 // Marine Pollution Bulletin. 2020. V. 160. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111678.
7. US Department of Commerce, N. Flash Flooding Definition Available online: <https://www.weather.gov/phi/FlashFloodingDefinition> (accessed on 18 January 2022).

Определение параметров излучин чётковидных русел на примере реки Кардаил (север Волгоградской области)

А.А. Куракова*, А.М. Тарбеева, В.В. Сурков

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
a.a.kurakova@mail.ru*

Аннотация. Чётковидные русла представляют собой чередование округлых озёровидных расширений-чётков и узких мелководных каналов между ними. Они широко распространены в степной зоне России, но причины и условия их формирования до сих пор не установлены. Одним из способов, позволяющих связать условия формирования русла и его морфологию, является гидролого-морфологический анализ, при котором определяются морфометрические характеристики русла. В данной статье рассматриваются подходы к определению морфометрических параметров четковидных извилистых русел и приводятся первые результаты морфометрического анализа четковидных русел степных рек.

Ключевые слова: малые реки, гидролого-морфологический анализ, излучины, озёровидные расширения русла, степь.

Meanders morphometry of the beaded-shape channel of the Kardail River (north of the Volgograd region)

A.A. Kurakova*, A.M. Tarbeeva, V.V. Surkov

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
a.a.kurakova@mail.ru*

Abstract. Beaded-shape channels are an alternation of lake-like extensions (beads) and narrow runs. They are widespread in the steppe of the European Russia, but their origin and formation conditions have not yet been established. One way of linking the formation conditions and morphology of the channel is hydromorphological analysis, in which the morphometric parameters of the channel are determined. This paper discusses approaches to the determination of morphometric parameters of beaded meandering channels and presents the primary results of morphometric analysis of beaded-shaped channels of steppe rivers.

Keywords: small rivers, hydromorphological analysis, meanders, lake-like extensions, steppe.

Введение

Чётковидные или бочажинные русла представляют собой чередование округлых озёровидных расширений-чётков и узких каналов между ними. Они могут быть как прямолинейными, так и извилистыми. Четковидные русла широко распространены в степной зоне Европейской территории России [3, 5, 8], но причины их формирования до сих пор не установлены. Одним из способов, позволяющих связать условия формирования русла и его морфологию, является гидролого-морфологический анализ, при котором определяются морфометрические характеристики русла [2, 6, 9]. Однако, ввиду особенностей морфологии четковидных русел, требуется разработка отдельного подхода к определению их морфометрических характеристик русла.

В данной статье рассматриваются подходы к определению морфометрических параметров четковидных извилистых русел и приводятся первые результаты морфометрического анализа четковидного русла реки Кардаил.

Объект исследования

Кардаил – правый приток р. Бузулук – имеет длину 148 км, площадь бассейна 1.9 тыс. км². Питание преимущественно снеговое. Половодье короткое (около 35 суток), с высоким острым пиком (подъем воды на 4-4.5 м). Максимальный срочный расход воды 112 м³/с, но средние максимальные расходы много меньше: 1%-ной обеспеченности – 6 м³/с, 10%-ной – 4.4 м³/с. Межень длинная с короткими дождевыми паводками. В половодье проходит 80-93% стока, в летне-осеннюю межень – от 7 до 20%. В конце лета сток прекращается, местами на перекатах река пересыхает.

Кардаил имеет четковидное извилистое русло, то есть его излучины осложнены озеровидными расширениями. Расширения русла – четки – имеют глубины до 5-5.5 м, в сужениях русла глубины составляют 0.5-1 м. Расширения русел-четки характерны как для вершин излучин, так и для их крыльев. Вдоль русла выделяются два уровня поймы – высокая луговая (до 4-5 м) и молодая низкая (высотой до 1-2 м). На высокой пойме расположены сенокосы и пастбища. Низкая пойма часто зарастает тростником.

Существующие подходы к определению морфологических параметров русла и их адаптация к исследованию четковидных русел

Подходы к определению морфологических параметров излучин русла активно разрабатывались как в России [2, 6], так и зарубежом [9]. В отечественной школе русловедения МГУ излучины характеризуются следующими морфологическими параметрами, которые довольно полно позволяют охарактеризовать геометрические очертания русла [7]. Длина по руслу (l) представляет собой сумму длины двух крыльев излучины. Шаг излучины – L – описывает расстояние между точками перегиба оси русла в местах сопряжения соседних излучин. Радиус кривизны (r) описывает кривую геометрической оси русла на большей ее протяженности или в привершинной части. Ширина русла (b) обычно определяется в вершине излучины, но для морфометрического анализа ее целесообразно определять на крыльях излучин, в точках смены знака кривизны осевой линии, где она менее вариабельна [4].

Среднестатистическое соотношение шага излучины к ширине русла для излучин рек находится в пределах 5-7, что отражает особенности гидродинамики потока [9]. Несоответствие русел этому соотношению может свидетельствовать о несоответствии современной водности потока существующей форме русла [4].

Так как топографические карты не имеют необходимой детализации для выделения ширины русел малых рек, имеющих сильно заросшую тростником низкую пойму, для определения параметров четковидного русла использовались космические снимки сверхвысокого (менее 1 м в пикселе) разрешения, доступные в сервисах GoogleEarth и SAS.Планета. Среди доступных космических снимков для измерений применялись снимки весеннего периода, где тростник на пойме отсутствует или повален, а водная растительность еще не получила развития. Кардаил был разделен на пять относительно бесприточных участков, для которых проводился статистический анализ полученных морфометрических параметров излучин русла и его четок: I – исток – р. овр. Вихляевка, II – р. овр. Вихляевка–р. Каравочка, III – р. Каравочка – р. Купава, IV – р. Купава – р. Кирхина, V – р. Кирхина – устье.

Шаг излучин (L) р. Кардаил определялся традиционным способом (Рис. А). Значения радиусов кривизны, а точнее их минимальные значения в пределах каждой излучины, были получены при помощи специально написанной программы в Python в ArcMap 10.8 на основе обработки средней линии русла (Рис. Б). Ширина русла р.

Кардаил определялась в створах изменения кривизны осевой линии русла в верхних и нижних крыльях излучин. Определялась ширина русла в бровках высокой поймы ($b_{др}$), и ширина русла в пределах низкой поймы ($b_{сов}$) (Рис. А).

Помимо этого, для четковидных русел дополнительно определялись максимальная длина ($L_ч$) и максимальная ширина ($B_ч$) четок.

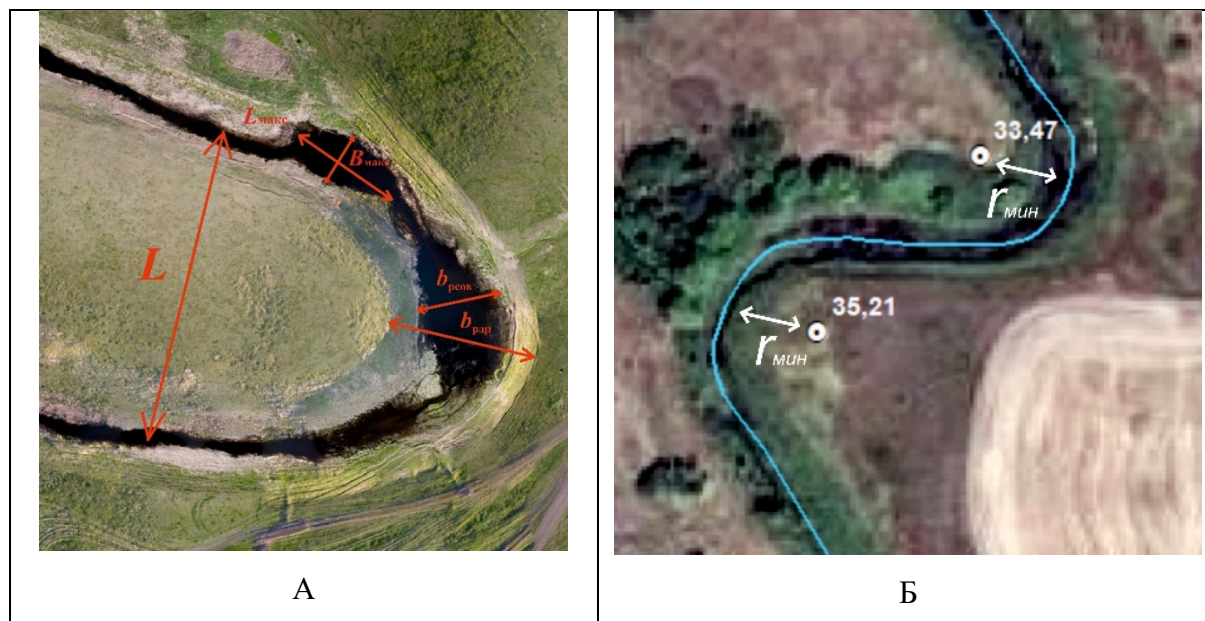


Рис. Определение параметров форм русла для р. Кардаил: А – ширины русла в бровках высокой поймы $b_{др}$, ширины русла в бровках низкой поймы $b_{сов}$, шага излучины L , максимальных ширин $B_ч$ и длин $L_ч$ чёток; Б – минимальных радиусов кривизны r .

Перечисленные параметры были установлены для 142 излучин, из которых 77 можно отнести к древним, а также для 214 чёток.

Результаты и их обсуждение

Средние значения измеренных параметров излучин: ширины русла в бровках низкой поймы ($b_{сов}$), ширины русла в бровках высокой поймы ($b_{др}$), минимального радиуса кривизны излучин (r) и шага излучин (L) в целом возрастают вниз по течению р. Кардаил (табл. 1), что говорит о ведущей роли водности потока в формировании излучин.

Табл. 1. Средние значения морфологических параметров излучин русла р. Кардаил по участкам: ширина русла в бровках низкой поймы ($b_{сов}$), ширина русла в бровках высокой поймы ($b_{др}$), минимальный радиус кривизны (r) и шаг излучин (L), и их соотношения.

Участок	$b_{сов}$, м	$b_{др}$, м	r , м	L , м	$L/b_{сов}$	$L/b_{др}$	доля излучин $L/b_{сов} < 10$
I	8.7	43.7	61.6	171	20.8	4.0	0.07
II	11.6	36.5	52.7	151	16.5	4.2	0.36
III	10.0	34.7	45.8	130	14.5	3.7	0.17
IV	15.2	46.3	63.9	186	14.4	4.1	0.40
V	28.5	53.9	87.7	270	10.0	5.1	0.59

Незначительное снижение значений параметров на III участке может свидетельствовать об изменении литологических или других условий, также влияющих на формирование излучин.

Однако соотношение шага излучин к ширине русла в бровках низкой поймы ($L/b_{совр}$) существенно (в 2-4 раза) превышает нормальные значения для рек, равные 5-7. Это означает, что русло реки сильно заужено для излучин такого размера. Такое несоответствие ширины русла шагу излучин можно объяснить зарастанием части русла и его превращением в низкую пойму. Зарастание русел, связанное со снижением водности и заилением рек весьма характерно для рек степной зоны [1]. Особенно сильно зарастание русла проявляется в верхнем течении рек, что выражается в уменьшении соотношения $L/b_{совр}$ вниз по течению, где оно достигает значений, близких к нормальным (10).

В то же время, соотношение шага излучин к ширине русла в бровках высокой поймы ($L/b_{оп}$) находится в пределах 3.7-5.1, что близко к нормальным соотношениям, хоть и несколько ниже их. Это может свидетельствовать о том, что формирование излучин происходило во время формирования высокой поймы. Занижение значений этого соотношения может быть связано с неточностью выделения бровок высокой поймы по снимкам, а также с последующим разрушением бровок.

На каждом участке выделяются излучины с нормальным соотношением шага к ширине русла в бровках низкой поймы, условно принятое нами по значению $L/b_{совр} < 10$. Доля таких излучин возрастает вниз по течению (Табл. 1). Шаг таких излучин в 1.2-2.2 раза меньше, чем излучин с $L/b_{совр} > 10$. Возможно, эти излучины можно отнести к современным или более молодым образованиям.

Изменение величин максимальных ширин $B_ч$ и длин $L_ч$ четок по результатам предварительного анализа не имеет четко выраженного тренда по длине реки (Табл. 2), что говорит об отсутствии их тесной связи с водностью реки и требует дальнейшего анализа.

Табл. 2. Морфометрические характеристики четок р. Кардаил: $L_ч$ – максимальная длина четки, $B_ч$ – максимальная ширина четки.

Участок	$L_ч$, м			$B_ч$, м		
	среднее	максимальное	минимальное	среднее	максимальное	минимальное
I	105.1	290.0	17.0	31.2	54.0	15.0
II	61.0	139.0	25.0	26.4	58.0	9.0
III	66.6	154.0	20.0	25.8	57.0	9.0
IV	128.0	337.0	40.0	42.0	72.0	16.0
V	120.6	233.0	31.0	66.5	133.0	19.0

Выводы

Таким образом, измерение параметров излучин позволило выявить несоответствие современной водности реки форме русла, особенно проявляющееся на реках начальных порядков, которое может свидетельствовать о зарастании русел и формировании молодой поймы. Отсутствие явного увеличения размеров расширений русел по длине реки может свидетельствовать об отсутствии роли водности потока в их формировании.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00008, <https://rscf.ru/project/23-27-00008/>

Acknowledgments

The work was supported by. Russian Science Foundation, project № 23-27-00008, <https://rscf.ru/en/project/23-27-00008/>.

Список литературы

1. Иванова Н.Н., Голосов В.Н., Панин А.В. Земледельческое освоение территории и отмирание рек Европейской части России. // Геоморфология. 1996. №4. С. 53-60.
2. Кондратьев, Н.Е. Основы гидроморфологической теории руслового процесса / Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Снисченко Б.Ф. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 272 с.
3. Рябуха А.Г., Поляков Д.Г. Особенности распространения, морфологическое строение и механизмы формирования четковидных русел малых рек степной зоны Оренбургской области // Успехи современного естествознания. 2020. № 4. С. 146-150.
4. Сидорчук А. Ю., Панин А. В. Геоморфологические подходы к оценке величины речного стока в геологическом прошлом (ст. 2. Гидравлические методы реконструкции расходов палеорек) // Геоморфология. 2017. № 2. С. 3–13.
5. Тарбеева А.М., Крыленко И.В., Сурков В.В. Озеровидные расширения русел рек степной зоны и возможные причины их формирования (бассейн р. Урал в районе г. Орска) // Геоморфология. 2016. № 1. С. 73-81.
6. Чалов, Р.С. Речные излуины / Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В. М.: Изд-во МГУ, 2004. 371 с.
7. Чалов, Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 2. Морфодинамика речных русел / Чалов Р.С. М.: КРАСАНД, 2011. 960 с.
8. Чернов А.В. Современное развитие малых рек центральных районов Европейской части СССР // Малые реки Центра Русской равнины, их использование и охрана. М.: МО ГО СССР. 1988. С. 17–25.
9. Leopold, L.V. River channel patterns – braided, meandering and straight / Leopold L.V., Wolman M.G. // US Geol. Surv. Prof. Pap. 282-B. 1957. P. 1-85.

Подземные воды надмерзлотных субаэральных таликов и формирование речного стока в бассейне р. Шестаковка, Центральная Якутия

Л.С. Лебедева*, В.В. Шамов

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия
lyudmilaslebedeva@gmail.com*

Аннотация. Цель нашего исследования – описать механизмы формирования речного и подземного стока, определить основные источники питания реки и пути движения воды на малом водосборе в сплошной криолитозоне Центральной Якутии. Исследование базируется на данных собственных комплексных полевых работ, включающих наблюдения за уровнями и расходами воды в реках, уровнями озер и надмерзлотных подземных вод, температурой пород, ландшафтные описания, геофизический мониторинг положения мерзлотного водоупора, регулярный пробоотбор атмосферных осадков, рек, озер и подземных вод для определения химического и изотопного состава. Наши исследования показали, что положение мерзлотного водоупора не одинаково даже на одном малом водосборе и зависит от ландшафта. В сосновых лесах, произрастающих на песчаных отложениях, широко распространены надмерзлотные субаэральные водоносные талики мощностью до 20 м, которые содержат значительные запасы подземных вод. В лиственничных лесах и на марях сезонно-талый слой достигает лишь 0.5-1.0 м в конце теплого сезона. В разные сезоны доминируют различные источники питания реки.

Ключевые слова: надмерзлотный субаэральный талик, подземные воды таликов, гидрология криолитозоны, Центральная Якутия, гидрохимический трассер.

Groundwater of suprapermafrost subaerial taliks and the formation of river streamflow in the Shestakovka watershed, Central Yakutia

L.S. Lebedeva*, V.V. Shamov

*Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia
lyudmilaslebedeva@gmail.com*

Abstract. The purpose of our study is to describe the mechanisms of formation of river and groundwater flow, to determine the main river water sources and the water pathways in a small watershed in the continuous permafrost zone of Central Yakutia. The study is based on data from our own comprehensive field work, including observations of water levels and discharges in rivers, levels of lakes and suprapermafrost groundwater, ground temperature, landscape descriptions, geophysical monitoring of the position of permafrost aquiclude, regular sampling of atmospheric precipitation, rivers, lakes and groundwater for determination of chemical and isotopic composition. Our studies have shown that the position of the permafrost aquiclude is not the same even in one small watershed and depends on the landscape. In pine forests on sandy deposits, suprapermafrost subaerial talik aquifers up to 20 m thick are widespread, which contain significant groundwater volume. In larch forests and marshes, the

seasonally thawed layer reaches only 0.5-1.0 m at the end of the warm season. In different seasons, different sources of river feeding dominate in the streamflow.

Keywords: suprapermafrost subaerial talik, talik groundwater, permafrost hydrology, Central Yakutia, hydrochemical tracer.

Введение

Процессы формирования стока на водосборах рек криолитозоны и умеренных широт значительно отличаются. В зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП) криогенный водоупор залегает, как правило, повсеместно и близко к поверхности. Это обуславливает многие специфические механизмы формирования стока: 1) ограниченное взаимодействие поверхностных и подземных вод, 2) сезонная и межгодовая динамика глубины залегания криогенного водоупора, 3) сезонное и многолетнее криогенное перераспределение стока, 4) формирование наледей и наледный сток, 5) криогенные паводки, 6) внутригрунтовая конденсация влаги, 7) зимнее перемерзание рек до дна, 8) подземные льды и их таяние.

Гидрологические и гидрогеологические процессы в области сплошного распространения криолитозоны связаны с существованием сквозных и несквозных водоносных таликов. Именно талики являются единственными постоянно действующими путями фильтрации подземных вод в сплошной криолитозоне, которые могут быть связаны с речными водами.

Цель нашего исследования – описать механизмы формирования речного и подземного стока, определить основные источники питания реки и пути движения воды на малом водосборе в сплошной криолитозоне Центральной Якутии на примере р. Шестаковка.

Материалы и методы исследования

Водосбор р. Шестаковка площадью около 170 кв. км располагается на левом берегу р. Лены в 20 км к югу от Якутска в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Климат района исследования резко континентальный с суровой продолжительной зимой и коротким жарким летом. Средняя годовая температура воздуха на ближайшей метеорологической станции в г. Якутске за период 1951–2020 гг. составляет минус 9.2°C, средняя многолетняя температура января минус 39.6°C, июля плюс 19.2°C. Среднее годовое количество осадков с 1951 по 2020 г. 239 мм/год, из них 60% выпадает в виде дождя, 40% - в виде снега и смешанных осадков. Среднемноголетнее значение слоя стока р. Шестаковки равно 24 мм/год. Среднемноголетний коэффициент стока составляет 10%.

В распадках, понижениях и на выровненных участках рельефа произрастают лиственнично-березовые леса. Сосновые леса занимают преимущественно склоны и водоразделы. Вдоль ручьев и озер развиты мари и заболоченные территории. Сосновые леса занимают 35% площади водосбора р. Шестаковки, лиственнично-березовые леса – 45%, мари и болота – 19% и озера – 1%.

Верхнюю часть геологического разреза до глубины 30 м составляют рыхлые песчаные отложения с редкими прослоями глин [1]. На склонах и водоразделах пески представлены мелко- и среднезернистыми фракциями. Их объемная влажность в зоне аэрации не превышает 2–8 %. Песчаные отложения имеют кварц-полевошпатовый состав, плотность скелета более 1.70 г/см³ и пористость 33–35 % [1]. В днищах долин ручьев и распадков увлажненные (15–25%) пески перекрыты органометным слоем.

Рассматриваемая территория относится к области развития нестационарных мерзлых толщ, мощность которых в современный период достигает 400–500 м. Температура пород на глубине 100 м составляет –0.6...–1.0 °C [2], а на подошве слоя нулевых годовых амплитуд в зависимости от ландшафта изменяется от положительных

(близких к 0 °С) значений до –2...–3 °С и ниже. Мощность сезонно-талого слоя (СТС) изменяется от 4 м на пологих склонах и водоразделах, покрытых сосновым лесом, до 0.5 м на марях.

Исследование базируется на данных собственных комплексных полевых работ, включающих наблюдения за уровнями и расходами воды в реках, уровнями озер и надмерзлотных подземных вод, температурой пород, ландшафтные описания, геофизический мониторинг положения мерзлотного водоупора, регулярный пробоотбор атмосферных осадков, рек, озер и подземных вод для определения химического и изотопного состава.

Результаты

Наши исследования показали, что положение мерзлотного водоупора не одинаково даже на одном малом водосборе и зависит от ландшафта. В сосновых лесах, произрастающих на песчаных отложениях, широко распространены надмерзлотные субэральные водоносные талики мощностью до 20 м, которые содержат значительные запасы подземных вод. Геофизические исследования распространения таликов в пределах бассейна р. Шестаковки и буровые работы показали, что таликами покрыто приблизительно 15-20% водосбора [3; 4; 5]. В зимний период на склонах вдоль долины р. Шестаковки образуются многочисленные наледи, сформированные высачиванием подземных вод таликов и глубокого сезонно-талого слоя (СТС) в сосновых лесах. В лиственных лесах и на марях СТС достигает лишь 0.5-1.0 м в конце теплого сезона.

В разные сезоны доминируют различные источники питания реки. В весенний период при активном таянии снега формируются ручьи на марях и в лиственных лесах, которые питают реку. Это подтверждается схожим химическим составом воды в таких ручьях и реке, а также пониженным водородным показателем, который достигает 4.0 на ручьях на марях и 5.0 в водах р. Шестаковка. В меженный период ручьи полностью пересыхают, и река, по-видимому, питается подземными водами таликов и глубокого СТС в сосновых лесах на песчаных массивах. Гипотеза о преобладающей роли подземных вод таликов и глубокого СТС подтверждается отсутствием речного стока в межень на малых реках региона, на водосборе которых преобладают лиственные леса, мари и другие ландшафты с неглубоким СТС, например, р. Мархинка к северу от г. Якутска, тогда как на малых реках, на водосборах которых значительна доля сосновых лесов, наблюдается непрерывный сток до полного промерзания рек в ноябре-декабре. Кроме того, речные воды р. Шестаковки в период межени близки по химическому составу к подземным водам надмерзлотных водоносных таликов.

На важную роль подземных вод таликов в питании реки в межень указывает также сезонная динамика уровня подземных и речных вод, показанная на рисунке. В течение большей части года уровни воды в реке и подземных вод талика гидравлически не связаны. В зимний период во время промерзания пород с поверхности после достижения фронтом промерзания водоносной части талика уровень подземных вод возрастает и формируется криогенный напор. В зимний период 2020-2021 криогенный напор интенсивно рос в течение января примерно на 1.5 м в скв. 3/16 и на 0.8 м в скв. 1/20. До конца марта уровень колебался незначительно и затем постепенно уменьшался. Резкий спад криогенного напора произошел в период с 1 по 20 мая, когда уровень подземных вод талика упал на 0.7 м в скв. 1/20 и на 1.7 м в скв. 3/16. С 21 мая по 9 июля уровень подземных вод колебался незначительно вблизи минимальных значений на протяжении двух лет измерений. Это был сухой период, за исключением небольших дождей 17 мая (7.4 мм/сутки) и 30 мая (2.6 мм/сутки). Уровень подземных вод не реагировал на выпадение этих осадков. При этом понижения уровня также не наблюдалось, что говорит об отсутствии испарения с поверхности водоносного горизонта в этот период. С 9 по 23 июля 2021 произошел рост уровня подземных вод примерно на 1 м в обеих скважинах.

Дожди были зафиксированы 10 июля (2 мм), 11 июля (7.8 мм), 16 июля (3.6 мм) и 24 июля (16.2 мм). По-видимому, рост уровня подземных вод наблюдался не столько из-за дождей, сколько из-за полного протаивания сезонно-мерзлого слоя (СМС) над таликом и инфильтрацией вод верховодки, которые сформировались на сезонном мерзлом водоупоре. После полного протаивания СМС над таликом уровень подземных вод таликов стал схож с уровнем р. Шестаковка, что указывает на восстановление связи между ними. Это также подтверждает гипотезу о питании р. Шестаковки подземными водами таликов во второй половине лета.

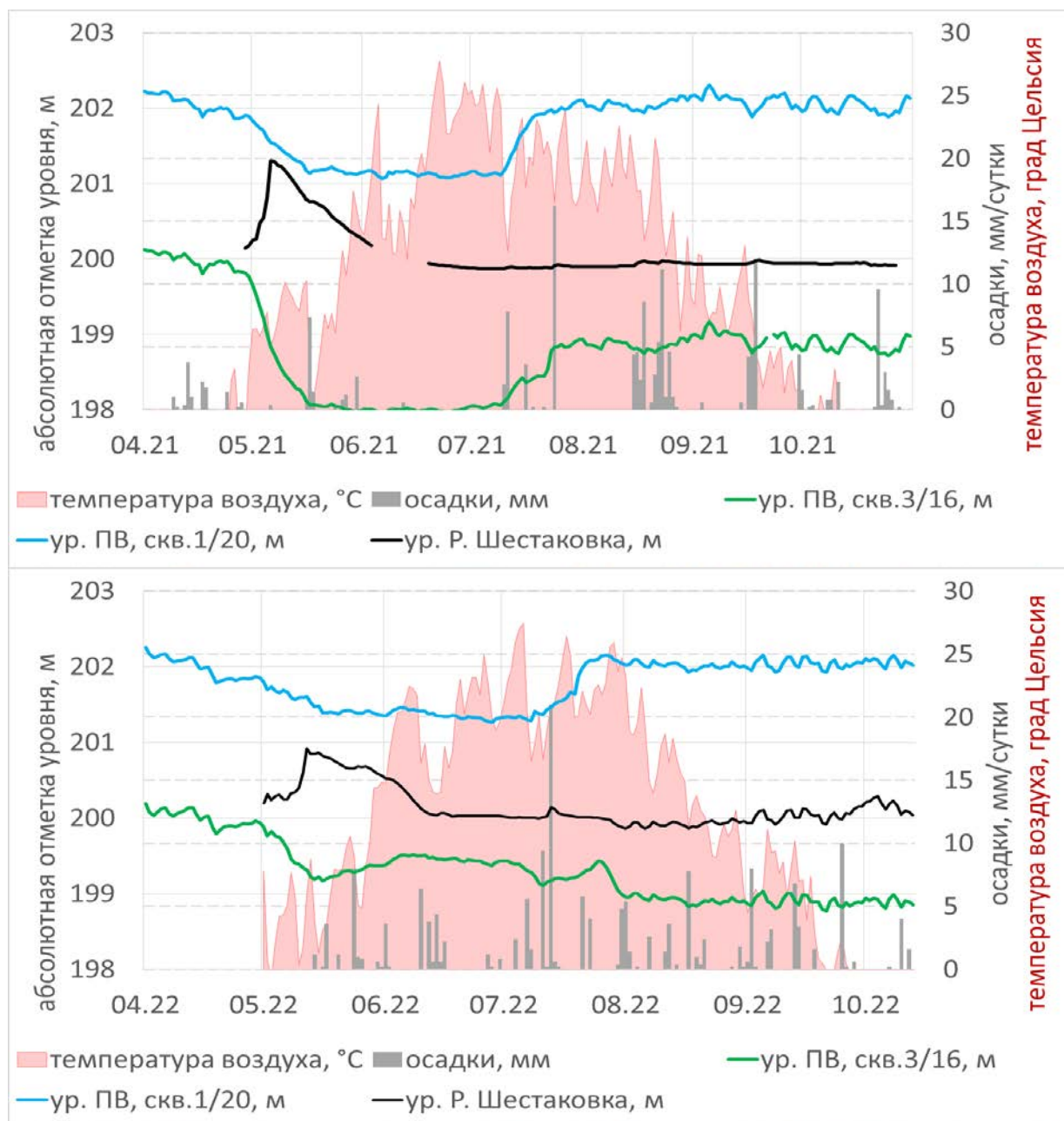


Рис. Ход температуры воздуха, жидких осадков, уровня подземных вод (ПВ) в двух скважинах и уровня воды на посту Верхний р. Шестаковки за теплые периоды 2021 и 2022 г.

В 2022 г. наблюдался схожий ход уровней подземных вод талика в двух наблюдательных скважинах.

Выводы

Положение мерзлотного водоупора не одинаково даже на одном малом водосборе и зависит от ландшафта. В сосновых лесах на песчаных отложениях широко распространены надмерзлотные субаэральные водоносные талики мощностью до 20 м, которые содержат значительные запасы подземных вод. В лиственничных лесах и на марях сезонно-талый слой (СТС) достигает лишь 0.5-1.0 м в конце теплого сезона. В разные сезоны доминируют различные источники питания реки. В весенний период при активном таянии снега формируются ручьи на марях и в лиственничных лесах, которые питают реку. В меженный период ручьи полностью пересыхают, и река питается подземными водами таликов и глубокого СТС в сосновых лесах на песчаных массивах.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда и Якутского научного фонда Проект № 22-17-20040 «Субаэральные и подозёрные талики в сплошной криолитозоне Восточной Сибири: происхождение, современное состояние и реакция на изменение климата».

Acknowledgments

This research was funded by Russian Science Foundation and Yakutian Science Foundation, grant number 22-17-20040 “Subaerial and lake taliks in continuous permafrost of Eastern Siberia: origin, current status and response to climate change”.

Список литературы

1. Бойцов А.В. Условия формирования и режим подземных вод надмерзлотного и межмерзлотного стока в Центральной Якутии: дис. ... к.г.-м.н. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002. 176 с.
2. Бойцов А.В. Условия формирования и режим склоновых таликов в Центральной Якутии // Криогидрогеологические исследования. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР. 1985. С. 44-55.
3. Лебедева Л.С., Бажин К.И., Христофоров И.И., Абрамов А.А., Павлова Н.А., Ефремов В.С., Огонеров В.В., Тарбеева А.М., Федоров М.П., Нестерова Н.В., Макарьева О.М. Надмерзлотные субаэральные талики в бассейне реки Шестаковка (Центральная Якутия) // Криосфера Земли. 2019. №23(1). С. 40-50. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-1(40-50)
4. Лебедева Л.С., Баишев Н.Е., Павлова Н.А., Ефремов В.С., Огонеров В.В., Тарбеева А.М. Температура пород в слое годовых теплооборотов в районе распространения надмерзлотных таликов в центральной Якутии // Криосфера Земли. 2023. №27(2). С. 3-15. DOI: 10.15372/KZ20230201
5. Lebedeva, L., Pavlova, N., Khristoforov, I. Geology, Structure, Ground Temperature and Groundwater Level in Aquifer Taliks in the Shestakovka River Basin, Eastern Siberia // Land. 2023. 12. <https://doi.org/10.3390/land12010016>

Сток воды с каменных глетчеров северного Тянь-Шаня, Республика Казахстан

Л.С. Лебедева^{1,2*}, В.В. Гончаренко^{1,2}, В.М. Лыткин¹

¹ *Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия*

² *Центрально-Азиатский Региональный Гляциологический Центр категории 2 под эгидой ЮНЕСКО, Алматы, Казахстан
lyudmilaslebedeva@gmail.com*

Аннотация. Целью работы было исследование стока ручьев с каменных глетчеров в бассейне р. Озёрная, северный Тянь-Шань, для оценки гидрологической значимости каменных глетчеров. Выявлено, что каменные глетчеры оказывают существенное влияние на водный режим, температуру и химический состав водотоков, формирующихся выходами воды из них. Стабильный сток с каменных глетчеров может играть важную роль в поддержании речного стока в периоды пониженной водности.

Ключевые слова: каменный глетчер, сток воды, северный Тянь-Шань, источник питания, гидрохимический трассер.

Water flow from rock glaciers in the northern Tien Shan, Republic of Kazakhstan

L.S. Lebedeva^{1,2*}, V.V. Goncharenko^{1,3}, V.M. Lytkin¹

¹ *Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia*

² *Central Asian Regional Glaciological Center category 2 under the auspices of UNESCO, Almaty, Kazakhstan
lyudmilaslebedeva@gmail.com*

Abstract. The aim of the work was to study the streamflow from rock glaciers in the Ozernaya river basin, northern Tien Shan, to assess the hydrological significance of the rock glaciers. It was revealed that rock glaciers have a significant impact on the water regime, temperature and chemical composition of streams formed by water outlets from them. Stable flow from rock glaciers can play an important role in maintaining river flow during low water periods.

Keywords: rock glacier, water runoff, northern Tien Shan, water source, hydrochemical tracer.

Введение

Каменные глетчеры распространены во многих горных системах всех географических поясов мира [Горбунов и Горбунова, 2010]. О большом значении каменных глетчеров в формировании речного стока писал еще А. Corte в 1976 г. [Corte, 1976]. Вопрос о вкладе подземного льда каменных глетчеров в речной сток приобретает особую значимость на фоне резкого сокращения ледников и многолетних снежников. В отличие от ледников, каменные глетчеры более устойчивы к изменениям климата и могут существовать даже при положительной среднегодовой температуре воздуха. Jones и соавт. [2019] отметили, что вытаявание льда каменных глетчеров может быть существенным вкладом в сток рек, однако для количественных оценок необходимы натурные измерения, которые проводятся всего лишь на нескольких каменных глетчерах в мире преимущественно в Альпах. В Альпах происходит постепенный переход от

ледникового и снегового питания рек к питанию за счет каменных глетчеров, подземных вод и жидких осадков [Brighenti и др., 2019a]. Каменные глетчеры могут играть все более важную роль в формировании водных экосистем альпийских рек в условиях продолжающейся деградации ледников [Brighenti и др., 2019b].

Каменные глетчеры широко распространены в Центральной Азии, но до сих пор слабо изучены. На фоне интенсивного сокращения ледников многие каменные глетчеры выросли в размерах и активно наступают [Глазовский, 1977; Марченко, 2003; Вилесов и др., 2006; Галанин, 2009]. А.П. Горбунов и соавт. [2018] выявили, что наиболее крупные залежи подземных льдов в горной системе Тянь-Шаня сосредоточены в активных каменных глетчерах и современных моренах. Установлено, что объем ледников по отношению к объему подземных льдов существенно уменьшился в связи с деградацией наземного оледенения, что может говорить о возросшей гидрологической роли каменных глетчеров [Bolch и Marchenko, 2009].

На хребтах северного Тянь-Шаня Заилийский Алатау и Кюнгёй-Ала-Тоо общей площадью более 3000 км² расположен 551 каменный глетчер [Kaab и др., 2021]. Галанин и соавт. [2017] установили, что наиболее активные генерации каменного глетчера Городецкого (Заилийский Алатау) находятся в талом состоянии и практически не содержат грунтовых льдов. А.Р. Медеу и соавт. [2021] сделали предварительный вывод о наличии большого количества воды в теле каменного глетчера Моренный (Заилийский Алатау). Shahgedanova и соавт. [2020] объяснили расхождение между рассчитанными с помощью гидрологической модели HBV-ETH и фактическими расходами воды р. Большая Алматинка во второй половине лета таянием подземных льдов каменных глетчеров, площадь которых достигает 30% от площади ледников. Полевые исследования стока воды с каменных глетчеров Заилийского Алатау ранее не выполнялись.

Целью нашей работы была выявление гидрологической роли каменных глетчеров в бассейне р.Озерная, (северный Тянь-Шань) и оценка их динамики на основе экспедиционных данных 2019, 2021 и 2022 гг.

Материалы и методы исследования

Гляциально-криогенный комплексы (ГКК) Городецкого, Моренный и Турист расположены в бассейне реки Озерная (верхняя часть водосбора р. Большая Алматинка) в Заилийском Алатау. Каждый из них имеет длину более 3 км. Максимальным по длине и размеру является ГКК Городецкого протяженностью около 6 км. Основными элементами их строения являются несколько небольших ледников в истоках и крупный каменный глетчер в терминальной части, а также сочленяющее поле льдистых морен, подпрудных озерных котловин и ложбин стока в средней части ГКК. Каменный глетчер Городецкого имеет длину около 3.4 км, Моренный около 2.5 км, Турист около 1 км и лежат в интервале абсолютных высот 3150-4000 м н.у.м. Максимальная мощность каменных глетчеров, определенная методом заложений, во фронтальной части составляет около 40-50 м. Фронтальный уступ каждого из них имеет крутизну естественного откоса и даже превышает ее. Их поверхность на всем протяжении покрыта глыбами и щебнем гранитоидов, гранулометрический состав которых распределен неравномерно. Средние размеры поверхностных обломков варьируют от 0.1 до 1 м. Встречаются участки нагромождения крупных глыб диаметром более 2-3 м.

В области питания каменных глетчеров расположены несколько одноименных каровых ледников. В краевых частях ледников встречаются подпрудные озерные котловины, служащие промежуточными емкостями ледникового стока. Яркими признаками интенсивного внутреннего дренажа каменных глетчеров являются расположенные в основании фронтального откоса высокодебитные источники воды. Каменный глетчер Моренный имеет два источника, Городецкого – четыре и Турист –

один. Сток осуществляется по хорошо выработанным стабильным руслам с твердым дном, покрытым гравийно-галечным материалом и валунами. Рассматриваемые каменные глетчеры относятся к активным.

С 2018 и 2019 г. ведутся автоматизированные измерения температуры воды в местах ее выхода с помощью термических логгеров Onset HOBO с интервалом записи 4 часа. В течение экспедиционных исследований в 2019 и 2021 гг. отбирались пробы воды для определения химического состава – основных ионов и некоторых микрокомпонентов. Также в поле осуществлялись измерения расходов воды с помощью гидрометрической вертушки и ручные определения электропроводности и температуры воды ручьев с каменных глетчеров, ледниковых водотоков, родников и других природных вод в бассейне р. Озерная с помощью портативного термокондуктометра “НМ-200” (Республика Корея).

Результаты

Расходы ручьев. Ручьи, вытекающие из каменного глетчера Городецкого, имеют высокие расходы, суммарно составляющие 870-1026 л/с в конце июля 2021 г. Группа сливающихся ручьев, вытекающих из каменного глетчера Городецкого и впадающих в р. Озерная, имели расход 360 и 440 л/с 25 и 26 июля 2021 г. соответственно. Ручьи из каменного глетчера Городецкого, впадающие в р. Кысыл-Сай, имели расход 513 и 586 л/с в эти же даты.

Сток с каменного глетчера Моренный значительно меньше, чем с каменного глетчера Городецкого. Расход ручья составлял 1.7-2.1 л/с 24 и 26 июля 2021 г.

Расходы ручьев, формирующихся выходами вод из каменных глетчеров, стабильны в течение дня и не имеют выраженной внутрисуточной динамики. Были также измерены расходы ручья, формирующегося без участия каменных глетчеров. Его основным источником питания в июле является таяние ледников в верхней части водосбора. Расход этого ручья составил 4.3 л/с в 9:45 и 45.8 л/с в 16:00 26 июля 2021 г., то есть колебания водности ледниковых ручьев составляет сотни процентов в течение суток.

Температура воды ручьев. Температуры воды ручьев и воздуха показаны на Рис. 1. Температурный режим четырех ручьев, вытекающих из каменных глетчеров Городецкого, Моренный и Турист, отличается и имеет свои характерные особенности.

Ручьи, вытекающие из каменного глетчера Городецкого, имеют относительно высокую температуру, которая достигает +2...+3°C. Температурный режим стока каменного глетчера Городецкий наблюдался в трех источниках. Период их стока и ход температуры различается. Температура воды в главном выходе изменялась от +2...+3°C с августа 2019 по октябрь 2021 г. с максимальными значениями в августе, минимальными – в марте и апреле. Плавное снижение температуры воды с сентября по апрель примерно на градус свидетельствует о том, что этот выход функционировал круглогодично в 2019-2021 гг. Это единственный из наблюдаемых водотоков, который не перемерзал в эти зимы. В ноябре 2021 температура понизилась до отрицательных значений, что говорит о перемерзании источника в месте установки логгера. Сток возобновился в конце апреля 2022 г. Период перемерзания продолжался 138 дней, что на 50 дней меньше, чем период отрицательных среднесуточных температур воздуха. Центральный выход из каменного глетчера Городецкого перемерзает ежегодно и имеет температуру воды +0.5...+1°C с начала стока по конец июня и прогревается до +2...+2.5°C в июле и августе. Достаточно резкий подъем температуры воды на 1-2°C за 10-15 дней в начале июля предположительно связан с вытаиванием сезонных льдов в каменном глетчере. Продолжительность стока центрального выхода составляла 172 и 167 дней в 2020 и 2021 гг. соответственно, что на 5 и 9 дней больше, чем период положительных среднесуточных температур воздуха.

Ручей из каменного глетчера Моренный имеет околонулевую температуру воды в течение всего сезона стока, которая не превышает $+0.5^{\circ}\text{C}$. Продолжительность стока в 2020 г. составила 126 дней, что на 41 день меньше, чем продолжительность периода с положительными среднесуточными температурами воздуха.

Ручей с каменного глетчера Туристов характеризуется температурой воды около $+1^{\circ}\text{C}$.

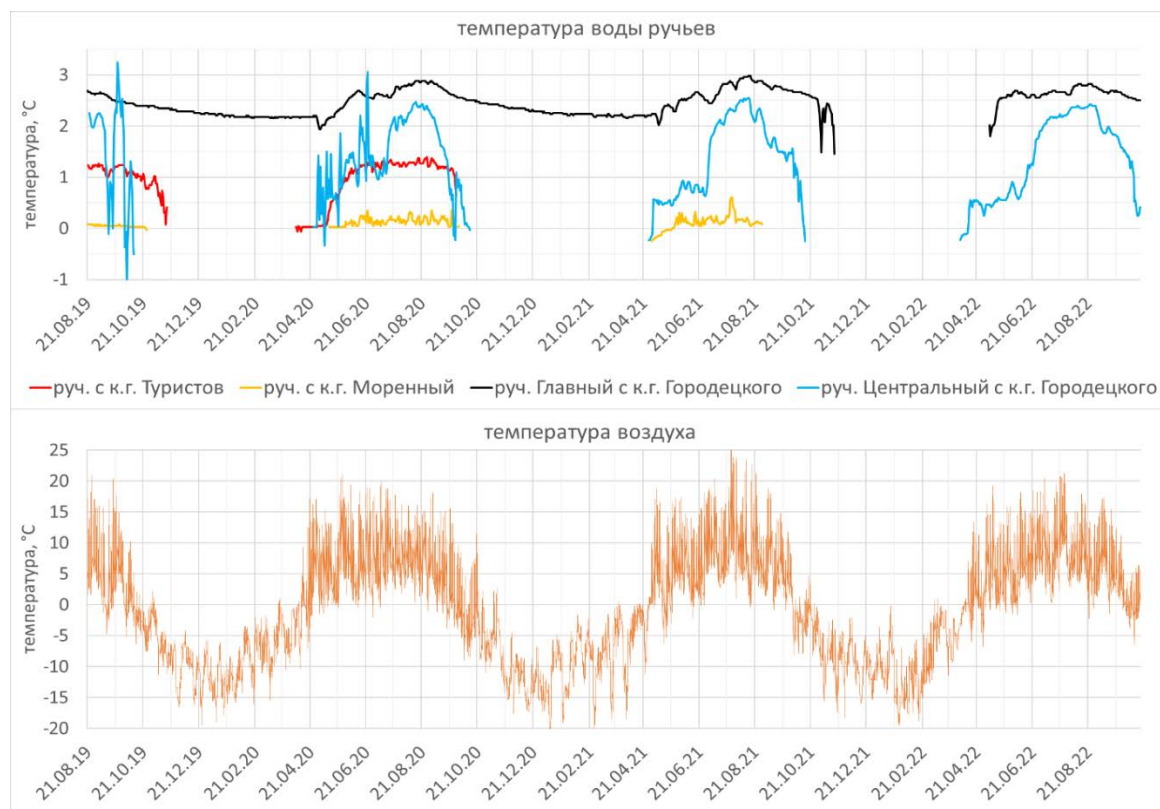


Рис. 1 Температура воды ручьев, вытекающих из каменных глетчеров (к.г.), и температура воздуха с августа 2019 по октябрь 2022.

Химический состав воды ручьев. В августе 2019 г. было отобрано 19 проб воды, в июле 2021 г. – 55 проб воды атмосферных осадков, ручьев, стекающих с каменных глетчеров, выходов подземных вод, снега, льда ледника и двух рек в бассейне р. Озерная. Все воды относятся к ультрапресным с минерализацией от 4.7 до 142 мг/л. К наиболее минерализованным относятся воды некоторых ручьев (>124 мг/л), а также ручья, вытекающего из каменного глетчера Моренный (108-121 мг/л), воды озера (116 мг/л) и родники (84-126 мг/л). Самыми разбавленными являются воды ручьев с ледниковым питанием (12-57 мг/л), жидких осадков (20-40 мг/л), снега (4,7-17 мг/л) и льда ледника (7,7-20,7 мг/л). Воды ручьев, стекающих с разных каменных глетчеров, отличаются характерными значениями общей минерализации: 62.7-71.4 мг/л для каменного глетчера Городецкого, 108-122 мг/л для Моренного и 103-112 мг/л для Туристов. Доля ионов магния относительно понижена в ручьях с каменного глетчера Моренный (5-16%), повышена в ручьях с каменного глетчера Туристов (14-37%) и имеет средние значения в ручьях с каменного глетчера Городецкого (11-31%). Доля сульфат-ионов в ручьях с глетчера Городецкого выше (5-8%), чем в ручьях с глетчера Моренного (2-4%).

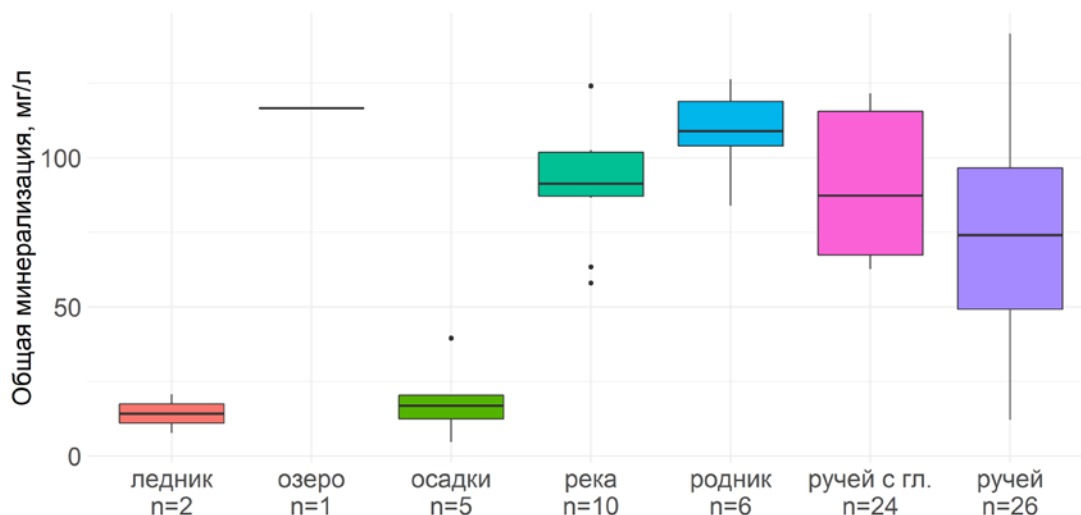


Рис. 2 Диаграммы размаха значений общей минерализации воды в отобранных пробах по группам, мг/л.

Все опробованные воды относятся к гидрокарбонатно-кальциевым (по классификации О.А. Алекина), кроме одной пробы осадков и двух проб снега, которые относятся к гидрокарбонатно-натриевым водам (Рис. 2).

Выводы

Каменные глетчеры оказывают существенное влияние на водный режим, температуру и химический состав водотоков, формирующихся выходами воды из них. Они отличаются практически полным отсутствием внутрисуточных колебаний уровня, температуры и удельной электропроводности воды, которые ярко выражены в летний период у рек и ручьев с ледниковым питанием. Некоторые выходы воды из каменных глетчеров не перемерзают зимой, что говорит о значительных запасах подземных вод. Воды каждого из трех изученных каменных глетчеров отличаются характерной минерализацией, температурой и соотношением основных ионов. Стабильный сток с каменных глетчеров может играть важную роль в поддержании речного стока в периоды пониженной водности рек.

Благодарности

Работа выполнялась за счет проекта НИОКТР 122012400106-7 «Подземные воды криолитозоны: закономерности формирования и режима, особенности взаимодействия с поверхностными водами и мерзлыми породами, перспективы использования» и проекта НИОКТР 122011800064-9 «Строение и ключевые этапы эволюции континентальной криолитозоны в неоплейстоцене и голоцене».

Acknowledgments

The work was carried out at the expense of the project NIOKTR 122012400106-7 "Groundwater of the permafrost zone: patterns of formation and regime, features of interaction with surface water and frozen rocks, prospects for use" and the project NIOKTR 122011800064-9 "Structure and key stages in the evolution of the continental permafrost zone in the Neopleistocene and Holocene".

Список литературы

1. Вилесов Е.Н., Горбунов А.П., Морозова В.Н., Северский Э.В. Деградация оледенения и криогенез на современных моренах Северного Тянь-Шаня // Криосфера Земли. 2006. т. X. № 1. С. 69–73
2. Галанин А.А. Каменные глетчеры северо-востока Азии: картографирование и географический анализ // Криосфера Земли. 2009. т. XIII. № 4. С. 49–61

3. Галанин А.А., Оленченко В.В., Христофоров И.И., Северский Э.В., Галанина А.А. Высокодинамичные каменные глетчеры Тянь-Шаня. Криосфера Земли. 2017. т. XXI. № 4. С. 58–74 DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-4(58-74)
4. Глазовский А.Ф. Каменные глетчеры бассейна р. Бол. Алмаатинки (Заилийский Алатау) // Криогенные явления высокогорий. Новосибирск. Наука. 1977. с. 85–92.
5. Горбунов А.П., Горбунова И.А. География каменных глетчеров мира. М.: Т-во научных изданий КМК, 2010. 131 с.
6. Горбунов А.П., Железняк М.Н., Северский Э.В. Оценка объемов подземных льдов в горной системе Тянь-Шаня // Криосфера Земли. 2018. т. XXII. № 6. С. 35–44
7. Марченко С.С. Криолитозона Северного Тянь-Шаня: прошлое, настоящее, будущее. Якутск: ИМЗ СО РАН. 2003. 106 с.
8. Медеу А.Р., Пиманкин А.В., Гонтарь М.И. и Пиманкина Н.В. Предварительные результаты геофизического исследования каменного глетчера Моренный // География и водные ресурсы. 2021. №4. С. 5-9
9. Bolch, T., Marchenko, S. Significance of Glaciers, Rockglaciers, and Ice-Rich Permafrost in the Northern Tien Shan as Water Towers under Climate Change Conditions // Proceedings of Workshop ‘Assessment of Snow, Glacier and Water Resources in Asia, Almaty, Kazakhstan, 28–30 November 2006, IHP-HWRP: Koblenz, Germany, 2009. pp. 199–211.
10. Brighenti, S, Tolotti, M, Bruno, MC, et al. After the peak water: the increasing influence of rock glaciers on alpine river systems // Hydrological Processes. 2019. 33. 2804–2823. <https://doi.org/10.1002/hyp.13533> (b)
11. Brighenti, S., Tolotti, M., Bruno, M.C., Wharton, G., Pusch, M.T., Bertoldi, W. Ecosystem shifts in Alpine streams under glacier retreat and rock glacier thaw: A review // Sci. Total Environ. 2019. 675. 542-559. (a)
12. Corte A. Rock glaciers // Biuletin Periglacjalny. 1976. №26. P. 125-127
13. Jones, D., Harrison, S., Anderson, K., Shannon, S., and Betts, R. Rock glaciers represent hidden water stores in the Himalaya // Sci. Total Environ. 2021. 793. 145368. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145368>.
14. Shahgedanova, M., Afzal, M., Hagg, W., Kapitsa, V., Kasatkin, N., Mayr, E., Rybak, O., Saidaliyeva, Z., Severskiy, I., Usmanova, Z., Wade, A., Yaitskaya, N. and Zhumabayev, D. Emptying water towers? Impacts of future climate and glacier change on river discharge in the Northern Tien Shan, Central Asia // Water. 2020. 12 (3). 627. doi: <https://doi.org/10.3390/w12030627>

Измерения расходов воды и учет водного стока в приливной устьевой области Северной Двины

С.В. Лебедева^{1*}, Л.С. Одоев², Е.Д. Панченко^{3,4}, А.М. Алабян^{3,4}, Н.А. Демиденко⁵,
М. Льюменс⁶, Л.А. Турыкин⁴

¹Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург

²Северное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, г. Архангельск, Россия

³Институт водных проблем РАН, г. Москва

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

⁵Институт океанологии РАН, г. Москва

⁶Royal HaskoningDHV, г.Роттердам, Нидерланды

hydrosima@gmail.com

Аннотация. Выполнен анализ опыта и результатов измерений расходов воды в устьевой области Северной Двины в условиях низкой летней межени и значительного влияния приливов по экспедиционным работам авторов и по архивным данным. Представлены результаты одновременных измерений расходов воды в основных рукавах дельты в течение приливного цикла в условиях летней межени в августе 2022 г. Измерения выполнялись одновременно 4 лодками, оснащенными акустик-доплеровскими измерителями течений. За два приливных цикла были получены 13-часовые серии измерений в 5 основных рукавах дельты и в ее вершине. Подобный полевой эксперимент был выполнен впервые. Рассмотрены вызванные влиянием приливов неопределенности учёта водного стока в замыкающем створе реки Северной Двины в условиях низкой межени.

Ключевые слова: приливная устьевая область, распределение расходов воды по рукавам, акустик доплеровский измеритель течений.

Flow discharge measurements in the Northern Dvina tidal estuary

S.V. Lebedeva^{1*}, L.S. Odoyev², E.D. Panchenko^{3,4}, A.M. Alabyan^{3,4}, N.A. Demidenko⁵,
M. Leummens⁶, L.A. Turikin⁴

¹State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

²Northern Agency for Hydrometeorology and Environmental Monitoring; Arkhangelsk Russia

³Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences

⁴Lomonosov Moscow State University

⁵Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences

⁶Royal HaskoningDHV, Rotterdam, Netherlands

hydrosima@gmail.com

Abstract. In the presented work, the authors analyze the experience of flow discharge measurements carried out in the Northern Dvina tidal estuary in 2013, 2021 and 2022, as well as some historical measurement data. The unique discharge measurement campaign conducted in the main delta branches over full tidal cycle under summer low water conditions in August 2022. The measurements were carried out simultaneously by 4 boats equipped with acoustic Doppler current profilers. 13-hour series of measured discharges were obtained in 5 main branches of the delta and at its upstream boundary, which allowed to analyse both spatial and temporal flow variability. The similar measurements at the station Ust-Pinega (92 km upstream the delta top) in August 2021 allowed to evaluate the accuracy of river runoff monitoring at low-water season under tidal influence.

Keywords: tide, river delta, mouth area, ADCP, flow discharge measurement

Введение

В приливном устье крупной реки особые трудности в количественную оценку гидрологических характеристик вносит их большая пространственная и временная изменчивость. В основе устьевых гидрологических процессов лежит динамика потока, с которой связаны все другие. При изучении динамики потока сложного природного объекта нельзя обойтись без натурных наблюдений. Измерения гидрологических характеристик в приливном устье требует учета целого ряда особенностей, которые могут приводить к ошибкам измерений, расчетов и выводов. Например, оценка распределения расходов по рукавам в приливной дельте осложнена влиянием приливных, нагонных условий.

Устьевая область Северной Двины – микроприливно-нагонная (величина прилива на морском крае дельты составляет 1.0-1.5 м), однако из-за значительного переуглубления русла дальность распространения приливных колебаний уровня воды более 135 км от морского края дельты, дальность распространения обратных течений в межень доходит до 90 км от морского края дельты (рис.1). В дельте Северной Двины расходы воды изменяются под воздействием прилива (с периодичностью около 12,5 часов) почти при любой водности реки во все фазы водного режима, поэтому измерение расходов требует наблюдений в течение не менее 12,5 часов в каждом створе.

Целями представляемого исследования являются анализ ошибок учета речного стока в замыкающем створе Северной Двины и распределения расходов воды по рукавам приливной дельты в условиях значительного влияния приливов и ветровых нагонов, а также представить результаты современных измерений расходов воды в рукавах дельты Северной Двины в низкую летнюю межень, сравнить их с архивными данными.

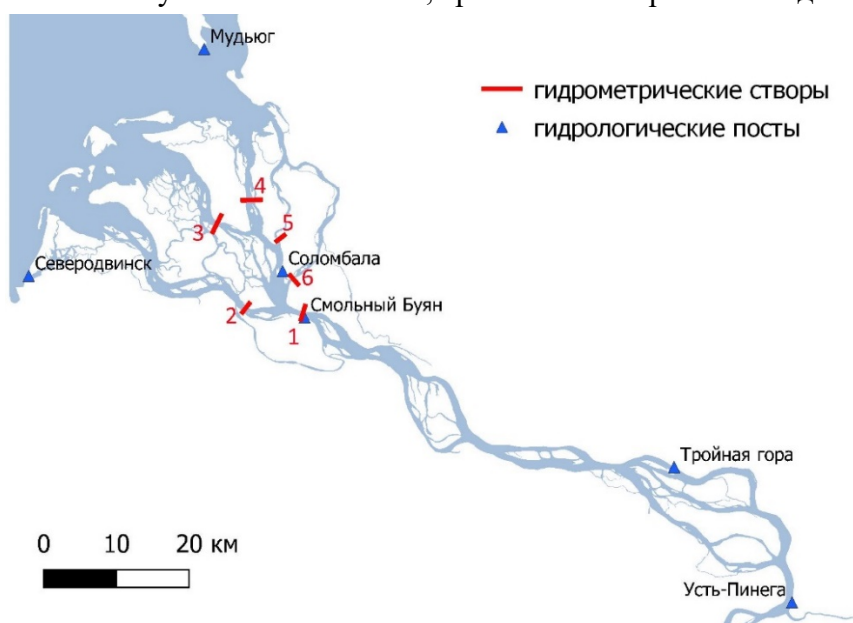


Рис. 1 Схема устьевого участка Северной Двины.

Материалы и методы исследования

Используются данные об измеренных авторами расходах воды в устьевой области Северной Двины в экспедициях 2013, 2021, 2022 гг. в условиях низкой летней межени, когда воздействие приливов на сток и течения особенно велико. В условиях обратных приливных течений за приливо-отливный цикл через сечения проходит некоторый объем воды в сторону моря ($W_{отл}$) и некоторый объем в обратном направлении ($W_{пр}$). Чтобы получить результирующий за приливный цикл расход воды, нужно определить обе эти составляющие и их разность разделить на общую длину приливо-отливного цикла ($T_{отл}+T_{пр}$) [1]:

$$Q = \frac{W_{\text{отл}} - W_{\text{прил}}}{T_{\text{отл}} + T_{\text{прил}}}$$

Для этого измерения расходов воды в каждом створе проводятся в течение всего приливного цикла (около 12,5 часов).

Оценки распределения расходов воды по рукавам в условиях разной водности реки проводились разными организациями несколько раз в течение 20 века. Наилучшим образом представлены и проанализированы результаты измерений, проведенных Северодвинской устьевой станцией (СДУС) под руководством ГОИН им. Н.Н. Зубова в 1959-1960 гг. [1], в 1979-1980 гг. [2]. При этом наблюдения расходов в рукавах дельты в условиях низкой межени в условиях полного разворота течений во всей дельте (расход в Усть-Пинеге менее 3000 м³/с) выполнены лишь единожды в августе 1960 г. Для оценки распределения расходов воды по рукавам дельты необходимо проводить измерения в рукавах и в вершине дельты одновременно. В 1960 г. измерения в 5 основных рукавах и в вершине дельты удалось провести в течение 8 дней (2-9 августа), по одному створу в день. При этом на каждом створе измерения на всех вертикалях проводились одновременно морскими вертушками, скорости на каждой вертикали измерялись в 5 точках [1].

В 2010 и в 2013 г. в рамках совместных работ СДУС и ГОИН под руководством В.Ф.Полонского для измерения расходов воды в рукавах дельты Северной Двины впервые использовался акустик-доплеровский измеритель течений (ADCP) Rio Grande [3]. Его использование в разы упрощает измерение расходов и повышает их точность в условиях быстрой изменчивости скоростей течения. Однако, в виду того, что использовался только один прибор, наличия погодных и ряда технических препятствий, измерения расходов в 5 основных рукавах и в вершине дельты были проведены в течение 12 дней (20-31 июля 2013 г.), за это время приливы менялись с сизигийных на квадратурные, расход воды в Усть-Пинеге по данным ежегодника изменялся на 20 %.

Выполнявшиеся для устьевого участка Северной Двины расчеты распределения расходов по рукавам на численной модели [4, 5], показали огромную связь водоносности каждого из рукавов с уровнями воды на морском крае дельты, а также изменчивость результирующего расхода воды от одного приливного цикла в другому.

В полевом эксперименте, реализованном в августе 2022 г. в рамках проекта РФФИ № 19-35-60032, было задействовано 4 прибора ADCP и 4 лодки, каждая из которых проводила измерения в одном створе. Так, измерения расхода в течение приливного цикла (не менее 12,5 часов) в 6 створах (Рис. 1) были выполнены за два дня 9, 10 августа. Оба дня синхронно с измерениями в трех из пяти створов в основных рукавах измерялись расходы воды в створе 1 (в вершине дельты у поста Смольный Буян). Расположение гидрометрических створов выбрано таким же, как и при измерениях в 1960, 2013 гг.

Результаты и выводы

Мониторинг водного стока с водосбора реки с приливным устьем должен быть организован в соответствии с дальностью проникновения влияния приливов на скоростной и уровенный режим. Известно, что в летнюю межень при низком стоке Северной Двины приливные колебания уровня воды достигают замыкающего расходного створа в п. Усть-Пинеге (135 км от морского края дельты), и расход воды, определенный по срочным уровенным наблюдениям в этот период, может не отражать величины реального речного стока, однако не было опубликовано подтверждающих это фактических наблюдений. 24 августа 2021 г. в гидрометрическом створе поста Усть-Пинеге выполнены измерения расходов воды в течение приливного цикла с помощью ADCP River Ray. Изменения уровня воды, то есть величина приливного колебания в створе измерений составила 5-7 см, расход воды при этом изменялся от 1400 м³/с до 1870 м³/с (Рис. 2). Результирующий расход воды за приливный цикл составил 1720 м³/с, измеренные максимальный и минимальный расход воды отличаются от него соответственно на 9 и 18 %.

Расход воды на 24 августа 2021 г., который определен по связи расходов и уровней $Q(H)$ для поста Усть-Пинега (использующейся в ФГБУ «Северное УГМС») и данным двухсрочных наблюдений на посту, составляет $1680 \text{ м}^3/\text{с}$. Диапазон изменения расхода воды определенного по срочному уровню воды при такой величине приливных колебаний составляет от 1640 до $1750 \text{ м}^3/\text{с}$. Если принять результирующий за приливный цикл расход $1720 \text{ м}^3/\text{с}$ за истинный, то ошибки его определения по срочному уровню воды на посту составили бы от 2 до 5 %. Таким образом, несмотря на значительную изменчивость расхода в замыкающем створе под действием приливов, действующая $Q(H)$ обеспечивает необходимую точность определения расхода воды по данным наблюдений речного гидрологического поста. Это связано с тем, что изменение расхода в течение приливного цикла здесь связано в большей степени с изменением скоростей течения, чем уровней воды. Тем не менее из данного полевого эксперимента следует, что при измерении межениных расходов воды в створе г.п. Усть-Пинега при низкой водности реки в летнюю межень принимать во внимания изменчивость скоростей течения из-за прилива при выборе времени измерений необходимо.

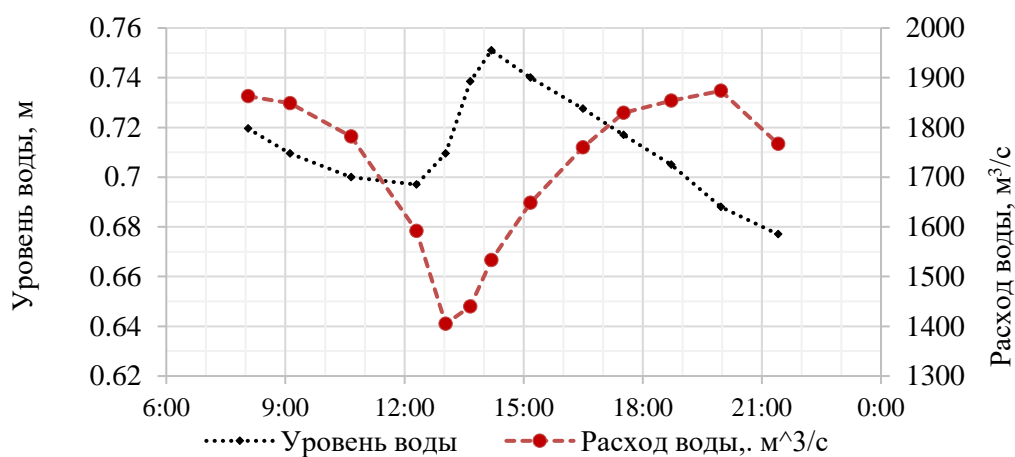


Рис. 2 Измеренные расходы и уровни воды в гидрометрическом створе поста р. Северная Двина – п. Усть-Пинега 25 августа 2021 г.

Результаты измерения расходов в основных рукавах дельты в течение 9-10 августа 2022 г. представлены на Рис. 3. Измерения выполнялись два приливных цикла в разные дни, однако представлены на одном графике, т.к. время переведено в водные часы (нулевой час соответствует времени уровня полной воды по посту Соломбала, длина приливного цикла приравнена к 12 водным часам). Впервые расходы в рукавах были измерены действительно синхронно (9 августа – створы 1, 2, 3, 6; 10 августа – створы 1, 2, 4, 5). Результирующий расход воды в вершине дельты (створ 1 у г.п. Смольный Буян) в оба дня получился примерно одинаковым: 1540 и $1572 \text{ м}^3/\text{с}$. При этом отливный расход составил $6000 \text{ м}^3/\text{с}$ из реки в море, а на приливе – $3890 \text{ м}^3/\text{с}$ из моря в реку.

Результаты трех экспедиционных исследований распределения расходов по рукавам представлены в Табл.. За 100 % во всех трех случаях принят расход, измеренный в вершине дельты (створ 1), несмотря на то, что в данных 1960 г. и 2013 г. он определен не в те же дни, когда измерялись расходы в рукавах.

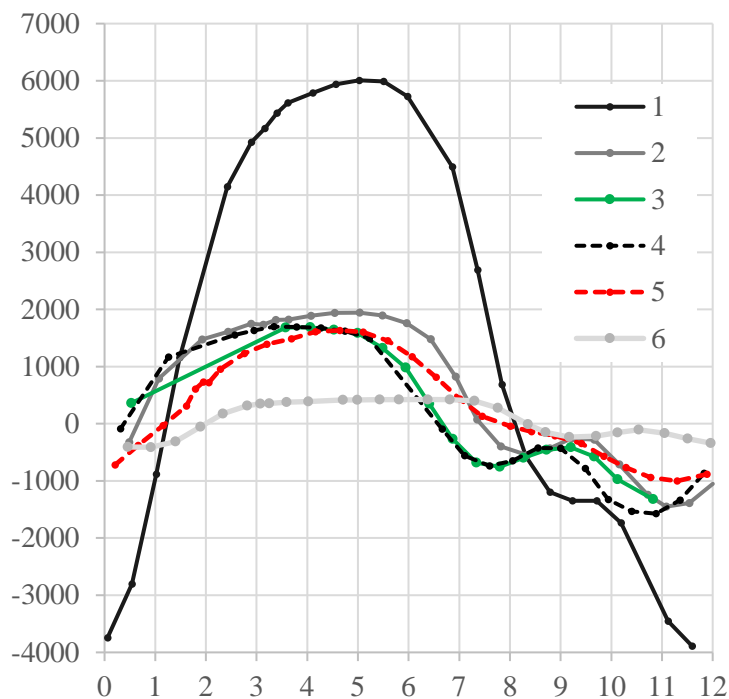


Рис. 3 Изменение расходов воды в рукавах за приливный цикл по водным часам в августе 2022 г. (номера соответствуют Рис.1).

В период измерений во всех трех случаях не было ярко выраженных ветровых сгонов или нагонов, однако за период измерений в 1960 и 2013 гг. квадратурные приливы сменялись сизигийными: изменялась амплитуда колебаний и средний уровень моря. За период 2-10 августа 1960 г. расход воды в Усть-Пинеге изменялся в пределах 1080-1050 м³/с, уровни малой воды по Соломбале – от 28 до 50 см, уровни полной воды – от 108 до 130 см над нулем графика поста, величина прилива – от 60-70 см до 90-95 см [1]. В период измерений 20-31 июля 2013 г. расход воды в Усть-Пинеге изменялся в диапазоне 1210-1510 м³/с, уровни малой воды – от 46 до 71 см, уровни полной воды – от 116 до 173 см над нулем графика поста, величина прилива – от 75-80 до 100-105 см. В период измерений 9-10 августа 2022 г. расход воды в Усть-Пинеге (и 5 дней до измерений) изменялся в диапазоне 1630-1730 м³/с, уровни малой воды – от 38 до 57 см, уровни полной воды – от 124 до 141 см над нулем графика поста, величина прилива – от 83 до 87 см.

Табл. Результаты (за приливный цикл) расходы воды по данным измерений в разные годы в условиях низкой летней межени

№	Створ	2-9 августа 1960 [1]			20-31 июля 2013			9-10 августа 2022		
		Дата	Расход, м ³ /с	% общего	Дата	Расход, м ³ /с	% общего	Дата	Расход, м ³ /с	% общего
1	Смольный Буян	02.08.1960	1201	100	20.07.13	1100	100	09.08.22	1540	100
	Смольный Буян	-	-	-	-	-	-	10.08.22	1572	100
2	Никольский	03.08.1960	530	44	21.07.13	264	24	09.08.22	484	31
	Никольский	-	-	-	-	-	-	10.08.22	443	28
3	Мурманский	04.08.1960	236	20	29.07.13	175	16	09.08.22	344	22
4	Корабельный	05.08.1960	218	18	30.07.13	266	24	10.08.22	213	14
5	Маймакса	08.08.1960	124	10	26.07.13	197	18	10.08.22	339	22
6	Кузнечиха	09.08.1960	25	2	31.07.13	41	4	09.08.22	73	5

Таким образом, в наиболее единообразных гидрологических условиях были проведены измерения 2022 г., в наименее единообразных – измерения 2013 г. Сумма

долей от общего стока в процентах наиболее далека от 100 именно для измерений 2013 г. (86%). В 1960 г. – 94 %, в 2022 г. – 91 %. В 1960 г. измерения с помощью морских вертушек уступали в точности возможностям ADCP.

Принято считать, что из-за низкой мутности воды морфометрия и пропускная способность рукавов дельты Северной Двины меняется незначительно в течение времени [1]. Из Рис.4 видно, что большая доля стока через Никольский рукав – 44 % в 1960 г. не подтверждается измерениями 2013 и 2022 гг.; доля стока протоки Маймаксы по измерениям 2013 и 2022 гг. увеличилась по сравнению с 1960 г. на 8-12 %. Увеличение водоносности Кузнечихи и Маймаксы может быть связано с ростом землечерпательных работ. Доли стока через Корабельный рукав и Мурманский показывают не только отсутствие однозначной тенденции в изменениях, но и возможный разброс данных измерений, который может быть вызван изменчивостью в длинный период измерений уровней воды в Двинском заливе из-за изменчивости приливов, нагонных явлений, вызываемых ветрами или распределением в пространстве атмосферного давления.

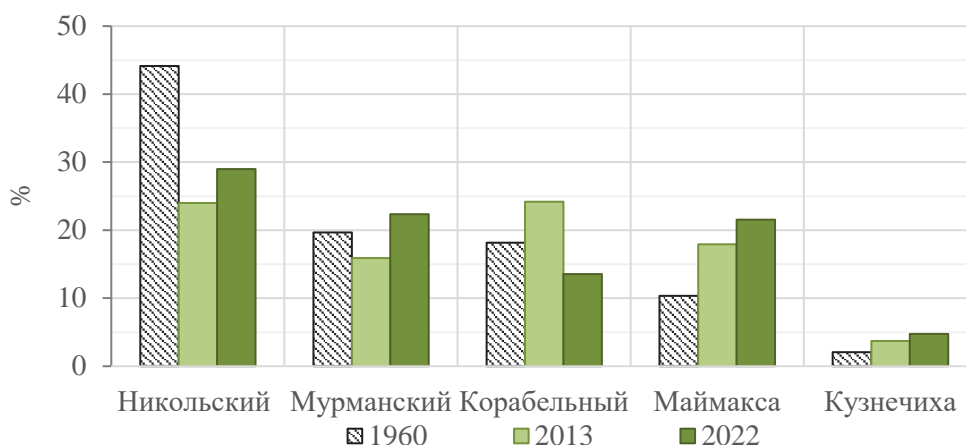


Рис. 4 Доли стока в основных рукавах дельты по данным измерений в разные годы в условиях низкой летней межени.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 19-35-60032).

Acknowledgments

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 19-35-60032.

Список литературы

1. Гидрология устьевой области Северной Двины. М.: Гидрометеиздат, 1965. 376 с.
2. Полонский В.Ф., Кузьмина В.И. О распределении стока в дельте Северной Двины // Труды ГОИН, 1986. Вып.179. С. 49–56.
3. Полонский В.Ф., Мишин Д.В. Исследование нестационарных водных потоков в приливном устье Северной Двины // Труды ГОИН, 2013. Вып. 214. С. 149–165.
4. Лебедева С. В. Динамика потока в приливном многорукавном устье крупной реки (на примере р. Северная Двина): Автореф... дис. канд. геогр. наук. - Москва: МГУ, 2016. - 26 с.
5. Alabyan A.M., Lebedeva S.V. Flow dynamics in large tidal delta of the Northern Dvina river: 2D simulation // Journal of Hydroinformatics, 2018. Vol. 20. no. 4. P. 798–814. <https://doi.org/10.2166/hydro.2018.051>

Динамика стока Колымы в XXI веке под влиянием меняющегося климата

А.А. Лисина^{1,2*}, А.А. Сазонов^{1,2}, И.Н. Крыленко^{1,2}, А.С. Калугин², Н.Л. Фролова¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

²Институт водных проблем РАН, г. Москва
lisanastya99@mail.ru

Аннотация. В качестве инструмента исследования особенностей водного режима и изучения его динамики в последние годы получили распространение физико-математические модели формирования речного стока. В данном исследовании для бассейна р. Колымы впервые применен информационно-моделирующий комплекс ECOMAG, рассчитывающий ежесуточные расходы воды в заданных створах на основе метеорологических данных с разрешением один сутки. Калибровка и верификация показали хорошую воспроизводимость ECOMAG фактических расходов воды для двух створов на р. Колыме и удовлетворительную воспроизводимость на притоке – на Большом Анюе. Для гидроствора Колымское в 283 км от устья Колымы годовой сток воды увеличился по данным наблюдений на 5,2% (от 99,4 км³ в 1979–1999 гг. до 104,5 км³ в 2000–2013 гг.)

Расчеты по модели воспроизводят климатические изменения для периода 1997–2013 гг. относительно 1979–1997 гг.: рост среднегодовых расходов воды на р. Колыма, увеличение стока в конце лета – начале осени, снижение продолжительности зимней межени. Анализ климатических изменений в соответствующие периоды продемонстрировал увеличение среднегодовой температуры на 1,3°C и годовой суммы осадков на 8,3% с наиболее активными изменениями в марте, ноябре и декабре.

Использование в качестве входных данных в модель ECOMAG ансамбля глобальных климатических моделей позволило получить оценки возможного изменения стока р. Колымы до 2100 г. при реализации четырех различных сценариев RCP. Рассмотрены возможные изменения в XXI веке годового объема стока, а также максимальных расходов воды и дат его прохождения, объемов половодья, зимней межени и летне-осеннего периода. При реализации любых сценариев расчеты демонстрируют увеличение годового и летне-осеннего стока Колымы.

Ключевые слова: криолитозона, гидрологический режим, ECOMAG, чувствительность стока, Колыма.

Variations of the Kolyma runoff in the XXI century under the changing climate conditions

A.A. Lisina^{1,2*}, A.A. Sazonov^{1,2}, I.N. Krylenko^{1,2}, A.S. Kalugin², N.L. Frolova¹

¹University Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Water problem Institute RAS, Moscow, Russia
lisanastya99@mail.ru

Abstract. In recent years, physical-mathematical models for river discharge formation have gained popularity as tools to investigate water regime peculiarities and their dynamics. In this study, the information-modeling complex ECOMAG is employed for the first time for the Kolyma River basin. ECOMAG calculates daily water flow rates at specified points based

on meteorological data with a one-day resolution. Calibration and verification demonstrated ECOMAG's ability to accurately reproduce observed water discharges for two points on the Kolyma River and satisfactory performance on its tributary, the Bolshoi Anyui River. For the Kolyma point located 283 km from the river's mouth, the annual water flow increased by 5.2% (from 99.4 km³ in 1979–1999 to 105 km³ in 2000–2013). ECOMAG effectively captures changes in the annual water discharge and its intra-annual distribution.

Calculations reproduce climate changes for the period 1997–2013 relative to 1979–1997: an increase in average annual runoff on the Kolyma River, an increase in runoff in late summer – early autumn, a decrease in the duration of winter low flow period. The analysis of climate changes in the corresponding periods showed an increase in the average annual temperature by 1.3 °C and annual precipitation by 8.3% with the most active changes in March, November and December.

The use of an ensemble of global climate models as input data to the ECOMAG model allowed us to obtain estimates of possible changes in the flow of the Kolyma River up to 2100 with the implementation of four different RCP scenarios. The possible changes in the annual volume of runoff in the XXI century, as well as the maximum water consumption and their dates, flood volumes and periods of low runoff are analyzed. Under any scenarios, calculations show an increase in the annual and summer-autumn runoff of the Kolyma

Keywords: permafrost, hydrological regime, ECOMAG, runoff sensitivity, Kolyma.

Введение

В последние годы для исследования особенностей гидрологического режима и изучения его динамики все чаще применяются современные физико-математические модели формирования речного стока с распределенными параметрами. В качестве объекта исследования в работе выбран бассейн р. Колыма – крупнейший речной бассейн, полностью расположенный в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты. В работе для бассейна Колымы впервые применен ИМК ECOMAG, широко применяющийся для арктических бассейнов в условиях изменяющегося климата [3].

Площадь бассейна р. Колымы составляет 647 000 км², около половины его территории занимает Магаданская область, примерно по четверти приходится на Республику Якутия и Чукотский АО, к Хабаровскому краю относится менее 1% бассейна. Колыма образуется при слиянии рек Аян-Юрях и Кулу, которые берут начало на Нерском плоскогорье. Река имеет протяженность 2129 км и впадает в Колымский залив Восточно-Сибирского моря. В соответствии с орографическими условиями в бассейне Колымы можно выделить две зоны: к горной местности относятся верхнее и среднее течение, к равнинной – нижнее. Крупнейшими реками бассейна, помимо Колымы, являются р. Омолон (площадь бассейна $F = 113000$ км²), р. Анюй ($F = 107000$ км²), р. Большой Анюй ($F = 57300$ км²), р. Малый Анюй ($F = 49800$ км²), р. Коркодон ($F = 49800$ км²), р. Ясачная ($F = 35900$ км²), р. Березовка ($F = 28400$ км²). Сток р. Колымы зарегулирован Колымским каскадом ГЭС, включающим в себя две ГЭС сезонного регулирования: верхняя ступень – Колымская ГЭС (1894 км от устья) и нижняя ступень – Усть-Среднеканская ГЭС (1678 км от устья).

Материалы и методы исследования

В работе используется информационно-моделирующий комплекс (ИМК) ECOMAG, представляющий собой пространственно-распределенную модель гидрологического цикла и формирования стока. В основе пространственной структуры ECOMAG лежат отдельные ландшафтные единицы (“элементарные водосборы”), образующие нерегулярную сетку. Подобная схематизация позволяет передать пространственные неоднородности рельефа, почв, типов землепользования и учесть

пространственные особенности гидрометеорологических полей [Мотовилов, Гельфан, 2018].

Расчет по модели производился в створах, для которых имелись продолжительные ряды наблюдений: в двух створах на Колыме, Колымское (283 км от устья) и Среднеколымск (641 км от устья), а также на крупном притоке – р. Большой Анюй в створе станции Константиновская. Так как сток Колымы зарегулирован, в модели использовались данные о сбросах воды Колымской ГЭС как условия на верхней границе участка. В качестве входной информации использованы ежесуточные расходы воды в исследуемых створах, взятые из гидрологических ежегодников и с сайта АИС ГМВО [1] за период 1979–2013 гг. Источником ежесуточных данных о температуре воздуха, количестве осадков и дефиците влажности послужили архивы наблюдений 37 метеостанций в исследуемом регионе.

ЕСОМАГ содержит набор физически обоснованных параметров, калибровка которых модели производился вручную путем расчета критерия Нэша-Сатклифа R_{NS}^2 , часто используемого на практике для оценки точности работы модели, и ошибки среднего BIAS, рассчитываемых по формулам:

$$R_{NS}^2 = 1 - \frac{\sum (q_{oi} - q_{si})^2}{\sum (q_{oi} - \bar{q})^2}$$

$$BIAS = \frac{Q_f - Q_s}{Q_f} \cdot 100\%$$

а также с помощью визуального сравнения фактических и смоделированных гидрографов. Значения R_{NS}^2 , превышающие принятое в практике пороговое значение 0,75, и $|BIAS| < 10\%$, характеризуют качество расчетов по модели как хорошее. При R_{NS}^2 , находящемся в диапазоне от 0,5 до 0,75, и $|BIAS|$ от 10% до 15% – как удовлетворительное [2]. При калибровке параметров модели приведенные выше критерии качества рассчитывались для трех створов и усреднялись с учетом веса, пропорционального площади бассейна для каждого створа.

Результаты и выводы

Воспроизводимость фактических данных моделью ЕСОМАГ

Расчеты продемонстрировали хорошую воспроизводимость моделью ЕСОМАГ фактических расходов воды (Табл.) для обоих створов на р. Колыме, гидроствор Колымское и г.Среднеколымск, для которых критерий Нэша-Сатклифа R_{NS}^2 за период верификации составил 0,87 и 0,85 соответственно, ошибка среднего – 1,31% и 1,92% соответственно. Качество расчетов для створа р. Большой Анюй – ГМС Константиновская с меньшей площадью водосбора по принятым грациям оказалось хуже: удовлетворительным по R_{NS}^2 ($0,50 \leq \dots < 0,75$), хорошим по величине ошибки среднего BIAS (менее 10% по модулю).

Табл. Значения критериев качества расчета суточного и месячного стока в бассейне р. Колымы для периодов калибровки и верификации.

Река – гидропост	Площадь бассейна, тыс.км ²	Расстояние от устья	Период калибровки 1979–1996 гг.		Период верификации 1997–2013 гг.			
			сутки	месяц	сутки		месяц	
			R_{NS}^2	BIAS, %	R^2	R_{NS}^2	BIAS, %	R^2
Колыма – гидроствор Колымское	526	283	0,90	1,58	0,94	0,82	1,92	0,85
Колыма – г. Среднеколымск	361	641	0,87	5,09	0,92	0,84	–1,31	0,87

Большой Анюй – ГМС Константиновская	49,6	67	0,51	5,25	0,87	0,51	7,26	0,79
--	------	----	------	------	------	------	------	------

Анализируемые ряды расходов воды были разделены на две половины: 1979–1996 гг. и 1997–2013 гг. На Рис. 1 для р. Колыма – гидроствор Колымское представлены типовые гидрографы, ординаты которых получены как средние расходы воды за каждую дату в среднем для двух периодов.

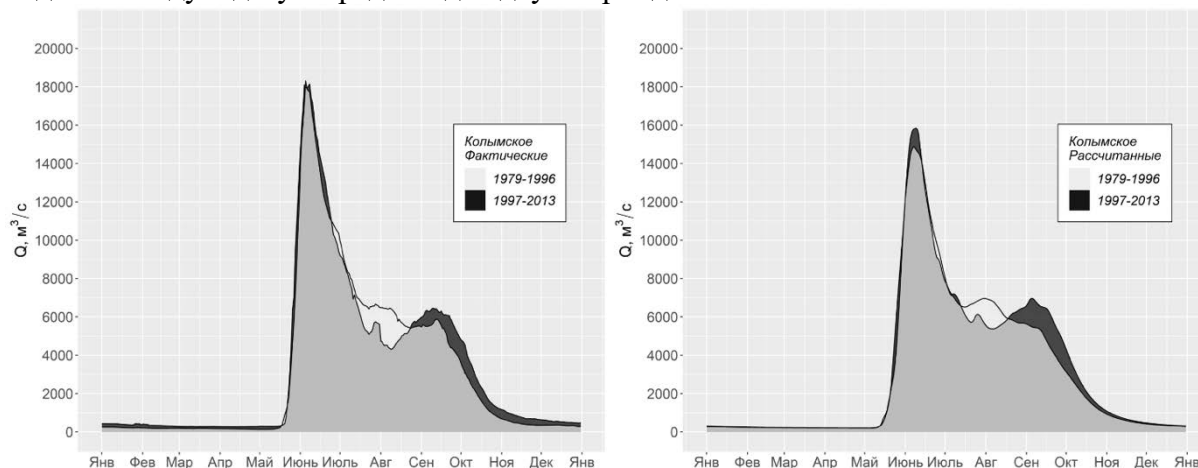


Рис. 1 Фактические и рассчитанные типовые гидрографы за периоды калибровки (1979–1996 гг.) и верификации (1997–2013 гг.) для р. Колыма – гидроствор Колымское.

ИМК ЕСОМАГ хорошо воспроизводит изменение объема годового стока: в гидростворе Колымское по результатам расчетов сток увеличился на 5,7% (от 95,6 км³ до 101,1 км³), а по фактическим рядам – на 5,2% (от 99,4 км³ до 104,5 км³). Для створа г. Среднеколымск рассчитанный годовой сток увеличился на 8,3% (от 68,4 км³ до 74,1 км³), фактический – на 15,9% (от 68,6 км³ до 79,6 км³). Для Большого Анюя снижение стока демонстрируют и данные наблюдений (на 9,2% – от 8,8 км³ до 8,0 км³), и расчеты по модели (на 10,8% – от 8,1 км³ до 7,2 км³).

Гидрографы (Рис. 1) иллюстрируют хорошую воспроизводимость ИМК ЕСОМАГ следующих внутригодовых изменений стока: смещения волны половодья на более ранние даты, более позднего наступления зимней межени и увеличения стока во второй половине августа – октябре. Однако стоит отметить, что расчеты по ЕСОМАГ несколько искажают изменения максимальных расходов воды. В створе р. Колыма – гидроствор Колымское по фактическим данным средние значения максимальных суточных расходов воды снизились на 0,5% (от 18300 м³/с до 18200 м³/с), тогда как рассчитанные значения для Колымского увеличились на 8,5% (от 14900 м³/с до 16100 м³/с). Подобные различия между фактическими и смоделированными данными в гидростворе Колымское для периода верификации связаны, вероятно, с тем, что с 1998 г. перестали производиться измерения скоростей течения в Колымском и значения расходов воды стали восстанавливаться по зависимостям $Q=f(H)$. Качество получаемых данных с сети Росгидромета ухудшилось.

Оценка возможных изменений стока р. Колыма в XXI веке на основе глобальных климатических моделей

Для оценки отклика стока р. Колыма к климатическим изменениям использованы данные четырех глобальных моделей (GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC5), входящих в проект CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5). Рассматривались четыре сценария антропогенного воздействия - RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5 (значения соответствуют радиационному воздействию в

Вт/м² на верхней границе атмосферы). По сценарным значениям температур воздуха и осадков запущены модель ECOMAG, в результате позволило получены ряды расходов воды Колымы в 2020-2099 гг. (Рис. 2 – 4).

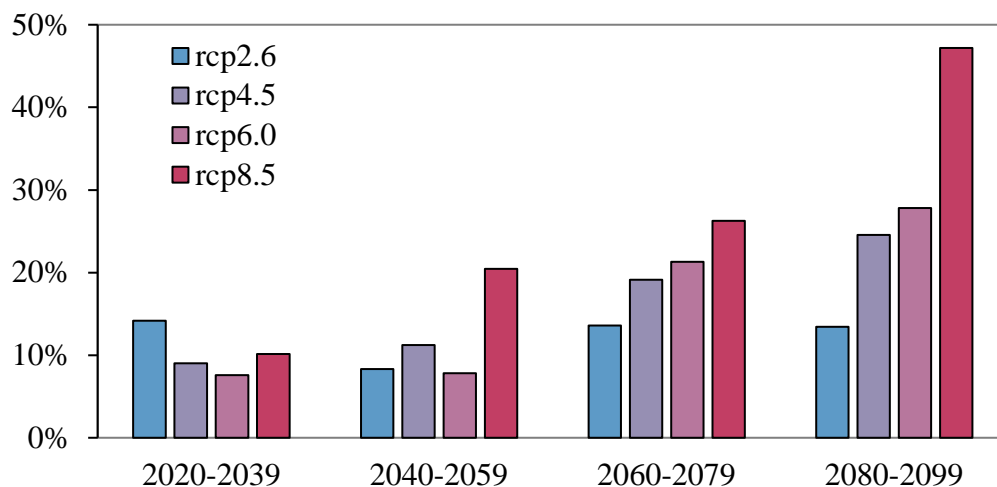


Рис. 2 Аномалии рассчитываемых значений годового стока для створа р. Колыма – Колымское (в % относительно текущих 109 км³ или 3460 м³/с).

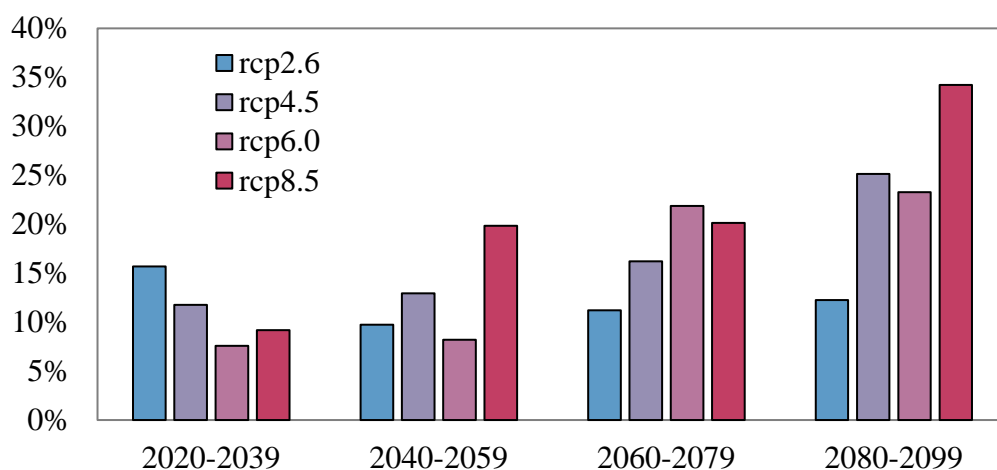


Рис. 3 Аномалии рассчитываемых значений стока в летне-осенний период для створа р. Колыма – Колымское (в % относительно текущих 43,5 км³ или 5070 м³/с).

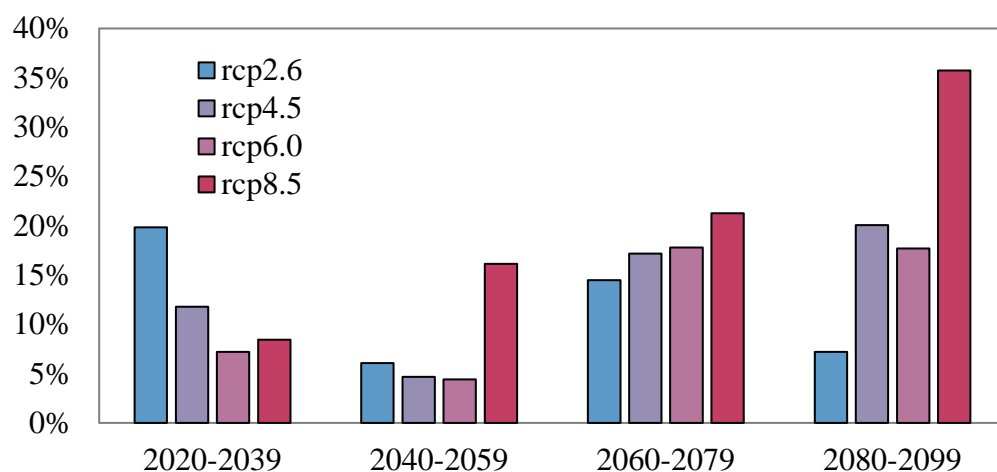


Рис. 4 Аномалии рассчитываемых значений максимального расхода воды для створа р. Колыма – Колымское (в % относительно текущих 23200 м³/с).

При рассмотрении сценария RCP 4.5, как наиболее вероятного, сток Колымы относительно текущих 109 км³ возрастет в 2020-2039 гг. на 9%, к 2040-2059 гг. – на 11%, к 2060-2079 гг. – на 19%, к концу века – на 25%. При этом сток в летне-осенний период и объем половодья вырастут к концу века также примерно на четверть.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-77-01097 - оценка изменений будущего стока) и темы FMWZ-2022-0001 Государственного задания ИВП РАН (моделирование стока за исторический период).

Acknowledgments

The work was supported by the Russian Science Foundation (RSF) (grant No. 23-77-01097 - estimation of future flow changes) and subject FMWZ-2022-0001 of the Governmental Order to WPI RAS (historical runoff modelling).

Список литературы

1. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [Электронный ресурс]: URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения 01.08.2023).
2. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М: Российская академия наук. 2018. 296 с.
3. Gelfan A., Motovilov Y., Krylenko I., Moreido V., Zakharova E. Testing the robustness of the physically-based ECOMAG model with respect to changing conditions // Hydrological Sciences Journal. 2014. 60 (7-8). P. 1266-1285.

Применение трёхмерной модели для изучения распределения термодинамических и биохимических параметров во внутренних водоемах

В.А. Ломов^{1,2,3*}, Д.С. Гладских^{1,4,5}, Е.В. Мортиков^{1,5,6}, Е.Е. Андросова^{3,7},
А.Ф. Селезнев⁴, А.В. Законнова⁸, В.И. Лазарева⁸

¹Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ, г. Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, Россия

³Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

⁴Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, г. Нижний Новгород, Россия

⁵Московский центр фундаментальной и прикладной математики, г. Москва, Россия

⁶Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, г. Москва, Россия

⁷ФГБУ «Гидрометцентр России», г. Москва, Россия

⁸Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, г. Борок, Россия
lomson620@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты применения трехмерной математической модели для исследования распределений гидролого-гидрохимических характеристик Рыбинского водохранилища в период летней температурной стратификации. Показано, что при задании различной конфигурации батиметрии водоема, результаты воспроизведения температурного режима могут отличаться. На примере численных экспериментов показано, как изменяется дисперсия температуры по горизонтальному сечению при идеализированной постановке без изменения глубин и при задании реальной батиметрии – во втором случае изменчивость температур по горизонтали значительно выше, особенно в придонных горизонтах, что объясняется относительной мелководностью водохранилища.

Ключевые слова: трехмерное численное моделирование, Рыбинское водохранилище, температурный режим водоема, кислородный режим водоема.

Application of a three-dimensional model to study the distribution of thermodynamic and biochemical parameters in inland waters

V.A. Lomov^{1,2,3*}, D.S. Gladskikh^{1,4,5}, E.V. Mortikov^{1,5,6}, E.E. Androsova^{3,7}, A.F. Seleznev⁴,
A.V. Zakonnova⁸, V.I. Lazareva⁸

¹Research computing center MSU, Moscow, Russia

²A.M. Obukhov Institute of atmosphere physics RAS, Moscow, Russia

³M.V. Lomonosov MSU Faculty of Geography, Moscow, Russia

⁴A.V. Gaponov-Grekhov Institute of applied physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

⁵Moscow center of fundamental and applied mathematics, Moscow, Russia

⁶G.I. Marchuk Institute of numerical mathematics RAS, Moscow, Russia

⁷Hydrometeorological center of Russia, Moscow, Russia

⁸I.D. Papanin Institute of inland water biology RAS, Borok, Russia
lomson620@mail.ru

Abstract. The article presents the results of applying a three-dimensional mathematical model to study the distributions of hydrological and hydrochemical characteristics of the Rybinsk reservoir during summer temperature stratification. The results showed that the simulation of temperature regime can vary in dependent of bathymetry

configuration of reservoir. Based on an example of numerical experiments, the values of temperature dispersion over a horizontal section were illustrated. In an idealized formulation of bathymetry with constant depths and with real bathymetry the differences between horizontal dispersion were revealed - in the second case, the horizontal temperature variability is much higher, especially in the near-bottom horizons, which is explained by the relative shallowness of the reservoir.

Keywords: Three-dimensional numerical modeling, Rybinsk reservoir, temperature regime of a reservoir, oxygen regime of a reservoir.

Введение

Наиболее распространенный метод исследования пространственно-временной изменчивости различных характеристик водных экосистем – это гидролого-гидрохимические синхронные съемки, которые включают в себя натурные наблюдения за термическим, гидрохимическим и другими состояниями водного объекта на опорных станциях наблюдений. В рамках таких исследований проводятся натурные наблюдения за распределением по глубине температуры, содержания растворенного кислорода и многими другими интересующими параметрами на опорных станциях водоема [1, 2]. Данный подход позволяет получить репрезентативные сведения о распределении изучаемых характеристик на основных частях акватории водного объекта. Однако, из-за ограниченного количества станций наблюдений, может возникать проблема интерполяции данных наблюдений на неохваченные в процессе съемки части акватории, что в свою очередь может привести к ошибкам в расчетах средних значений изучаемых параметров. Кроме того, гидролого-гидрохимические съемки проводятся на водоемах как правило несколько раз в год, что затрудняет оценку временной динамики гидрологических характеристик.

Помочь решить данную проблему может применение математических трехмерных моделей. Модель, откалиброванная по данным натурных измерений в различных точках акватории, позволит получить детальное представление о пространственном распределении полей гидрологических характеристик, и более точную оценку средних значений изучаемых параметров. При этом, важно правильно подобрать не только калибровочные параметры модели, но и с достаточной степенью детальности описать основные особенности рельефа водохранилища на расчетной сетке численной модели, так как от этого будет зависеть дисперсия значений в трехмерной модели, относительно одномерного осреднения.

Таким образом, на основании данных измерений на Рыбинском водохранилище, была протестирована трехмерная модель водоема, разработанная в НИВЦ МГУ [3], выбрана наиболее оптимальная сетка расчета и получены средние оценки таких характеристик, как температура и содержание растворенного кислорода в воде. По этим расчетам была проведена оценка ошибки осреднения данных наблюдений, полученных в ходе гидролого-гидрохимических съемок, относительно средних значений, полученных по модельным расчетам.

Материалы и методы

Рыбинское водохранилище – это крупное водохранилище Волго-Камского каскада, относится к водохранилищам котловинно-долинного типа. Оно имеет сложносочиненную морфологическую конфигурацию, которая представляет собой совокупность нескольких крупных затопленных речных долин – Шексны, Мологи, Волги. Водоохранилище имеет замедленный водообмен 1.4 и осуществляет сезонное регулирование стока.

Данные натурных наблюдений получены по результатам квазисинхронных гидролого-гидрохимических съемок, которые осуществлялись в ходе рейсовых

маршрутов по основным опорным точкам Рыбинского водохранилища [1, 2]. В программу съемок входили работы по измерению температуры и кислорода по глубине и сопутствующие наблюдения такие как измерение прозрачности воды, отбор проб на лабораторные анализы и др.

В качестве математического инструмента использовалась трехмерная численная модель термогидродинамики замкнутого водоема, основой которой является осредненная по Рейнольдсу система уравнений термогидродинамики в приближении Буссинеска и гидростатики [3, 4, 5]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -A(u) + D_H(u, \lambda_m) + D_z(u, K_m + v) - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^\eta \rho dz' + fv,$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -A(v) + D_H(v, \lambda_m) + D_z(v, K_m + v) - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_z^\eta \rho dz' - fu,$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -A(T) + D_H(T, \lambda_h) + D_z(T, K_h + \chi'),$$

$$\rho = \rho(T),$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + (\mathbf{u}_h \cdot \nabla_h) \eta = w.$$

Здесь $\mathbf{u} = (u, v, w)$ – вектор скорости, \mathbf{u}_h – горизонтальные компоненты, ρ – плотность воды, T – ее температура; K_m (λ_m) и K_h (λ_h) – коэффициенты вертикальной (горизонтальной) турбулентной вязкости и температуропроводности соответственно; v , χ' – коэффициенты молекулярной вязкости и температуропроводности, η – отклонение свободной поверхности от равновесного состояния, f – параметр Кориолиса.

Для расчета коэффициентов турбулентной вязкости и диффузии используется двухпараметрическое замыкание, включающее прогностические уравнения на кинетическую энергию турбулентности и скорость ее диссипации.

Описание биогеохимических процессов включает в себя уравнения для расчета концентраций и потоков биохимических веществ. Уравнения описывают перенос, диффузию и реакции для таких веществ как: метан (CH_4), кислород (O_2), углекислый газ (CO_2), живые и отмершие частицы фито- и зоопланктона и т.д., и имеют вид:

$$\frac{\partial C_{(i)}}{\partial t} + \left[\frac{\partial u_i C_{(i)}}{\partial x_i} + \frac{\partial w C_{(i)}}{\partial z} \right] = \left[\frac{\partial}{\partial x_i} (\lambda_b + \chi_b) \frac{\partial C_{(i)}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial z} (K_b + \chi_b) \frac{\partial C_{(i)}}{\partial z} \right] + R(.),$$

где $C_{(i)}$ – концентрации веществ, K_b – коэффициент вертикальной турбулентной диффузии, λ_b – коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии, χ_b – коэффициент молекулярной диффузии, член $R(.)$ описывает сколько молекул того или иного вещества было добавлено к раствору или извлечено из него в результате реакций.

В модель включены следующие биохимические процессы: комплекс реакций фотосинтез – дыхание, биохимическое потребление кислорода в воде и в донных отложениях, жизнедеятельность фито- и зоопланктона и другие процессы, связанные с генерацией и потреблением метана, моделью газообмена.

Результаты

Предварительно, перед сравнением результатов модели с данными наблюдений, были проведены эксперименты по определению чувствительности модели к заданию различной конфигурации батиметрии Рыбинского водохранилища. Для создания сетки глубин использовалась лоцманская карта Рыбинского водохранилища. В качестве данных метеорологического форсинга в экспериментах использовались данные реанализа NCEP-NCAR, который имеет относительно низкое (2.5°) пространственное и достаточное (6 ч) временное разрешение.

Были проведены численные эксперименты по воспроизведению в модели периода летней температурной стратификации в 2020 году при разном горизонтальном

разрешении сетки модели – от 64x64 до 256x256 ячеек по горизонтали. Результаты представлены на рисунке 1.

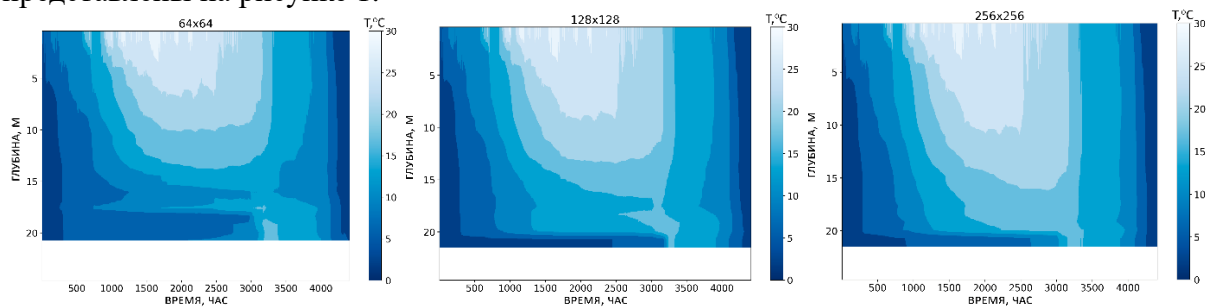


Рис. 1 Распределение температуры по глубине за период с мая по октябрь 2020 года по результатам расчета модели при горизонтальном разрешении 64, 128 и 256 ячеек.

Как можно видеть, при увеличении пространственного разрешения изменчивость температур в поверхностных горизонтах практически одинакова. При увеличении разрешения увеличивается глубина перемешанного слоя, а также становятся выше значения температуры придонных горизонтов.

Для дальнейших экспериментов нами применялось горизонтальное разрешение в 128x128 и 256x256 ячеек, так как при дальнейшем увеличении разрешения значимого прироста точности не наблюдается, при этом непропорционально увеличивается время машинного счета.

Важность использования именно трехмерной конфигурации модели показана в следующем эксперименте – была проведена оценка стандартного отклонения значений температуры в разных ячейках относительно осредненных по горизонтали температур. Расчет проводился для идеализированной конфигурации водоема – параллелепипеда с площадью Рыбинского водохранилища и глубиной 25 м, а также для реальной батиметрии водоема с разрешением сетки 128x128 горизонтальных ячеек. Значения стандартного отклонения в обоих экспериментах показаны на рисунке 2.

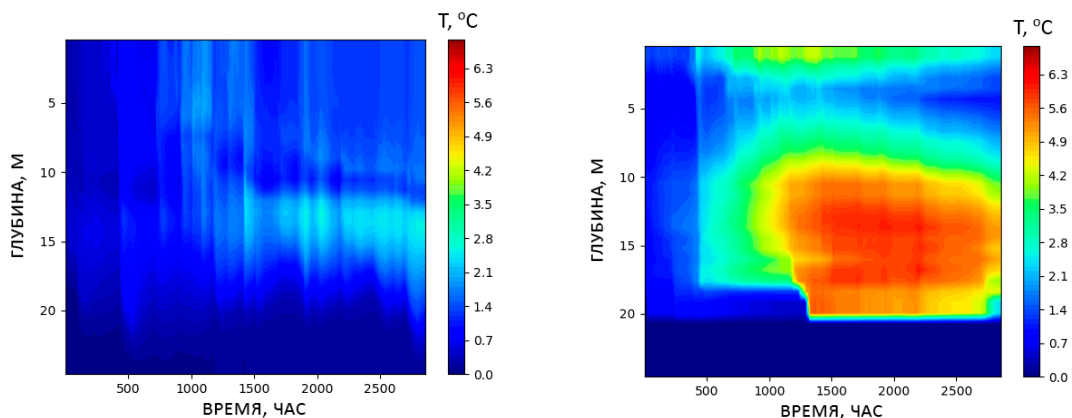


Рис. 2 Стандартное отклонение температуры воды в горизонтальном сечении на разных глубинах относительно осредненных по горизонтали значений в идеализированном цилиндре (слева) и с реальной батиметрией (справа).

Этот эксперимент наглядно показывает, что разброс значений температуры воды, особенно в придонных горизонтах значителен, поэтому простое осреднение значений измеренных физико-химических показателей по результатам съемок может привести к ошибкам, относительно расчетов средних значений, сделанных по трехмерной модели водоема. Также, при задании реальной батиметрии, приближенной к действительному рельефу дна, дисперсия значений увеличивается значительно, так как Рыбинское

водохранилище относительно мелководно, и разница придонных температур в зависимости от глубины водоема в конкретном месте может сильно варьироваться.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта РФФ № 23-77-01032.

Acknowledgments

The work was supported by RSF project № 23-77-01032.

Список литературы

1. Структура и функционирование экосистемы Рыбинского водохранилища в начале XXI века / ред. В. И. Лазарева; РАН, Ин-т биологии внутр. вод им. И. Д. Папанина. – Москва: РАН, 2018. 456 с. ISBN 978-5-907036-18-5
2. Лазарева В.И., Степанова И.Э., Цветков А.И., Пряничникова Е.Г., Перова С.Н. Изменение кислородного режима водохранилищ Волги и Камы в период потепления климата: последствия для зоопланктона и зообентоса // Тр. ИБВВ. 2018. Вып. 81(84). С. 47–84. DOI 10.24411/0320-3557-2018-1-0005
3. Mortikov E.V. Numerical simulation of the motion of an ice keel in stratified flow // *Izv. Atmos. Ocean.Phys.* 2016. V. 52. P. 108-115
4. Mortikov E.V., Glazunov A.V., Lykosov V.N. Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure-strain correlations // *Russian J. of Numerical Analysis and Mathematical Modelling.* 2019. V. 34, № 2. P.1-14
5. Гладских Д.С., Степаненко В.М., Мортиков Е.М. О влиянии горизонтальных размеров внутренних водоемов на толщину верхнего перемешанного слоя. // *Водные ресурсы.* 2021. Т. 48. № 2. С. 155-163

Гидрологические риски небольших регионов в неустойчивых климатических условиях (на примере Беларуси)

П.С. Лопух¹, А.А. Волчек², Ю.А. Гледко¹, О.О. Ровдо³

¹Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

²Брестский государственный технический университет, г. Брест, Беларусь

³РУП «Белгипроводхоз», г. Минск, Беларусь

lopuch49@vail.ru

Аннотация. Получены новые данные о максимальном и минимальном стоке в условиях глобальных климатических изменений и трансформации условий его формирования. Предложены принципиальные подходы к гидрологическому районированию небольших регионов. Предложена схема районирования территории Беларуси, адаптированная к новым условиям, получены качественные и количественные характеристики режима рек.

Ключевые слова: глобальное потепление, максимальный сток, минимальный сток, риски, проблемы, адаптация, гидрологическое районирование.

Hydrological risks of small regions under unstable climatic conditions (by the example of Belarus)

P. Lopuch P.¹, A. Volchak A.², O. Rovdo³

¹Belorussian state university, Belarus,

²Belorussian statenthnikal university, Belarus

³RUP "Belgirovodhoz", Belarus

lopuch49@vail.ru

Abstract. New data on the maximum and minimum runoff under the conditions of global climate change and the transformation of the conditions for its formation have been obtained. Fundamental approaches to the hydrological zoning of small regions are proposed. A zoning scheme for the territory of Belarus, adapted to new conditions, is proposed, qualitative and quantitative characteristics of the river regime are obtained.

Keywords: global warming, maximum flow, minimum flow, risks, problems, adaptation, hydrological zoning.

Введение

Глобальные климатические изменения затронули условия формирования стока малых водосборов, включая территорию Беларуси. Современные природные условия республики за последние 50 лет претерпели серьезные изменения. Они отразились в количественных показателях пространственного распределения стока. В результате анализа показателей стока на территории Беларуси за период инструментальных наблюдений были получены закономерности пространственного распределения стока как средних многолетних, так и экстремальных значений, т. е. минимального и максимального стока, изменений по гидрологическим сезонам. Максимальный и минимальный сток создают риски, возникающие в неустойчивых климатических условиях и трансформации природных стокообразующих факторов.

Материалы и методика

В работе использованы материалы наблюдений за стоком рек Беларуси за период инструментальных наблюдений. Используются метод ретроанализа, картографирования стока, статистический, ГИС технологий, комплексный метод анализа стока при гидрологическом районировании территории Беларуси: бассейновый, ландшафтный, гидрологического анализа.

Результаты и выводы

В результате обработки гидрологических данных были получены аналитические и картографические материалы по пространственному и временному распределению стока, предложен новый скорректированный вариант гидрологического районирования небольшой территории на примере Беларуси.

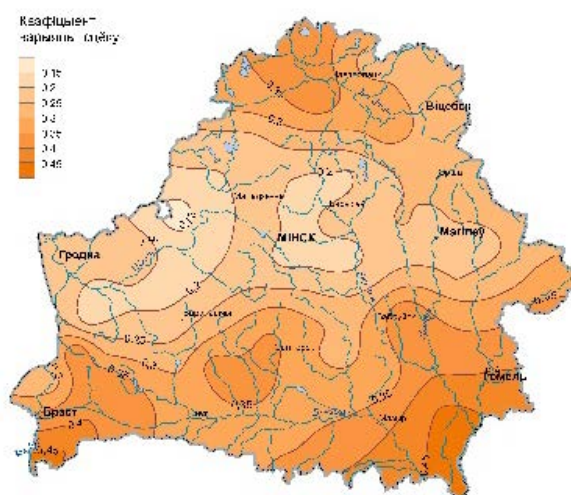


Рис. 1 Многолетняя изменчивость стока территории Беларусь за многолетний период.

Статистическая обработка материалов наблюдений за стоком позволила получить региональные различия в характеристиках стока: среднего многолетнего модуля, минимального летне-осеннего, минимального зимнего, максимального весеннего, которые в условиях потепления создают определенные риски использования поверхностных вод.

В отличие от зональных особенностей колебания стока, имеющего тенденцию к уменьшению с севера на юг, коэффициент вариации изменяется от центральной Беларуси (0,15 - 0,2), до 0,3 – 0,45 на крайнем севере республики и в Белорусском Полесье (Рис. 1).

Пространственное распределение среднего многолетнего стока характеризуется мозаичностью, которая обусловлена климатическими различиями и рельефом территории, распределением ее увлажненности. Модуль стока на севере достигает наибольших значений. Изменение климатических условий с севера на юг обуславливает изменение модуля с 6 – 8 л.с/км² на севере, до 3 л.с/км² и менее на юге (Рис. 2).

Максимальный весенний сток за многолетний период достигает 100 – 120 л.с/км². Средний многолетний сток на юге достигает 20 – 40 л.с/км², что на порядок выше среднего годового (Рис. 3).

Минимальный зимний сток (Рис. 4) зависит от увлажнения отдельных районов территории и колеблется от 3,5 до 1,5 л.с/км². Минимальный летне-осенний сток несколько меньше зимнего (1,0 – 1,5 л.с/км²). Заметно увеличение показателя на возвышенностях (до 3,5 л.с/км²), что объясняется выпадением атмосферных осадков на склонах возвышенности (Рис. 5).

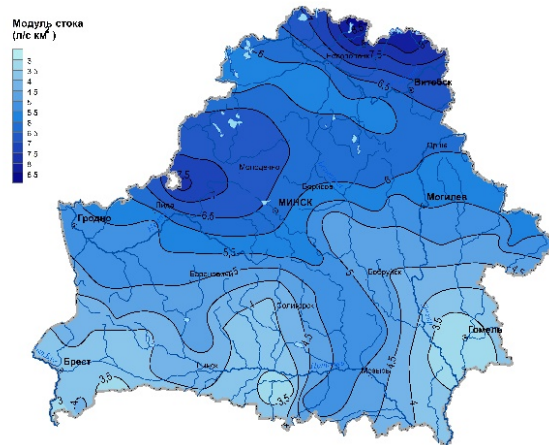


Рис. 2 Средний многолетний сток на территории Беларуси.

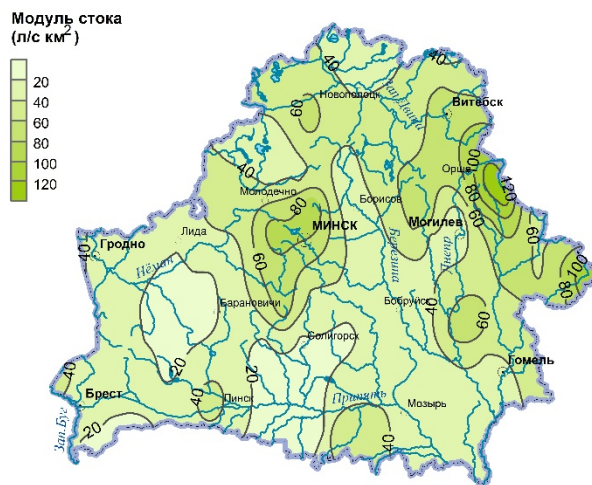


Рис. 3 Максимальный сток территории Беларуси.

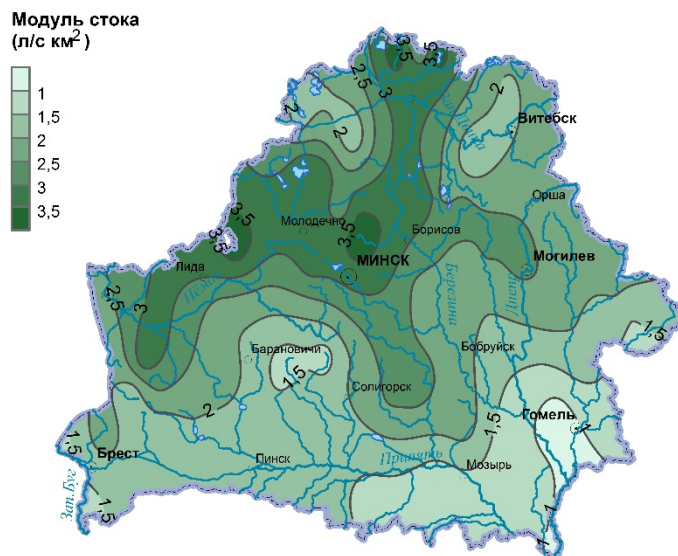


Рис. 4 Минимальный зимний сток.

Для районирования территории по синхронности колебания стока отобраны гидрологические створы с одинаковыми периодами наблюдений с учетом равномерности

распределения по территории Беларуси (Рис. 6). В первую очередь корреляционная матрица рассчитывалась для створов с площадью водосбора, превышающей 4000 км², что позволило провести приблизительные границы для предполагаемых районов. После чего парные коэффициенты корреляции были рассчитаны для всех створов с целью детального уточнения границ. Процесс районирования представлял собой объединение створов в один район в случае, когда парный коэффициент корреляции превышал необходимый уровень (он изменялся от 0,85 до 0,70). При разделении территории на районы учитывалось физико-географическое и ландшафтное районирование Беларуси и положения водоразделов бассейнов рек страны. Территория Беларуси с выделенными районами синхронных колебаний годового стока приведена на Рис. 7.

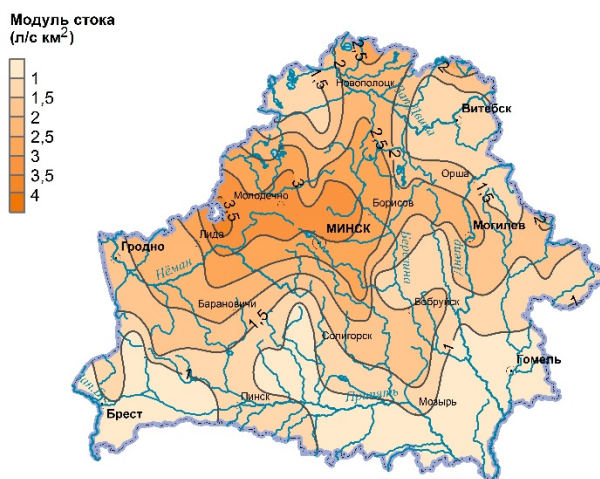


Рис. 5 Минимальный летне-осенний сток.

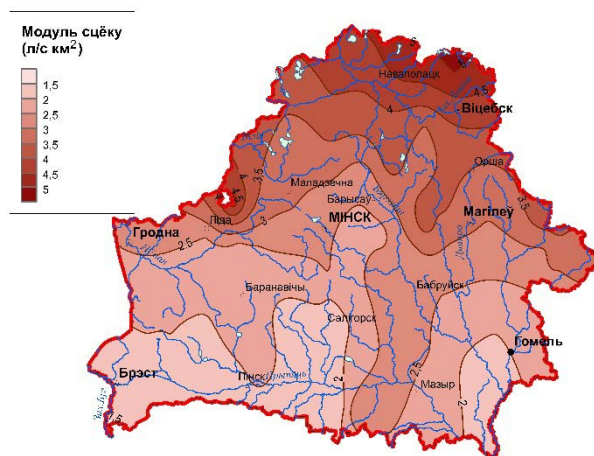


Рис. 6 Средний поверхностный сток.

В работе представлены средние коэффициенты корреляции внутри каждого из выделенных районов и средние коэффициенты корреляции с остальными районами республики. Средние значения внутрирайонных коэффициентов корреляции изменяются в пределах от 0,70 до 0,81, что говорит о высоком уровне синхронности колебаний годового стока для каждой группы выделенных в отдельный район створов. Средние значения межрайонных корреляционных коэффициентов колеблются в районе 0,50 и не превышают 0,68, что говорит о верном выделении районов.

Значение модуля годового стока имеет ярко выраженную тенденцию к возрастанию от I района к III району, т.е. с юго-запада на северо-восток республики. Коэффициент

вариации, наоборот, уменьшается от первого района к третьему. Коэффициент автокорреляции и соотношение коэффициентов асимметрии и вариации не имеют подобных пространственных тенденций, но в центральном районе отмечается наименьший коэффициент автокорреляции и наибольшее соотношение C_s / C_v годового стока.

Среднее число совместных лет наблюдений при расчете парных коэффициентов корреляции составляло не менее 20 лет. Оценка однородности ПКФ годового стока рек Беларуси показала, что рассматриваемая функция неоднородна, поэтому исходное поле было разделено на более мелкие районы. В нашем случае для территории Беларуси выделено 4 однородных района.

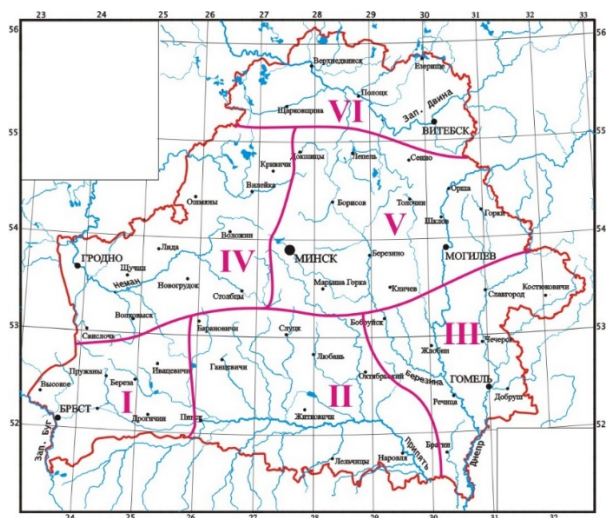


Рис. 7 Районирование территории Беларуси по синхронности колебаний стока. I – Юго-западный, II– Припятский, III – Юго-восточный, IV – Неманский, V – Центральный, VI – Западнодвинский.

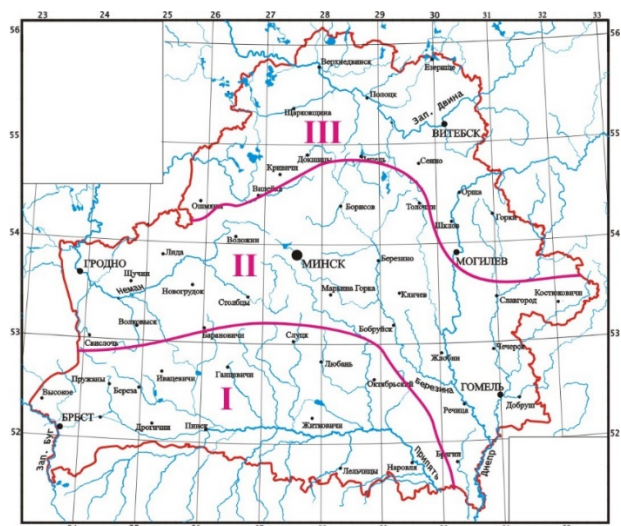


Рис. 8 Схема гидрологически однородных районов для территории Беларуси I – юго-западный, II – центральный, III – северо-восточный.

В результате проведенных исследований подтвердилась гипотеза о четырех однородных районах (Рис. 8) для территории Беларуси в зависимости от характера колебания годового стока рек. Первый выделенный район включает в себя речные створы бассейнов Западного Буга и Припяти, второму району соответствуют водосборы Днепра.

Район III содержит речные створы Немана, а четвертый район включает водосборы Западной Двины. Районирование территории Беларуси в зависимости от характера многолетних колебаний годового стока приведено на Рис. 9.

Исходя из анализа стока на территории Беларуси был предложен вариант гидрологического районирования с учетом трех основных принципов выделения гидрологических районов: бассейнового, ландшафтного и гидрологического (Рис. 10).

В качестве таксономических единиц районирования использован гидрологический район – гидрологический подрайон. В проекте впервые границы гидрологических районов соответствуют в основном границам наиболее крупных бассейнов рек, что упрощает ведение гидрологических расчетов. Ранее выполненное районирование отсекало границами притоки 3 – 5 порядков, что для территории Беларуси при ее небольшой площади необоснованно и весьма схематично.

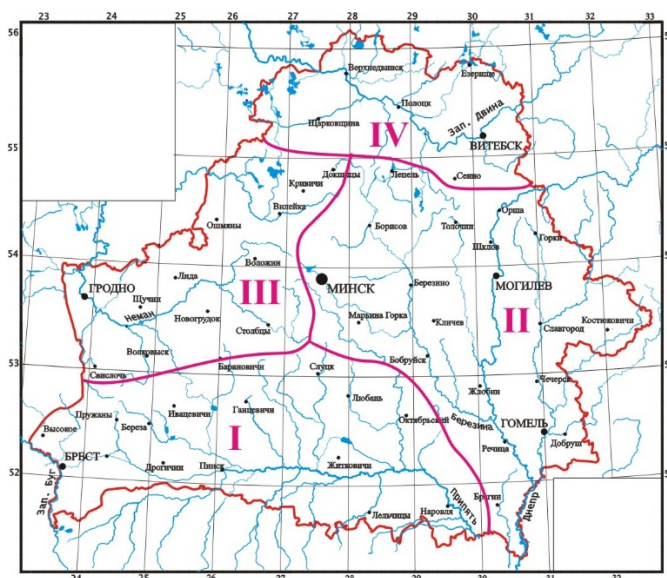


Рис. 9 Однородные районы по многолетним колебаниям годового стока рек Беларуси. I – район № I, II – район № II, III – район № III, IV – район № IV.



Рис. 10 Принципиально новый подход к выделению гидрологических районов.

В новом районировании предлагается выделить следующие гидрологические районы: Западнобугский, Неманский, Вилейский, Западнодвинский, Центральнo-Березинский, Припятский и Верхнеднепровский. Выделение Западнобугского гидрологического района

обусловлено значительной площадью водосбора на территории Украины и Польши и его соответствие европейской схеме гидрологического районирования, повышенной водностью реки, сложным трансграничным гидрологическим режимом, нехарактерным для Полесской низменности. В предыдущем районировании он рассматривался в качестве подрайона в Припятском гидрологическом районе. Припятский гидрологический район с севера ограничивается условной линией по створам водохранилищ: Локтыши, Краснослободское, Солигорское и Любанское, что соответствует границе однородности по многолетним колебаниям годового стока рек Припятского района.

Верхнеднепровский гидрологический район включает бассейны рек Днепра, его правого притока Друти и левого притока Сожа. Его выделение обусловлено высокой водностью реки, сложным гидрологическим режимом, обусловленным ландшафтными условиями формирования стока в пределах Восточно-Белорусской провинции, Предполесской и Полесской провинций. Гидрологический режим в средней и нижней частях водосбора Днепра отличается сложным гидрологическим режимом, нехарактерным для Полесской низменности. В то же время эти части соответствуют центральному гидрологически однородному району, что дает основание выделить их в южный верхнеднепровский гидрологический подрайон.

Разработанное районирование позволит снизить риски, возникающие при использовании водных ресурсов такой небольшой территории, как Беларусь.

Изменчивость гигантских наледей Северо-Востока в исторический период и современном климате

О.М. Макарьева^{1,2*}, А.Н. Шихов^{2,3}, А.А. Землянскова^{1,2}, Н.В. Нестерова^{2,4},
А.А. Осташов^{2,4}, В.Р. Алексеев⁵

¹Северо-Восточный государственный университет, Магадан, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

⁴Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

⁵Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия
omakarieva@yandex.ru

Аннотация. Приведены сведения об изменении площади гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России площадью не менее 10 км² по данным космических снимков Landsat (Sentinel) с 1973 по 2021 гг. и материалам Кадастра наледей, составленного в 1958 г. Всего рассмотрено 74 наледи. Значительная часть гигантских наледей из Кадастра (1958) не подтверждаются современными данными космических снимков. Данные космических снимков о фактической площади наледей за 1973-1975 гг. практически совпадают с современными материалами (2013-2021 гг.). Уменьшение общей площади гигантских наледей по сравнению с данными Кадастра (1958) составило в среднем 1.9 раз. Несколько наледей имеют размеры, превышающие, указанные в Кадастре (1958). Установлено несоответствие контуров наледных полей и границ современных ледяных массивов. Выполненные исследования ставят под сомнение рассчитанные ранее динамические запасы подземных вод, участвующие в процессах наледообразования.

Ключевые слова: гигантские наледи-тарыны, снимки Landsat, Кадастр наледей, наледная поляна, Северо-Восток России.

Variability of giant aufeis of the Northeast in the historical period and modern climate

O.M. Makarieva^{1,2*}, A.N. Shikhov^{2,3}, A.A. Zemlianskova^{1,2}, N.V. Nesterova^{2,4},
A.A. Ostashov^{2,4}, V.R. Alexeev⁵

¹North-Eastern State University, Magadan, Russia

²St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

³Perm State University, Perm, Russia

⁴State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

⁵Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia
omakarieva@yandex.ru

Abstract. Information is given on the change in the area of giant aufeis-taryn in the North-East of Russia with an area of at least 10 km² according to Landsat (Sentinel) space images from 1973 to 2021 and the data of the Cadastre of aufeis, compiled in 1958. A total of 74 aufeis fields were considered. A significant part of the giant aufeis fields from the Cadastre (1958) is not confirmed by modern satellite images. Satellite imagery data on the actual area of aufeis for 1973-1975, practically coincide with modern materials (2013-2021). The decrease in the total area of giant aufeis fields compared with the data of the Cadastre (1958) averaged 1.9 times. Several aufeis fields have dimensions exceeding those indicated in the Cadastre (1958). A discrepancy between the contours of the aufeis glades and the boundaries of modern aufeis fields has been established. The performed studies cast doubt on the previously calculated dynamic reserves of groundwater involved in the processes of aufeis formation.

Keywords: giant aufeis-taryn, Landsat images, Cadastre (1958), aufeis glade, North-East of Russia.

Введение

Северо-Восток России характеризуется широким распространением гигантских наледей подземных вод, которые считаются индикаторами ресурсов подземных вод в условиях горной криолитозоны. Результаты первой систематизации гигантских наледей Северо-Востока России на основе анализа результатов аэрофотосъёмки 40-50-х гг. представлены в Кадастре и Карте наледей [1]. Материалы Кадастра [1] использованы многими учеными для формирования представлений о геокриологических условиях, естественных ресурсах подземных вод криолитозоны Северо-Востока России, взаимосвязи подземных и поверхностных вод в регионе [2; 3; 4; 5; 6].

Обновленные данные о современном распространении наледей на Северо-Востоке представлены в [7]. В бассейнах крупных рек Северо-Востока России (Яны, Индигирки, Колымы, Пенжины) и на Чукотском п-ове современное количество наледей в 1.3-1.5 раза больше, чем указано ранее в Кадастре [1], а общая максимальная площадь наледей уменьшилась в 1.6-2.4 раза в зависимости от бассейна реки.

Целью данной работы стал анализ изменения характеристик наиболее крупных наледей размером не менее 10 км² в период после 1973 года (по историческим или современным данным) по сравнению с материалами Кадастра [1]. Для анализа использовались данные Кадастра А.С. Симакова, З.Г. Шильниковской [1] и космические снимки Landsat за период с 1973 по 2018 г. и Sentinel-2 за период 2020-2021 гг. Всего рассмотрено 74 наледи. За период 1973-1975 гг. получены данные только для 42 наледей из 74.

Результаты

Получены результаты сравнения данных о размерах самых крупных наледей в регионе по четырем периодам измерений: 1) 40-50 гг. прошлого века [1]; 2) 1973-1975 гг., 3) 2013-2018 гг., 4) 2020-2021 гг. Большая часть гигантских наледей по данным Кадастра значительно превышает площади ледяных массивов, измеренных в более поздние периоды, при этом оценки площади наледей по снимкам за 1973-1975 гг. практически совпадают с современными материалами. Общая площадь 71 наледи по Кадастру [1958] составила 1624 км², по снимкам 2013-2018 гг. – 661 км², а в 2020-2021 гг. – 838 км². Уменьшение общей площади в сравнении с данными Кадастра составило 1.9-2.5 раз (Табл.). Если рассматривать 42 наледи, для которых также получены космические снимки за период 1973-1975 гг., то уменьшение площади в сравнении с данными Кадастра составляет 1.9 раз. При этом суммарные величины площади в 1973-75 гг. и в 2020-2021 гг. практически совпадают (Табл.).

Табл. Суммарные площади наледей (км²) по данным Кадастра [1] и снимкам Landsat и Sentinel.

Количество наледей	Годы			
	Кадастр [1]	1973-1975	2013-2018	2020-2021
71	1624	-	661	838
42	1083	555	444	581

На Рис. 1 представлены примеры выделения площадей наледной поляны и контуров ледяных массив на весенних снимках Sentinel-2. Заметно явное несоответствие границ наледных полян, выделенных по данным Кадастра [1], и по современным сведениям, а также значительно меньшие фактические площади наледей по сравнению с выделенными наледными полянами.

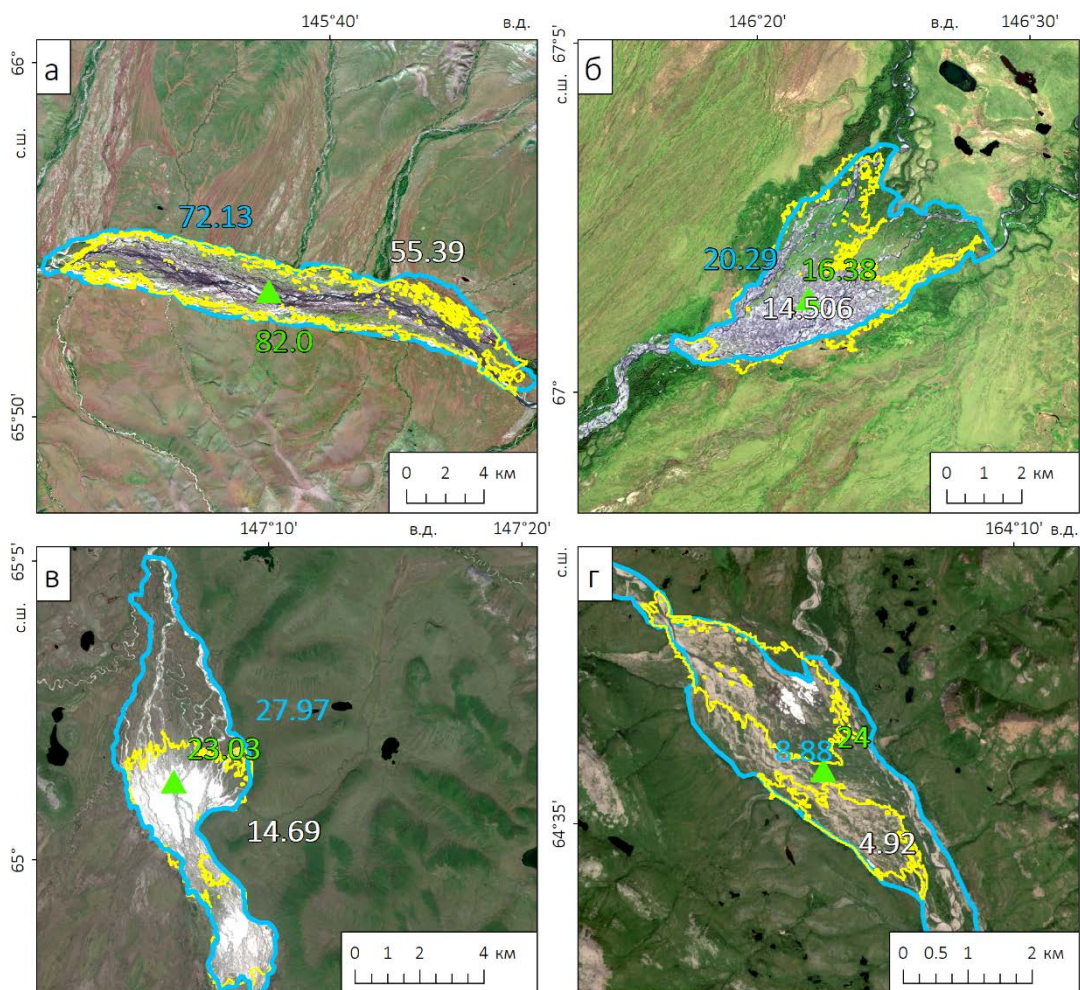


Рис. 1 Пример оценки площади наледных полей (синий контур) и максимальной площади, покрытой льдом (желтый контур) по снимкам Sentinel-2. Местоположение наледи по Кадастру [1] показано зеленым треугольником. Цифры в поле снимка – площадь контуров соответствующего цвета, км².

До сих пор основополагающими научными работами по оценке ресурсов подземных вод Северо-Востока России являются исследования О.Н. Толстихина [2], выполненные на основе оценки площади и соответствующих им объемов наледей. Основная расчетная характеристика – площадь наледи в период максимального развития – принималась равной площади наледной поляны, чаще всего по материалам А.С. Симакова и З.Г. Шильниковской [1]. По расчетам О.Н. Толстихина в наледях Северо-Востока России ежегодно фиксируется 26.2 км³ подземных вод, что составляет около 36.5 % естественных ресурсов подземных вод зоны свободного водообмена. Эти же сведения приведены и в монографиях [5; 6]. По оценкам [7] наледные ресурсы бассейнов рек Яна, Индигирка, Колыма, Пенжина и Чукотского полуострова (без учета наледей в бассейнах р. Лены и рек Охотского моря) составляют около 10.6 км³, что более чем в два раза меньше величин, представленных в работах О.Н. Толстихина. Более низкий (в два-три раза) модуль наледного стока по сравнению с данными О.Н. Толстихина рассчитали по результатам экспедиционных работ также сотрудники Московского государственного университета для бассейна р. Уяндына (левый приток р. Индигирка) [8]. При составлении Кадастра контуры наледей определялись по снимкам низкого разрешения, при этом местоположение основной части ледяных массивов фиксировалось по остаткам наледного льда на дату съемки, контуры же их максимальных размеров определялись по границам наледных полей, которые предположительно отражают среднюю многолетнюю динамику размеров наледи, но не их

конфигурацию в год съемки. Таким образом, значительные ошибки в оценках размеров наледей в Кадастре были заложены изначально, а их величина остается неизвестной. Эти погрешности в дальнейшем «перекочевали» в расчеты запасов наледного льда, подземных вод, идущих на питание наледей, а также на показатели подземного и речного стока [2; 3].

На значительных по площади наледных полях, указанных в Кадастре [1], из года в год образуются отдельные небольшие ледяные образования, суммарная площадь которых оказывается в разы ниже площади наледных полей. Б.В. Зонов (1944) [9] отнес такие наледи к участкам, характеризующимся угасанием наледных процессов, однако, вопрос о том, происходит ли это угасание в последние 70 лет или началось гораздо раньше, остается открытым. В качестве примера угасания наледных процессов на Рис. 2 представлены снимки Landsat 1973 и Sentinel-2 2019 гг. наледной поляны реки Люлювеем, впадающей в Чаунскую губу. Здесь образуются отдельные наледные массивы размером до 0.8 км², общая площадь которых превышает 17 км². По данным Кадастра [1] на этом участке реки площадь наледи составляет 47 км².

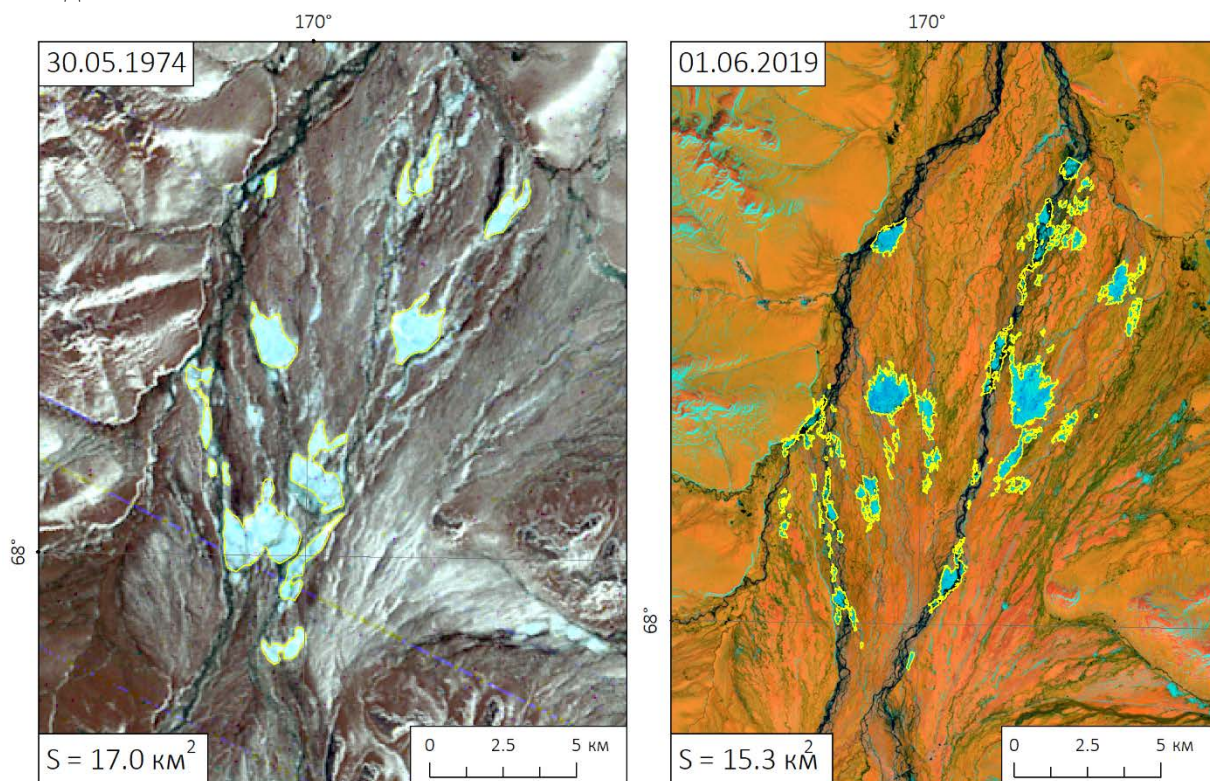


Рис. 4. Сравнение площади гигантской наледи в бассейне р. Люлювеем по снимкам Landsat/MSS (30.05.1974) и Landsat-8 (01.06.2019).

Многие из указанных в Кадастре [1] гигантских наледей уже более 50 лет представляют собой лишь набор отдельных мигрирующих ледяных полей, суммарная площадь которых значительно ниже площади наледной поляны, указанной в Кадастре [1].

Выводы

Анализ данных, полученных с помощью космических снимков Landsat и Sentinel с 1973 по 2021 гг., и их сравнение с Кадастром наледей Северо-Востока России, составленным А.С. Симаковым и З.Г. Шильниковской в 1958 г., выявили существенные различия в оценке площади для категории гигантски наледей площадью более 10 км². Общая площадь ледяных полей, формирующихся за счет намерзания подземных вод, уменьшилась в 1.9 раз. Значительная часть гигантских наледей-тарынов площадью $S \geq 10$ км² не нашла отражение на космических снимках. Выявлены несколько наледей, площадь которых увеличилась по сравнению с Кадастром [1]. Величины площадей наледей, полученных по снимкам 1973-1975 гг., практически совпадают с современными данными

за 2020-2021 гг. Таким образом, данные Кадастра [1] о площади наледей не отвечают современным условиям наледеобразования. Более того, они изначально несли в себе значительные погрешности в определении местоположения и размеров ледяных полей, что определило ошибки в дальнейших расчетах динамических запасов наледеобразующих подземных вод и соответствующих характеристик речного стока.

Благодарности

Исследования проводятся при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках проекта № 94034170, обработка и анализ снимков Landsat за 1973-1975 гг. выполнены в рамках проекта Российского научного фонда № 23-17-20011 и содействии правительства Магаданской области.

Acknowledgments

The research is carried out with the support of St. Petersburg State University within the project No. 94034170, processing and analysis of Landsat images for 1973-1975 was carried out within the support of Russian Science Foundation and with the assistance of the government of the Magadan region (project No. 23-17-20011).

Список литературы

1. Симаков А.С., Шильниковская З.Г. Карта наледей Северо-Востока СССР. Краткая объяснительная записка. Магадан, Северо-Восточное геологическое управление., 1958, 40 с.
2. Толстихин О.Н. Наледи и подземные воды Северо-Востока СССР. Новосибирск, Изд-во Наука (Сиб. отд-ние), 1974, 164 с.
3. Соколов Б.Л. Наледи и речной сток. Л., Гидрометеиздат, 1975, 190 с.
4. Корейша М. М. Закономерности развития наземных льдов в условиях резко континентального климата. Автореферат дис. ... д-ра геогр. наук. АН СССР, Институт географии. М., 1986, 45 с.
5. Гидрогеология СССР / Под ред. А.И. Ефимова, И.К. Зайцева. М., Недра, Т. 20: Якутская АССР, 1970, 383 с.
6. Гидрогеология СССР / Под ред. О.Н. Толстихина. М., Недра, Т. 26: Северо-Восток СССР, 1972, 297 с.
7. Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России // Алексеев В.Р., Макарьева О.М., Шихов А.Н. и др. / Под ред. В.В. Шепелев, М.Н. Железняк. Новосибирск. Изд-во СО РАН, 2021, 302 с.
8. Романовский Н.Н., Кондратьева К.А., Кудрявцев В.А. и др. Мерзлотные и гидрогеологические особенности района Депутатского рудного узла // Мерзлотные исследования, 1970, Вып. X, с. 34-58.
9. Зонов Б. В. Наледи и польньи на реках Янско-Колымской горной страны // Труды Ин-та мерзлотоведения им. В.А. Обручева АН СССР. М., Изд-во АН СССР, 1944, т. IV, с. 33–92.

Разработка методики краткосрочного прогноза гидрографов стока на основе метеорологической модели WRF и гидрологической модели Гидрограф на примере рек Магаданской области

О.М. Макарьева^{1,2*}, А.А. Землянскова^{1,2}, Н.В. Нестерова^{2,3}

¹Северо-Восточный государственный университет, Магадан, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия
omakarieva@yandex.ru

Аннотация. Целью исследования является разработка методов краткосрочного прогноза опасных гидрологических явлений в условиях горной криолитозоны Магаданской области основе комбинирования гидрологической моделирующей системы «Гидрограф» и мезомасштабной метеорологической модели WRF. Расчеты проводятся на примере бассейна р. Детрин (приток р. Колыма) с использованием ретроспективных данных метеорологических станций и прогнозных рядов данных метеорологической модели за 2013-2022 гг. На основе результатов анализа полученных результатов предполагается разработать методические рекомендации по применению комплексного гидрометеорологического моделирования для краткосрочного прогноза опасных гидрологических явлений.

Ключевые слова: краткосрочный прогноз, речной сток, WRF, модель Гидрограф, Магаданская область

Short-term forecast of streamflow based on the WRF meteorological model and the Hydrograph hydrological model by the example of mountainous rivers in the Magadan region

O.M. Makarieva^{1,2*}, A.A. Zemlianskova^{1,2}, N.V. Nesterova^{2,3}

¹North-Eastern State University, Magadan, Russia

²St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

³State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia
omakarieva@yandex.ru

Abstract. The aim of the study is to develop the methods for short-term forecasting of dangerous hydrological phenomena in the mountainous permafrost zone of the Magadan region based on a combination of the Hydrograph hydrological modeling system and the WRF mesoscale meteorological model. Calculations are carried out using the example of the Detrin River basin (the tributary of the Kolyma River) using retrospective data from a meteorological stations and forecast data series from a meteorological model for 2013-2022. Based on the results of the analysis of the results obtained, it is planned to develop methodological recommendations for the use of complex hydrometeorological modeling for short-term forecasting of hazardous hydrological events.

Keywords: short-term forecast, streamflow, WRF, Hydrograph model, Magadan region

Введение

Одним из основных факторов, обуславливающих неопределенность краткосрочных прогнозов речного стока и опасных гидрологических явлений, является дефицит входной

метеорологической информации, в первую очередь об осадках. Данная проблема особенно актуальна для горных территорий России в связи с редкостью и неравномерностью размещения пунктов наблюдательной метеорологической сети. Если для равнинной территории при оценке пространственного распределения осадков приемлемы интерполяционные методы, то в горных районах их использование приводит к неадекватным результатам. В качестве решения данной проблемы предложено использовать в качестве входных данных для прогноза стока результаты счета численных моделей прогноза погоды.

Материалы и методы исследования

В качестве основного инструмента применена гидрологическая моделирующая система Гидрограф [1; 2]. Данная модель позволяет выполнять расчеты и прогнозы стока в различных физико-географических условиях [3; 4]. Ранее модель тестировалась в задаче краткосрочного прогноза стока и опасных гидрологических явлений для рек бассейнов р. Камы [5]. Модель Гидрограф, как и другие детерминированные гидрологические модели, чувствительна к качеству входной метеоинформации. Поэтому предлагаемый подход (комбинирование метеорологической и гидрологической модели) может обеспечить существенное уменьшение расхождений фактических и расчетных величин стока. Наибольшую актуальность решение данной задачи имеет для неизученных бассейнов горных рек.

В качестве входной метеорологической информации использовались результаты счета модели WRF, предоставленные Дальневосточным региональным вычислительным центром Росгидромета, а также суточные данные метеорологических станций Магаданской области.

В качестве объекта исследования был принят бассейн р. Детрин – устье р. Омчука (площадь 3490 км²). В 2013 г. в пос. Усть-Омчуг произошло катастрофическое наводнение, вызванное продолжительными и интенсивными дождевыми осадками. Параметризация модели для бассейна р. Детрин была произведена согласно [6]. Верификация набора параметров производилась на суточном интервале для периода 1966-2012 гг. Использовались данные метеорологической станции Усть-Омчуг. На Рис. 1 представлены примеры рассчитанных и наблюдаемых гидрографов стока. Критерий Нэша-Сатклиффа составил 0.48.

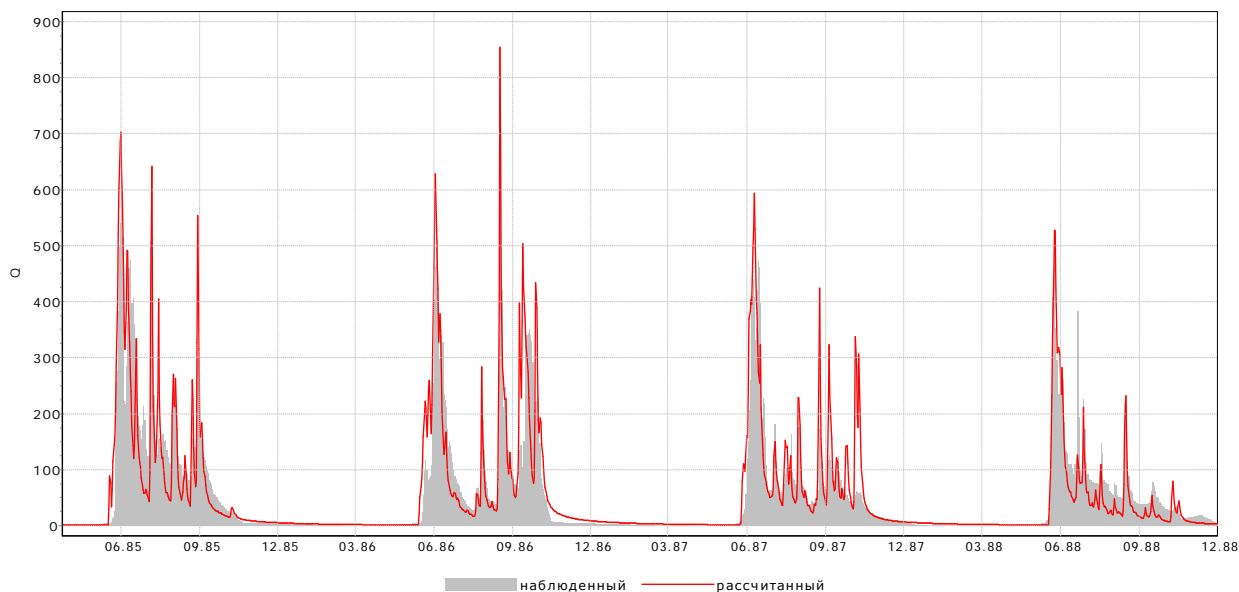


Рис. 1 Рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока в бассейне р. Детрин, 1983-1986 гг.

Результаты

На Рис. 2 представлены результаты моделирования гидрографов стока для р. Детрин – пос. Усть-Омчуг в 2013 г. Зеленым цветом показан гидрограф стока, полученный с использованием данных модели WRF с заблаговременностью 1 сутки. Можно отметить несоответствие наблюдаемых и рассчитанных расходов весеннего половодья, то есть завышенных снегозапасов. В периоды летних паводков фазы максимальных расходов совпадают, однако расход экстремального паводка в августе 2013 г. завышен в полтора раза. Красным цветом показан гидрограф стока, рассчитанный на основе данных метеорологической станции Усть-Омчуг. Интерполяция данных в расчетные точки производится с учетом высотных градиентов температуры воздуха и осадков. В период июля-августа 2013 г. рассчитанный сток превышает наблюдаемый, в период паводка в августе 2013 г. максимальный расход превышен на 20%. Синим цветом показан гидрограф стока, рассчитанный с на основе комбинирования зимних метео данных по метеостанции и летних данных по модели WRF.

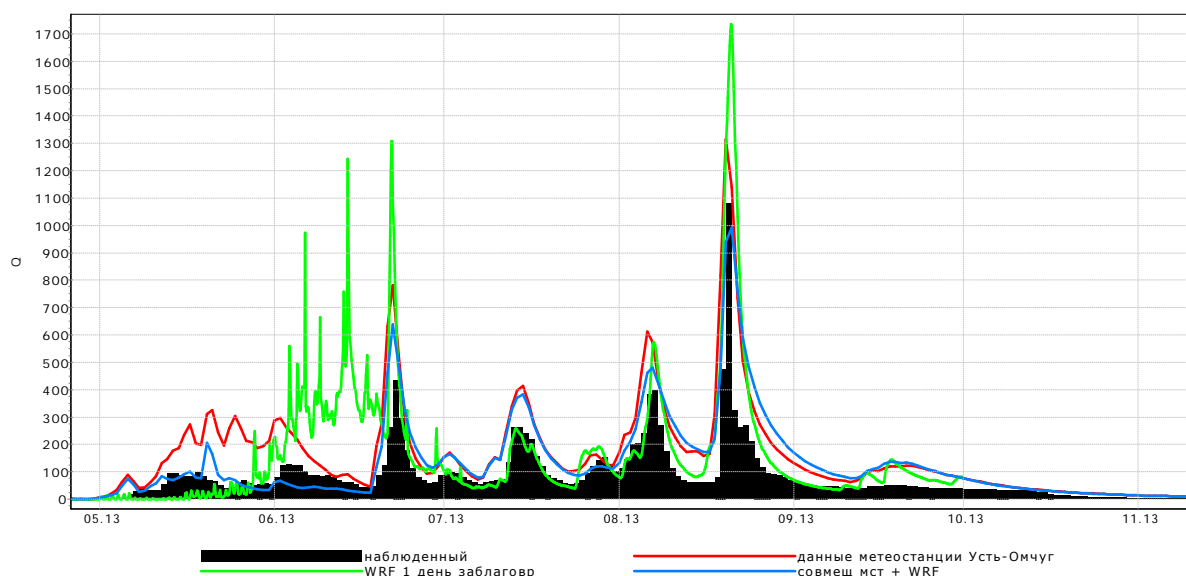


Рис. 2 Рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока в бассейне р. Детрин, 2013 г. с использованием данных WRF заблаговременностью 1 сутки и ретроспективных рядов метеоданных метеорологической станции Усть-Омчуг.

На Рис. 3 представлены результаты моделирования гидрографов стока для р. Детрин – пос. Усть-Омчуг в 2019 г. В этот период доступны данные WRF заблаговременностью от 1 до 4 суток. Гидрографы стока как по данным WRF, так и данным метеостанции значительно превышают наблюдаемые величины. Наиболее значительные отклонения характерны для периода половодья, а также периода осенней межени, во всех случаях рассчитанные значения более чем в два раза выше наблюдаемых. Заблаговременность прогноза метеорологических данных никак не влияет на результаты прогноза стока.

Предварительные выводы

На основе полученных результатов можно сделать следующие предварительные выводы:

1. Снежный покров по данным модели WRF значительно завышается и не позволяет адекватно моделировать период половодья.
2. Данные модели WRF позволяют адекватно воспроизводить сроки прохождения летних паводков, однако значительно завышают их величину.
3. Заблаговременность прогноза метеорологических данных не оказывает влияние на качество прогнозных величин речного стока.
4. Несмотря на удовлетворительное качество моделирования стока в исторический период (период верификации) в современный период модель Гидрограф

значительно превышает рассчитанные величины расходов воды как по данным модели WRF, так и метеорологической станции.

5. Необходимы методы коррекции входных метеорологических данных и прогнозных гидрологических величин.

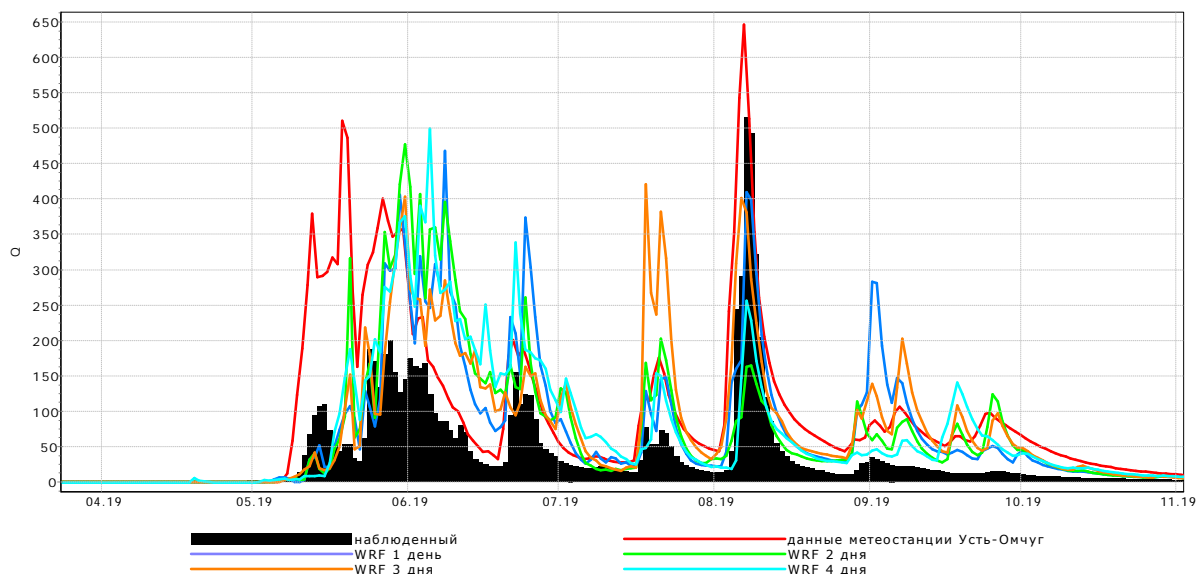


Рис. 3 Рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока в бассейне р. Детрин, 2019 г. с использованием данных WRF заблаговременностью 1-4 суток и ретроспективных рядов метеоданных метеорологической станции Усть-Омчуг.

Благодарности

Исследования проводятся в рамках проекта Российского научного фонда и правительства Магаданской области (проект № 23-17-20011).

Acknowledgments

The research is carried with support of Russian Science Foundation and the government of the Magadan region (project No. 23-17-20011).

Список литературы

1. Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование в гидрологии // Ю.Б. Виноградов, Т.А. Виноградова. М., Академия, 2010, 366 с.
2. Виноградов Ю.Б., Семенова О.М., Виноградова Т.А. Гидрологическое моделирование: метод расчета динамики тепловой энергии в почвенном профиле (Часть 1) // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 1, с. 11–21.
3. Nesterova, N., Makarieva, O., & Post, D. A. (2021). Parameterizing a hydrological model using a short-term observational dataset to study runoff generation processes and reproduce recent trends in streamflow at a remote mountainous permafrost basin // *Hydrological Processes*, 35(7), e14278. <https://doi.org/10.1002/hyp.14278>
4. Nesterova N. V., Makarieva, O., Post, D. A. 2019 Methods of mathematical modelling for calculating flow characteristics of ungauged rivers in engineering design tasks (by the example of the Khemchik River, Tyva Republic, Russia) // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 381 012068 doi:10.1088/1755-1315/381/1/012068
5. Makarieva O., Shihov A., Nesterova N., Ostashov A. (2018) Coupled hydrometeorological modeling of rain-on-snow flood events in the Northern Ural using the WRF and Hydrograph models. *Geophysical Research Abstracts* Vol. 20, EGU2018-15333, 2018 EGU General Assembly 2018.
6. Макарьева О. М., Лебедева Л.С., Виноградова Т. А. Моделирование процессов формирования стока на малых горных водосборах криолитозоны (по материалам Колымской водно-балансовой станции) // *Криосфера Земли*. – 2020. – Т. 24. – № 1. – С. 43-56. – DOI 10.21782/KZ1560-7496-2020-1(43-56)

Движение меандра реки в условиях подвижки земной коры

О.Я. Масликова^{1*}, И.И. Грицук^{1,2,3}

¹ *Институт водных проблем Российской академии наук, Москва*

² *Российский университет дружбы народов, Москва,*

³ *Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва*
oksana68@mail.ru

Аннотация. Землетрясения, вызывающие подвижки земной коры, наряду с мгновенным воздействием на бассейн реки вследствие переформирования уклона, изменения геометрии канала и перестройки всех процессов, происходящих в потоке, имеют пролонгированное воздействие на развитие речной сети по другому сценарию. Поскольку вода – очень подвижная субстанция, изменение уклона земной поверхности приводит к незамедлительным деформациям речных русел, а последствия могут ощущаться в течение десятилетий. Возможно возникновение вторичных катастрофических событий, таких как прорывы дамб ниже по уклону, наводнения, изменение расположения бассейна реки и связанные с этим изменения ландшафта. В гидравлической лаборатории РУДН проведена серия экспериментов на установке с возможностью изменять уклон поверхности для исследования размыва меандра в случае катастрофических явлений типа землетрясений и взрывов. Эксперименты такого типа ранее не проводились.

Ключевые слова: меандры, речная сеть, землетрясения, оползни

The movement of the meander of the river in the conditions of the movement of the earth's crust

O.Ya. Maslikova¹, I.I. Gritsuk^{2,1,3}

¹ *Water problem institute of RAS, Moscow, Russia*

² *Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia*

³ *Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia*
oksana68@mail.ru

Abstract. Earthquakes causing movements of the earth's crust, along with an instantaneous impact on the river basin due to the reshaping of the slope, changes in the geometry of the channel and the restructuring of all processes occurring in the stream, have a prolonged impact on the development of the river network according to a different scenario. Since water is a very mobile substance, changes in the slope of the earth's surface lead to immediate deformations of river channels, and the effects can be felt for decades. Secondary catastrophic events may occur, such as downslope dam failures, floods, relocation of the river basin and associated landscape changes. A series of experiments were carried out in the hydraulic laboratory of the Peoples' Friendship University of Russia on an installation with the ability to change the slope of the surface to study the erosion of the meander in the event of catastrophic phenomena such as earthquakes and explosions. Experiments of this type have not been carried out before.

Keywords: meanders, river network, earthquakes, landslides

Введение

События, произошедшие в Турции в начале 2023 года, застали врасплох многих. Произошло растрескивание земной коры, её сдвиг и изменение уклона. После землетрясения произошло наводнение. Вследствие тектонической подвижки земных плит изменился и баланс водной поверхности, вода затопила прибрежную зону

Мгновенный эффект – это выход потока из берегов, прорыв дамб, тенденция к резкому изменению положения меандра. Отложенный процесс – это оползни, вызванные землетрясениями, которые обычно инициируют процессы морфологической перестройки русел вниз по течению. Практически вся речная сеть на много километров оказывается задействованной в процессе. Всё это приводит к огромным рискам катастрофических явлений ниже по течению.

Последствия землетрясений бывают самые необычные, и заранее их предсказать невозможно. Среди частых явлений – исчезновение подземных источников пресной воды по причине замыкания каналов, по которым вода поступала наверх. Состав растений, флора и фауна также могут поменяться как составляющие единого процесса, баланс которого нарушен. Но исследований по этой теме недостаточно, как и исследований изменения речной сети вследствие таких причин.

В Российской части суши сейсмоопасными районами являются Дальний Восток и Камчатка, большая часть криолитозоны. Исследований, напрямую связывающих землетрясения и миграции геометрии речной сети, не проводилось. Для исследования такой связи в гидравлической лаборатории РУДН проводились серии экспериментов на установке Armfield S12-МКП, позволяющей варьировать уклон макета русла реки, что полностью должно имитировать последствия катастрофических явлений – землетрясений и взрывов. Технически характеристики установки позволяют задавать уклон в пределах от 0% до 5%, что даёт возможность визуального наблюдения за изменением русла реки, размывом и дальнейшим существенным изменением излучины вплоть до прорыва.

Материалы и методы исследования

В гидравлической лаборатории была проведена серия экспериментов по исследованию размыва меандра. Противоположные склоны (внешний и внутренний) выкладывались маркерным песком различного цвета для отслеживания миграции наносов и дифференцирования их. На Рис. 1 слева склон до начала эксперимента, справа – после. Как и было ожидаемо, внешний склон размывается интенсивнее [1], в то время как внутренний подвергается только проседанию, вещество при этом практически не движется.



Рис. 1 Эксперименты по исследованию размыва меандра.

Изменение геометрии канала при увеличении уклона земной поверхности

При изменении уклона земной поверхности геометрия канала в разрезе будет претерпевать существенные изменения. На Рис. 2 схематически показаны разрезы русла а) в состоянии равновесия до изменения уклона; б) случай уклона в сторону внешнего склона; в) в сторону внутреннего склона. В первом случае внешний берег будет

продолжать размываться, а внутренний намываться, и вследствие этого сам меандр будет мигрировать, постепенно двигаясь все дальше и дальше «вниз». Во втором случае, в зависимости от угла наклона, меандр будет иметь тенденцию к сглаживанию. Разумеется, всё зависит от конкретной местности (состав грунта, климатические условия) и степени уклона по отношению к первоначальному.

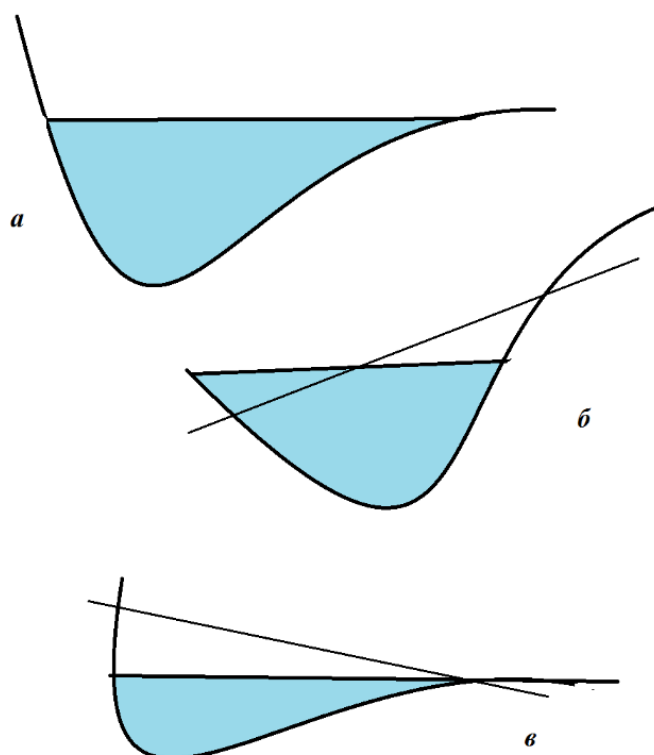


Рис. 2 Схематические разрезы русла: а) в состоянии равновесия до изменения уклона; б) случай уклона в сторону внешнего склона; в) в сторону внутреннего склона.

Результаты и выводы

На Рис. 1 русло находилось в первоначальном неизменном состоянии. На Рис. 3а был задан уклон 3%, а на Рис. 3б – 5%, в сторону изгиба русла что уже показывает существенные изменения в геометрии первоначального потока. Кроме «базового» размыва вогнутого берега и проседания выпуклого [1], происходит расширение потока вниз по течению до меандра, накопления и смещения границы в сторону. Одновременно с этим сам меандр отодвигается вниз, создавая вторичную катастрофическую ситуацию прорыва дамбы. На Рис. 3в показан размыв части меандра после окончания эксперимента и удаления из лотка воды.

Видно, что по течению вниз происходит движение материала под действием не только воды, но и силы тяжести. В результате наносы оседают в самой нижней части изгиба, заиливая её и оставаясь там, так как дальше по течению поток поворачивает в сторону увеличения уклона, что мешает частицам подниматься. При удалении воды после эксперимента видно заиленное и расширенное русло вниз по потоку и практически чистое после поворота. В этом случае даже маркерный песок остался лежать на месте, что говорит о том, что в ситуации уклона дна действуют совсем другие механизмы переноса и размыва.

Дальнейшие исследования и эксперименты позволят получить более полную модель движения наносов, включающую уравнения движения потока на склоне с учетом таяния подстилающего грунта, осадков, вихревого движения жидкости на повороте русла (исследованных авторами ранее) и возможного изменения уклона земной поверхности в сейсмоопасных районах.



Рис. 3 Эксперимент с наклонной моделью меандра реки: а – наклон 3%, б – наклон 5%, в – вид русла по окончании эксперимента и удаления воды.

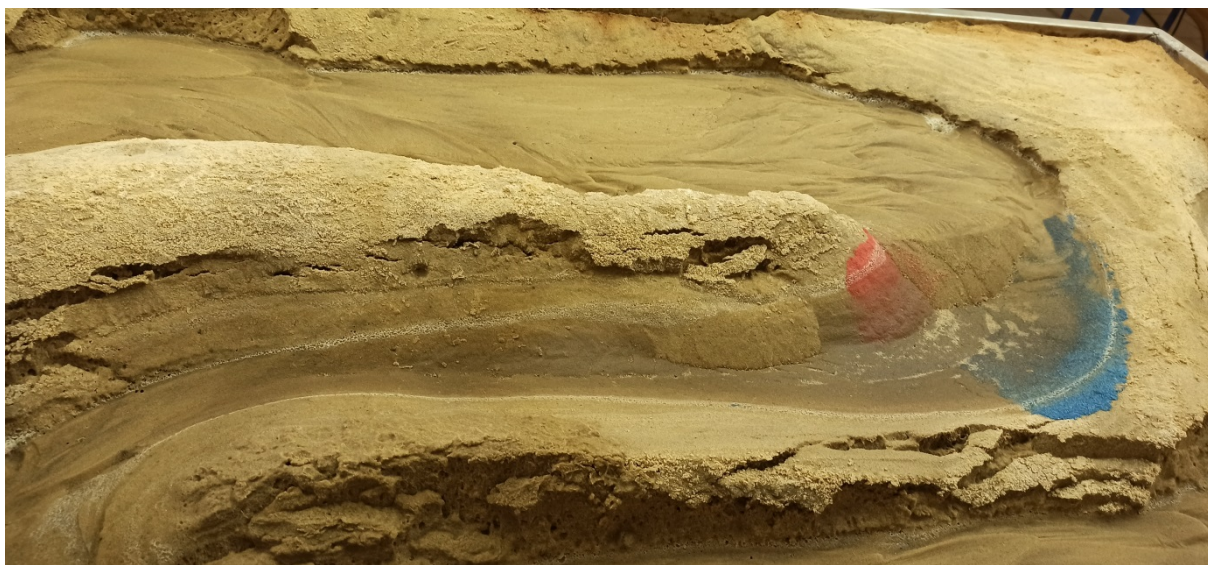


Рис. 4 Вид меандра по окончании эксперимента.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема № FMWZ-2022-0001; № государственной регистрации: 122041100222-7).

Acknowledgments

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема № FMWZ-2022-0001; № государственной регистрации: 122041100222-7).

Список литературы

1. Масликова О.Я., Грицук И.И., Ионов Д.Н., Дебольский В.К. Влияние распределения скоростей в закругленном потоке на характер размыва береговых склонов. // – М.: Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования, 2019. – Том 20, – № 1 – с. 85-95.

Перевести благодарности

Добавить Рис. 4 упоминанием в тексте

УДК детализировать

Исследование особенностей обводнения верхней части дельты Волги на основе двумерной гидродинамической модели

Д.А. Мигунов^{1,2*}, П.Н. Терский^{1,3}, О.В. Горелиц¹

¹Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, г. Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, г. Москва, Россия

³Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия
d.a.migunov@yandex.ru

Аннотация. Дельта Волги – крупный, динамично изменяющийся водный объект, его режим определяется как естественными компонентами климатического водного баланса, так и режимом регулирования стока р. Волги, которое осуществляет Волжская ГЭС. Распределение речного стока между западной и восточной частями дельты формируется в первом разветвлении и оказывает непосредственное влияние на обводнение остальных участков дельты, а вместе с ним на сельское и рыбное хозяйство, а также функционирование водного транспорта. В работе приведены методические аспекты разработки двумерной гидродинамической модели и результаты моделирования участка от вершины Дельты до г. Астрахань на базе комплекса DELFT-3D, отражающие современные особенности распределения стока между западной и восточной частями Дельты. Результаты показывают преимущества двумерного подхода: стало возможным с учетом динамики нестационарного потока оценить площадь затопляемых в половодье территорий, отследить их обводнение и осушение, а также учесть сложность геометрии русловых разветвлений, а также хозяйственные объекты, влияющие на их морфометрию. Представлены результаты сценарных расчетов.

Ключевые слова: Гидродинамическое моделирование, дельта Волги, DELFT3D.

Hydraulic features of the upper Volga delta inundation and flow distribution – the study, based on two-dimensional model

D.A. Migunov^{1,2*}, P.N. Terskii^{1,3}, O.V. Gorelits¹

¹N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Roshydromet, Moscow, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
d.a.migunov@yandex.ru

Abstract. The Volga River Delta is a large, isolated area that changes constantly. Both natural water balance components and runoff regulation by the hydroelectric power plant in Volgograd City, determine its regime. River runoff between western and eastern parts of the delta is branched out in the Delta top. This distribution has a direct impact on further inundation of the delta, affecting agriculture and fishery as well as functioning of water transport. The research presents methodological aspects of a two-dimensional hydrodynamic model development and also the results of modeling. Study area is the section between the delta top and Astrakhan city based on DELFT-3D complex. This model reflects up-to-date features of runoff distribution between the western and eastern parts of the delta. The results show the advantages of two-dimensional approach. Taking into account the dynamics of unsteady flow, it became possible to estimate the flooded areas, to trace the process of their flooding and

draining, and to take into account the complexity and infrastructure-caused variability of channels' geometry. The results of scenario calculations are presented.

Keywords: Hydrodynamic modelling, Volga Delta, DELFT3D.

Введение

Дельта Волги – динамично изменяющийся водный объект крупнорегионального масштаба, его режим определяется как естественными компонентами климатического водного баланса, так и режимом регулирования стока р. Волги, которое осуществляет Волжская ГЭС.

В Дельте Волги выделяют вершину дельты, магистральные рукава и системы проток, авандельту, западные и восточные подстепные ильмени. Распределение речного стока между западной и восточной частями дельты формируется в первом разветвлении и оказывает непосредственное влияние на обводнение остальных участков дельты, а вместе с ним на экологическое состояние территории, на сельское и рыбное хозяйство, водный транспорт. Несмотря на обширные заливания поймы и переток прямо по ее поверхности, основная часть объема стока в течение года проходит по руслам водотоков.

В дельте Волги есть несколько крупных водноресурсных и водохозяйственных проблем. Одна из них довольно широкая - экологическая. Сведения о гидрологическом режиме дельты и распределение стока по ее рукавам имеют определяющее значение для изучения режима фильтрующей способности дельты и транспорта загрязняющих веществ и наносов. Помимо экологической проблемы, в дельте также актуален вопрос обоснования дноуглубительных работ, необходимых для функционирования водного транспорта. В настоящее время в дельте отсутствуют гидрологические посты, на которых проводились бы измерения расходов воды, кроме поста в истоке рук. Бузан. Поэтому существует необходимость в исследовании методов расчёта расходов воды внутри дельты, в том числе при помощи моделирования.

Объект исследования – это система русловых водотоков – рукавов дельты Волги. Цель работы – характеристика современного распределения стока в верхней части дельты Волги и его режима с использованием опубликованных и фондовых данных, а также гидродинамического моделирования.

Материалы и методы исследования

Для решения задач гидродинамического моделирования в работе используется программный комплекс DELFT3D, разработанный в Независимом Институте прикладных исследований в сфере поверхностного и подземного стока «Deltares» (Нидерланды). Расчётный модуль DELFT3D-FLOW, используемый в данном случае, позволяет рассчитывать характеристики многомерных нестационарных процессов, в том числе речных течений, основываясь на решении нестационарных уравнений мелкой воды. Система уравнений, используемая в модели, состоит из горизонтальных уравнений импульса, уравнения неразрывности, уравнения движения потока и замкнутой модели турбулентности [3].

Для решения задач моделирования была сформирована цифровая модель рельефа (ЦМР). Верхняя часть дельты на участке длиной около 15 км была покрыта ЦМР 2014 года с пространственным разрешением 5 м, подготовленной в ФГБУ «ГОИН». Недостающая часть информации о рельефе была получена из глобальных моделей рельефа, с топографических карт масштаба 1:50000 и лоцманских карт.

Для отображения рельефа поймы было решено использовать глобальную ЦМР FABDEM [4]. Эта модель базируется на данных Copernicus-GLO, а её преимущество перед другими глобальными моделями в том, что она является именно моделью рельефа, а не местности, поскольку при её разработке при помощи алгоритмов машинного обучения из модели были удалены растительность и антропогенная нагрузка.

Дополнительно была проведена валидация ЦМР по данным с топографических карт ГГЦ (более 1200 точек), средние значения отличаются примерно на 0.3 м, медианные значения практически совпадают. Данные различных исследований [2] также подтверждают, что FABDEM характеризуется значительно меньшими отклонениями от фактических значений высот. Можно сделать вывод о состоятельности выбранной глобальной модели рельефа и об отсутствии необходимости её коррекции.

Модель руслового рельефа в условиях отсутствия натуральных данных была сформирована на основе лоцманских карт, изобаты были векторизованы и преобразованы в растровую модель руслового рельефа исследуемого участка. Поскольку данная модель содержит информацию лишь о глубинах, её необходимо было привести к абсолютным отметкам высот в м БС. Для этого, по высотам урезов воды на участке, снятым с топографических карт ГГЦ, а также с учетом информации о проектных уровнях на участках лоций, была сформирована условная уровенная поверхность, из отметок которой вычитались значения глубин. В итоге была сформирована цифровая модель руслового рельефа в абсолютных отметках высот, которая была интегрирована в имеющуюся модель пойменного рельефа для получения результирующей ЦМР. Разрешение результирующей ЦМР – 10 м.

Также немаловажной задачей при подготовке к моделированию является определение размерности модели. Размерность модели в данном случае – размер и разрешение расчётной сетки, в рамках которой производятся все вычисления. На нынешнем этапе разработки модели была сформирована криволинейная ортогонализированная сетка размером 742 на 434 ячеек. Ячейки в рамках сетки несколько различаются по размеру, они изменяются от 30 x 28 м до 110 x 100 м. Такие различия в разрешении сетки объясняются намеренным сгущением сетки в районе первого разветвления в вершине дельты Волги для повышения качества расчётов поля скоростей потока и распределения стока между западной и восточной частями дельты. Также разрешение сетки в северной части расчётной области несколько увеличено из-за большого количества пойменных водотоков малой ширины, которые в случае более низкого разрешения «провалились» бы в сетку и не были бы отражены в результирующей модели рельефа.

Результаты и выводы

Гидродинамическое моделирование позволяет с высокой точностью рассчитывать гидрологические характеристики исследуемых водных объектов. Для дельты Волги эта возможность имеет большое значение, поскольку в ней на регулярной основе ведутся наблюдения только за уровнями воды, а расходы воды и скорости потока наблюдаются только в вершине дельты.

На данный момент работа сфокусирована на калибровке распределения стока между западной и восточной частями дельты Волги. Для этого на базе уже опубликованных данных о распределении стока был сформирован расчётный сценарий, описывающий поступление в вершину дельты расходов воды в диапазоне от 6 до 22 тыс. м³/с. (Табл. 1) [1].

Выбранный сценарий позволяет определить, насколько состоятельна модель с точки зрения соответствия распределения стока по рукавам.

Результаты моделирования указывают на высокую степень соответствия опубликованным данным о распределении стока (Рис. 1).

Табл. 1 Известные соотношения расхода воды в вершине дельты и доли от него в истоке рук. Бузан [1].

Расход воды р. Волги в вершине дельты, м ³ /с	рук. Бузан – у истока, % от расхода в вершине дельты
6000	35.1
10000	34.2
14000	35
18000	35.8
22000	36.8

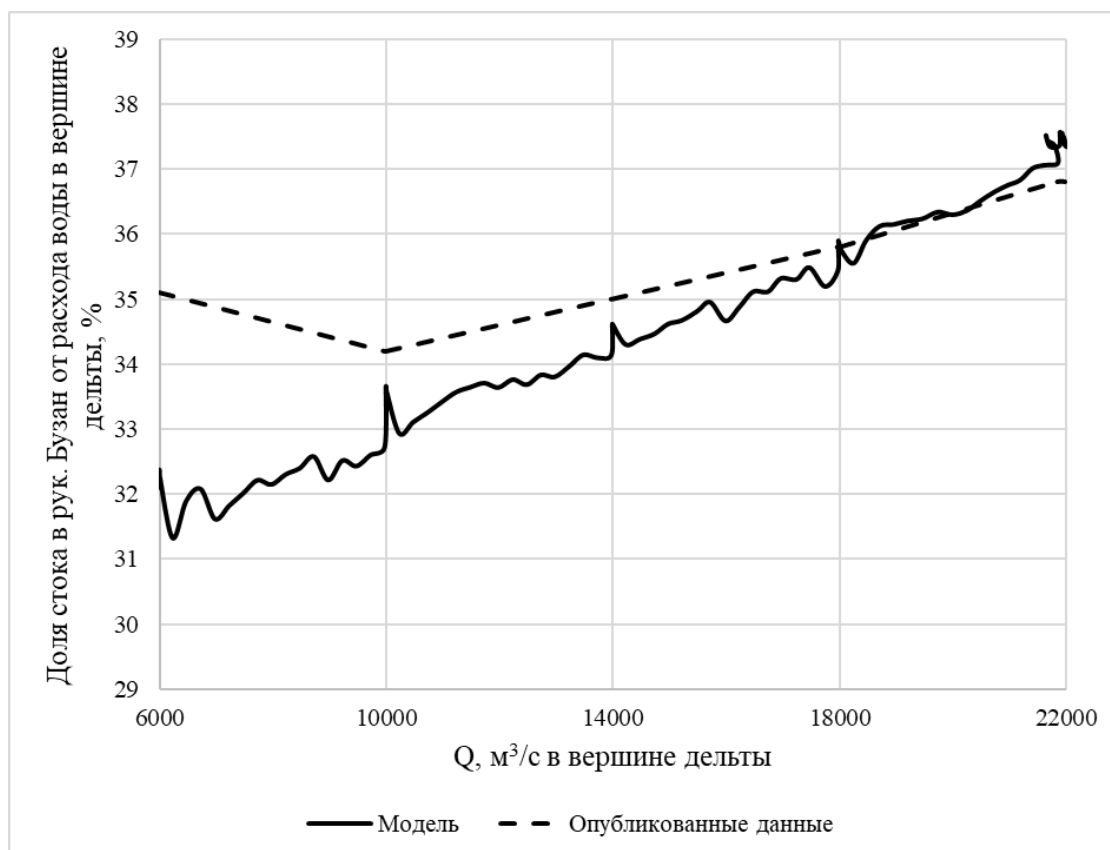


Рис. 1 Сравнение доли стока в р. Бузан от расхода воды в вершине дельты по смоделированным и опубликованным данным.

Как показали результаты моделирования, распределение стока при низких расходах воды в вершине дельты требует дополнительной калибровки. В первую очередь такие расхождения могут быть связаны с определением граничных условий, которые для рук. Бузан заданы в районе н.п. Бузан – Пристань, расположенного в 17 км от первого разветвления в вершине дельты. Ближайший гидрологический пост, на котором наблюдаются уровни воды, расположен в селе Красный Яр в 35 км от нынешней границы области моделирования, однако из-за большого количество рукавов, вытекающих из рук. Бузан между нынешней границей и постом Красный Яр, перенос границы может лишь усложнить ситуацию с расчётом граничных условий. В связи с этим в качестве граничных условий для рук. Бузан была принята сформированная по результатам моделирования и калибровки распределения стока в модели кривая связи между расходами воды на посту Верхнелебяжье и уровнями в рук. Бузан и н.п. Бузан – Пристань (Табл. 2).

Табл. 2 Координаты кривой связи расходов воды р. Волги на посту Верхнелебяжье и уровней воды рук. Бузан у н.п. Бузан-Пристань

Расход воды р. Волги на посту Верхнелебяжье, м ³ /с	Уровень воды рук. Бузан у н.п. Бузан-Пристань, м
5000	-25.43
6000	-25.00
10000	-23.69
14000	-22.85
18000	-22.34
22000	-21.75
26000	-21.38
30000	-21.07

Итак, в результате была разработана гидродинамическая модель участка дельты Волги от вершины дельты до гидропоста Астрахань по р. Волга и н.п. Бузан-Пристань по рук. Бузан. Результаты моделирования по сценарию, охватывающему практически весь диапазон расходов воды, приходящих в вершину дельты в течение года, указывают на состоятельность модели. Сама по себе модель даёт возможность рассчитывать ранее недоступные гидрологические характеристики необходимых точках, а также имеет большой потенциал к расширению в сторону Каспийского моря, что открывает возможности для практического применения в сфере прогнозирования уровней воды на судоходных участках дельты Волги.

Список литературы

1. Проблемы загрязнения устьевой области Волги / Отв.редактор Островская Е.В. – Астрахань. Издатель: ИП Сорокин Роман Васильевич, 2021. – 328 с. – ISBN 978-5-00201-012-7.
2. Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., Sosa, J., Savage, J., Sampson, C., & Neal, J. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 17(2), 024016.
3. DELFT-3D – программный комплекс для гидродинамического моделирования с модулем DELFT3D-FLOW, разработанный институтом прикладных исследований в сфере поверхностного и подземного стока «Deltares» – <https://oss.deltares.nl/web/delft3d> (дата обращения 20.05.2023)
4. Сайт компании-разработчика ЦМР Fathom: <https://www.fathom.global/product/fabdem/> (дата обращения 20.05.2023)

Подход к изучению деформаций русел полугорных рек (на примере рек бассейнов Кубани и Черного моря)

Н.М. Михайлова*, Л.А. Турыкин, Д.В. Ботавин

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
nmmikhailova@yandex.ru*

Аннотация. В последние годы уделяется большое внимание изучению стока горных и, соответственно, полугорных рек, а также его прогнозу, в то время как русловые процессы и закономерности русловых деформаций на участках рек в переходных условиях от гор к равнинам (полугорных реках в расширениях dna долин и участках рек, выходящих на равнину), изучены еще недостаточно. На основе анализа горизонтальных деформаций по разновременным спутниковым снимкам и результатам стационарным наблюдений, проводимых авторами на реках бассейнов Кубани и Черного моря на протяжении нескольких лет, было выявлено, что подходы к изучению деформаций русел полугорных рек отличаются от подходов, применяемых к равнинным рекам со слабоустойчивым руслом. Приводится методика определения темпов плановых русловых деформаций, применяемая авторами; сравнение точности определения темпов размыва берегов по спутниковым снимкам разного разрешения; частота проведения стационарных наблюдений и состав работ для подробного анализа размыва берегов.

Ключевые слова: полугорные реки, русловые процессы, деформации русел, размывы берегов, подход к исследованию.

Approach to studying the deformations of the channels of semi-mountain rivers (the case of the rivers of Kuban and Black Sea basins)

N.M. Mikhailova*, L.A. Turykin, D.V. Botavin

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
nmmikhailova@yandex.ru*

Abstract. During recent years, much attention has been paid to the study of the water runoff at mountain and semi-mountain rivers, and its forecast, while channel processes and channel deformations of semi-mountain rivers are not studied enough yet. Based on the analysis of lateral deformations exposed on various time satellite images and the results of stationary observations carried out by the authors at the rivers of the Kuban and Black Sea basins for several years, it was revealed that the approaches to studying the deformations of the channels of semi-mountain rivers differ from the approaches applied to the flat-plane rivers with a weakly stable channel. The method of determining the rate of lateral channel deformations applied by the authors is given; comparison of accuracy in determination of erosion rate from satellite images of different resolution; frequency of stationary observations and scope of work for detailed analysis of bank erosion.

Keywords: semi-mountain rivers, channel processes, channel deformations, bank erosion, research approach.

Введение

Равнинные реки характеризуются небольшими уклонами и преимущественно направленными горизонтальными деформациями, протекающими длительные периоды времени. В отличие от равнинных рек на участках рек, формирующихся при выходе с гор на равнину (реки в предгорьях и полугорные), особенно на участках, где преобладает аккумуляция наносов, характеризуются интенсивными русловыми деформациями, что обусловлено большими уклонами, высокими скоростями течения во время паводков, преобладанием руслообразующих наносов большой крупности. На таких реках происходит частое перестроение русла (после практически каждого высокого паводка), горизонтальные деформации преимущественно эпизодические, реже направленные; переформирования происходят быстро, что позволяет проследить этапы деформаций, установить их периодичность и выявить закономерности. Из-за разницы в условиях формирования и динамики русел равнинных и полугорных рек исследования горизонтальных деформаций требуют разных подходов.

Работа выполнена на основе проводимых авторами стационарных наблюдений на реках бассейнов Кубани и Черного моря и многолетнего опыта оценки горизонтальных деформаций на равнинных реках со слабоустойчивым руслом.

Материалы и методы исследования

На протяжении нескольких лет авторы проводят стационарные наблюдения за горизонтальными деформациями на реках бассейнов Кубани и Черного моря, с периодичностью несколько раз в год: до, после и во время прохождения паводков различной обеспеченности – с помощью БПЛА и/или GNSS-приемника EFT M4.

Для анализа средних значений горизонтальных деформаций использованы спутниковые снимки за разные периоды, начиная с 1969 г. – монохромные снимки, сделанные в рамках американской программы KEYHOLE, и заканчивая современными снимками MAXAR, предоставленными «Геопорталом МГУ». Все снимки отличаются достаточно высоким пространственным разрешением (от 2,7 до 0,15 м). Проведена также оценка пригодности снимков меньшего разрешения (Landsat, Santinel) для оцифровки и последующего анализа горизонтальных русловых деформаций. По возможности использовались спутниковые снимки, сделанные в межливневый период, и подбирались таким образом, чтобы отражать состояние реки при одинаковой водности [1].

Результаты и выводы

Выявление участков берегов, подверженных горизонтальным русловым деформациям, оценка темпов таких деформаций по спутниковым снимкам как на равнинных, так и на полугорных реках производится по нескольким характеристикам (Рис. 1): определяются средняя, средняя максимальная и максимальная скорости размыва берега, смещение участка с максимальным размывом, протяженность фронта размыва, изменение протяженности и его смещение, площадь размываемого участка берега. При наличии информации о высоте берега определяется объем смытой в русло части берега. Максимальные скорости отступления берега и изменение фронта размыва для густонаселенных территорий играют наиболее важную роль.

Многолетние средняя и максимальная скорости отступления берега при направленном развитии русловых деформаций на равнинных реках со слабоустойчивым руслом как правило определяются по сопоставленным спутниковым снимкам с большим временным интервалом между съемками, который может составлять более 10, вплоть до 50-60 лет. Однако для участков полугорных рек с большими уклонами, где русло меняется за один высокий паводок, т.е. горизонтальные деформации крайне велики, эпизодически и не являются направленными, применение подобного метода оценки средних скоростей размыва не подходит, они окажутся значительно заниженными. В

качестве примера можно привести участок реки Лабы, для которого были взяты спутниковые снимки за 2004 и 2022 годы. Сопоставив эти снимки, получили, что в нижней части участка средняя многолетняя скорость отступления берега составила 6,1 м/год, а в верхней части отступление берега – 0,2 м/год, т.е. почти отсутствовало за весь рассматриваемый период (18 лет) (Рис. 2А). Но если посмотреть на снимки внутри взятого временного интервала, окажется что за это время в верхней части участка образовалась молодая пойма, которая хорошо дешифрируется в 2013 г. (Рис. 2Б). С этого года она начала размываться со средней скоростью 12,7 м/год, (что почти в два раза превышает скорость размыва ниже по течению), и к 2021 году молодая пойма полностью размывалась.

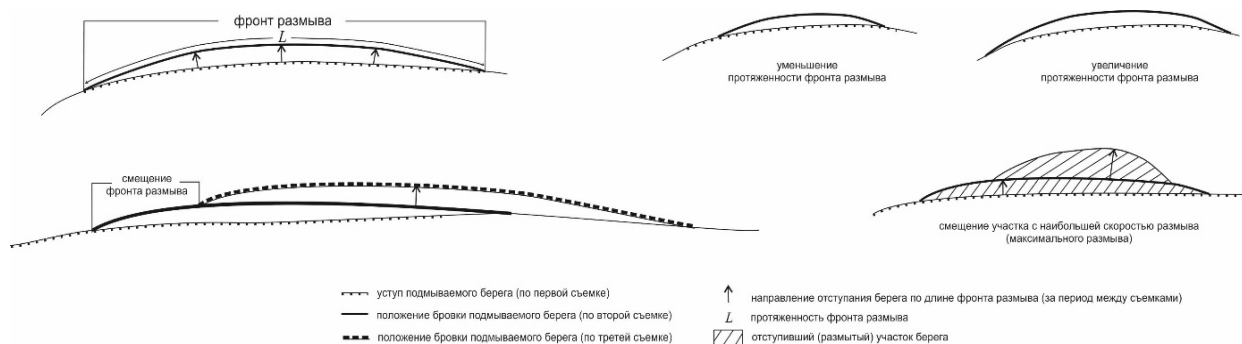


Рис. 1 Виды трансформации фронта размыва



Рис. 2 Результат сопоставления спутниковых снимков р.Лабы: А – положение бровки правого размываемого берега за 2022 г. на снимке 2004 г.; Б – положение бровок размываемых берегов 2004 и 2022 гг. на снимке 2013 г.

Таким образом за взятый временной интервал (18 лет) произошли процессы формирования и размыва поймы в данном случае с периодичностью 9 лет, которые оказались неучтёнными при сопоставлении снимков за крайние годы взятого временного интервала, поэтому рассчитанные средние многолетние скорости размыва берегов оказались существенно заниженными, также, как и средние максимальные за многолетний период. Также из-за больших уклонов, на полугорных реках происходит активное смещение фронтов размыва, изменение их длины, что также может искажать значения расчетных средних многолетних скоростей размыва берегов при большом временном интервале между сопоставляемыми снимками. Все это показывает, что для полугорных участков рек с периодическими русловыми деформациями или большими смещениями участков размыва целесообразнее сравнивать спутниковые снимки за короткие временные интервалы, затем осреднять скорости размыва за несколько таких интервалов или использовать временной интервал между снимками, когда происходили только направленные деформации по всему фронту размыва.

Для получения полной картины деформаций кроме берегов отдельно можно дешифровать и оцифровать, участки аккумуляции – побочни, косы, осередки – обсыхающие формы руслового рельефа, не покрытые растительностью. Применяется автоматическая оцифровка береговой линии (с применением инструментов классификации изображения) и/или полуавтоматическая (после автоматической оцифровки проводится корректировка и уточнение положения бровки). Полуавтоматическая оцифровка позволяет исключить растительность, нависающую с бровки или закрывающую ее, провести сглаживание.

При дешифрировании и оцифровке берегов и оценки плановых деформаций важную роль играет разрешение спутниковых снимков. Понятно, что чем выше разрешение, тем точнее можно дешифровать бровку размываемого берега, поэтому подбор космических снимков предельного минимального разрешения зависит от размера реки, скорости отступления берега, наличия или отсутствия направленных русловых деформаций и выбранного временного интервала между съемками (Табл.).

Табл. Примеры спутниковых снимков и их пригодность для дешифрирования бровки берега и выявления горизонтальных деформаций на разных реках.

Спутниковый снимок	Разрешение, м	Возможность дешифрирования бровки и определения темпов горизонтальных деформаций
Landsat	15-60	Дешифрирование бровки размываемого берега затруднительно. При отсутствии снимков более высокого разрешения, могут быть использованы снимки с разрешением до 30 м для выявления участков интенсивного размыва на больших равнинных реках и определения средней скорости отступления берега при направленных деформациях и большом временном интервале между сопоставляемыми снимками, когда величина отступления берега за рассматриваемый период превышает двукратное разрешение. Пространственное разрешение снимка 10 м может подойти для выявления участков с активным направленным размывом средних рек в течение длительного времени, например, по средней линии при отсутствии осередков и др.
Sentinel	10-30	
KEYHOLE	0,6; 1,8; 2,7	Подходит для дешифрирования береговых уступов рек разного размера, в том числе малых полугорных рек (при разрешении 0,15-0,6 м) с интенсивными размывами берегов. Однако наличие древесной и кустарниковой растительности на бровках или смыкание крон при малой ширине русла могут затруднять дешифрирование. Также при наличии спорных участков, где бровка берега/поймы по цвету или тону (на монохромном снимке) «сливается» с уступом или отмелями, дешифрирование проводится то снимкам с повышенной водностью, когда бровка еще не затоплена или используется съемка БПЛА и ее ЦММ.
Airbus	0,3-1,5	
MAXAR	0,15-0,3	

При анализе плановых (горизонтальных) русловых деформаций важно рассматривать в комплексе несколько факторов, влияющих на интенсивность размыва берегов как на равнинных, так и на полугорных реках, однако вклад некоторых из них в размывы на полугорных реках более значим.

Водность. В периоды глубокой межени русла полугорных рек практически не деформируются, в том числе русловой рельеф из-за большой крупности наносов. Интенсивные размывы берегов происходят при прохождении паводков разной

обеспеченности. Важными характеристиками гидрологического режима при анализе деформаций являются уровни, при которых происходят наибольшие размывы и соответствующие им расходы, скорости подъёма и спада уровней, а также продолжительность стояния уровней во время паводков. Исследования авторов показали, что наибольшее отступление берега часто наблюдаются при расходах, меньше экстремальных и хорошо коррелируют с максимальными расходами воды средних паводков [2], а также зависят от длительности стояния соответствующих им уровней.

Состав отложений береговых уступов. Наблюдения на стационарах рек бассейнов Кубани и Черного моря показали, что большую роль в темпах горизонтальных деформаций играет состав и стратификация отложений береговых уступов размываемых берегов. Наибольшие размывы происходят при уровнях, соответствующих горизонту наиболее рыхлых, легкоразмываемых отложений в береговом уступе и соответствующих им расходах воды (часто меньше максимальных), т.е. до выхода воды на пойму [2]. В июле 2023 г. в период паводка авторам удалось зафиксировать уровни на р. Кубань, при которых происходил наибольший размыв берега. Он соответствовал горизонту песка и лессов (1-1,5 м ниже бровки берега). При достижении уровня воды этих отложений берег начал обрушаться каждые 5-10 мин. блоками площадью по 3-6 м² на разных участках фронта размыва. Поэтому при наличии возможности проведения натурных исследований стоит обратить особое внимание на высоту горизонтов наиболее рыхлых отложений, их гранулометрический состав и связность.

Возраст поймы. Наиболее активно размывается низкая и молодая пойма и молодые острова (с минимальным количеством древесной растительности), которые на рассматриваемых реках начинают формироваться в течение первого беспаводочного года. При дальнейшем отсутствии высоких паводков пойма продолжает зарастать. После зарастания молодой поймы кустарниковой и древесной растительностью, дешифрировать по спутниковым снимкам границу старой и молодой поймы становится сложно, если не осталось протоков или ложбин старого русла (рукава). Выделить границу старой и молодой поймы по разнице в их высоте позволяет ЦМР или ЦММ, полученная с помощью БПЛА или предшествующие спутниковые снимки, где молодая пойма ещё не покрыта древесной растительностью. Формирование и размыв поймы и островов - процесс периодический, который на участках с эпизодическими деформациями занимает сравнительно немного времени (менее 10-30 лет).

Высота уступа размываемого берега определяется при меженном уровне по топографическим картам, ЦМР и/или результатам съемки БПЛА (ЦММ), а также по результатам инструментальной съемки. От высоты уступа зависит уровень горизонта легкоразмываемых отложений при их близком залегании к поверхности, что определяет необходимые для интенсивного размыва уровни воды, а также влияет на скорость размыва при прочих равных условиях и определяет объем поступления наносов в русло.

Наносы. Состав руслообразующих наносов, особенно на побочнях, показывает какой крупности наносы перемещаются и откладываются в период прохождения паводков.

Объем размываемого материала, поступающего в русло. При наличии нескольких съемок, сделанных с помощью БПЛА при одинаковой водности, объем можно определить напрямую между двумя откорректированными поверхностями ЦММ. Но чаще всего объем определяется произведением площади смытого берега и высоты уступа. На полугорных реках, поступающие в русло наносы от размыва, даже небольшого участка берега, сильно различаются по крупности (от илистых частиц до валунов). В период паводков большая часть поступивших в русло от размыва наносов переходит во взвешенное состояние и уносится рекой вниз по течению, затем

аккумулируются там, где снижаются уклоны. В состав руслообразующих наносов переходят только наиболее крупные фракции – крупная галька и валуны.

Аккумулятивные формы. Макроформы руслового рельефа (перекаты) оказывают направляющее воздействие на поток, что увеличивает темпы размыва берегов. Со смещением перекатов, а также положения динамической оси потока на перекате в совокупности с изменением размываемой береговой линии, смещается зона воздействия потока на береговой уступ. Аккумуляция наносов выпуклого берега также влияет на смещение перекатов и увеличение темпов размыва противоположного вогнутого берега, а, следовательно, развитость излучин, вогнутость берегов рукавов разветвлений и т.п. Важную роль играет высота и объем аккумулятивных форм у выпуклых берегов, которую можно получить инструментальной съемкой или с помощью БПЛА.

Выходы в русле трудноразмываемых отложений. Появление в русле трудноразмываемых грунтов (например, глин) в результате интенсивного врезания реки, увеличивает темпы горизонтальных деформаций (наблюдаются на стационарах рек Кубани, Белой, Неберджай и др.). Появление таких грунтов в уступах берегов в процессе их размыва, приводит к формированию выступов берега, способствующих отклонению потока, что уменьшает воздействие потока на берег и приводит к уменьшению и остановке размыва (р. Белая).

Частота проведения стационарных наблюдений определяется частотой прохождения паводков различной обеспеченности и их продолжительностью. Для более полного понимания процесса и оценки количественных характеристик целесообразно проводить наблюдения за деформациями до и после прохождения каждого паводка.

Благодарности

Работа выполнена по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке РФФИ (проект 23-17-00065) (выполнены стационарные наблюдения в июле 2023 г.) и при поддержке ЦКП Геопортал, МГУ имени М.В. Ломоносова (предоставлены космические снимки).

Acknowledgments

The work was carried out according to the plans of the Research (GT) of the Department of Land Hydrology and the Research Laboratory for Soil Erosion and Channel Processes of Lomonosov MSU and financed by RSCF (project 23-17-00065) (natural observations in July 2023) and with the support of the CCU “Geoportal”, Lomonosov MSU (space images provided).

Список литературы

1. Михайлова Н.М., Турыкин Л.А. Оценка многолетнего режима перекатов при деформациях русла и антропогенном воздействии (в нижнем течении р. Белой // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению, издательство ООО "Издательство ВВМ" (Санкт-Петербург), 2020, с. 722-727.
2. Михайлова Н.М., Турыкин Л.А., Ботавин Д.В. Размывы берегов полугорных рек бассейна Кубани как опасное проявление русловых процессов // «Куражсковские чтения»: материалы II Международной научно-практической конференции, г. Астрахань, 18-21 мая 2023 года. Бармин – Астрахань: Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева, 2023. С. 193-199.

Долгосрочный ансамблевый прогноз стока весенне-летнего половодья в устье Печоры

В.М. Морейдо, К.И. Головнин*

*Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия
golovnin98@bk.ru*

Аннотация. Развитие и внедрение методов долгосрочных прогнозов опасных гидрологических явлений имеет в последнее время особое значение в Арктике в связи с активным хозяйственным освоением региона в условиях высоких темпов климатических изменений и дефицита данных гидрометеорологических наблюдений. Тем не менее, имеющиеся архивные данные метеорологических наблюдений позволяют применить ансамблевый подход для оценки вероятности катастрофических событий во время весеннего половодья.

Большой интерес представляет устье Печоры — крупнейшей по годовому стоку реки бассейна Северного Ледовитого океана в Европе. В устье Печоры расположен Нарьян-Мар — административный центр Ненецкого автономного округа и морской порт. Часть устьевой области относится к Ненецкому заповеднику, ежегодные затопления дельтовых низин в котором являются важным аспектом существования водно-болотных экосистем для гнездовья мигрирующих птиц. Населённые пункты в устье периодически подвергались разрушительным затоплениям, например в 1952, 1976, 1998, 2017 годах.

В настоящей работе разработаны и проверены на периоде с 1979 по 2019 год долгосрочные ансамблевые прогнозы стока половодья р. Печоры у поста ГП-1 Оксино. Моделирование ежедневного речного стока произведено с использованием программного комплекса ECOMAG. Полученные результаты продемонстрировали возможности ансамблевого подхода для долгосрочного прогнозирования развития половодья в устьевой области Печоры и его применения для расширения видов прогностической гидрологической информации, в том числе продолжительности затопления устьевых пойменных участков.

Ключевые слова: ансамблевый прогноз, гидрологическое моделирование, весенне-летнее половодье, опасные гидрологические явления.

Long-range ensemble forecast of floods in the Pechora River mouth

V.M. Moreydo, K.I. Golovnin*

*Water Problem Institute, Moscow, Russia
golovnin98@bk.ru*

Abstract. Development and application of probabilistic forecasting methods of hazardous hydrological events are crucial for the Arctic region due to increasing human activity in the region under climate change conditions and hydrometeorological data scarcity. Application of ensemble streamflow prediction is considered to be a state-of-the-art approach to long-term spring flood hazard forecasting.

The Pechora River outlet selected as a case study for the forecast development is the largest river in Europe by its annual discharge into the Arctic ocean. The city of Naryan-Mar is the administrative center of the Nenets Autonomous Okrug and a large sea port, situated in the Pechora River mouth. Settlements in the river mouth were historically exposed to devastating inundation, for example in 1952, 1976, 1998, 2017. However, natural inundations are crucial drivers for the local ecosystem, especially for seasonal migrating waterfowl at the Nenetsky natural reserve, which occupies a part of the Pechora river mouth.

Long-term streamflow discharge forecasting was applied and verified for the Oxino gauging station located at the top of the river mouth for the period from 1979 to 2019. Streamflow discharge modelling was performed by the ECOMAG hydrological model. The results show significant opportunities for ensemble approach for long-term forecasting of flood events in the Pechora river mouth and its application to enhancement of forecast hydrological information, including duration of floodplain areas inundation.

Keywords: ensemble forecast, hydrological modelling, spring flood, dangerous hydrological events.

Введение

Многие устья в Арктической зоне подвержены опасным гидрологическим явлениям, из которых наиболее разрушительными являются стоковые и заторные наводнения во время весеннего половодья и ледохода. В условиях активного хозяйственного развития региона и возрастающей антропогенной нагрузки необходим заблаговременный и достаточно точный прогноз таких явлений. Вместе с тем в связи со значительными климатическими изменениями в Арктике разработанные ранее методики прогноза требуют существенных переработок. Подобные изменения привели к тому, что многие экстремальные явления в настоящее время имеют более выраженный стохастический характер и для их прогноза предпочтительнее использовать вероятностный подход. Целью настоящей работы являлась оценка возможностей использования ансамблевого подхода для прогнозирования стока весеннего половодья в устьях Арктических рек на примере Печоры.

Устьевая область Печоры расположена в северо-восточной части Восточно-Европейской равнины в пределах Ненецкого автономного округа. Её протяжённость составляет около 190 км, включая придельтовый участок длиной 70 км и дельту длиной 120 км и площадью 2600 км² [4]. В устьевой области расположен окружной центр — город Нарьян-Мар с населением около 30 тыс. человек, являющийся также важным портом на Северном морском пути, и ряд других небольших населённых пунктов. При отсутствии в регионе крупных железных и автомобильных дорог Печора имеет первостепенное транспортное. В устьевой области и на прилегающих территориях ведётся добыча нефти, газа и некоторых других полезных ископаемых. Часть устьевой области относится к Ненецкому государственному природному заповеднику. Годовой сток Печоры составляет в среднем 147 км³, что является наибольшим значением среди рек бассейна Северного Ледовитого океана в Европе. Река имеет преимущественно снеговое питание и весенне-летнее половодье, приходящееся в устьевой области на май-июнь (около 65% годового стока). Средняя продолжительность ледостава с последней декады октября до последней декады мая составляет около 220 дней [4].

Устье Печоры подвержено многим опасным и неблагоприятным гидрологическим процессам, из которых наибольшую опасность представляют наводнения во время высоких половодий и ледовых заторов. Ледовые заторы могут иметь существенный вклад в повышение уровня воды (до 2.2 м согласно [4]). Однако анализ многолетних данных показывает, что большинство критических повышений уровня воды происходили при отсутствии заторов [3, 9]. Тем не менее необходимо

отметить увеличение частоты заторов в последнее время [9], особенно в Оксине, что заметно на Рис. 1.

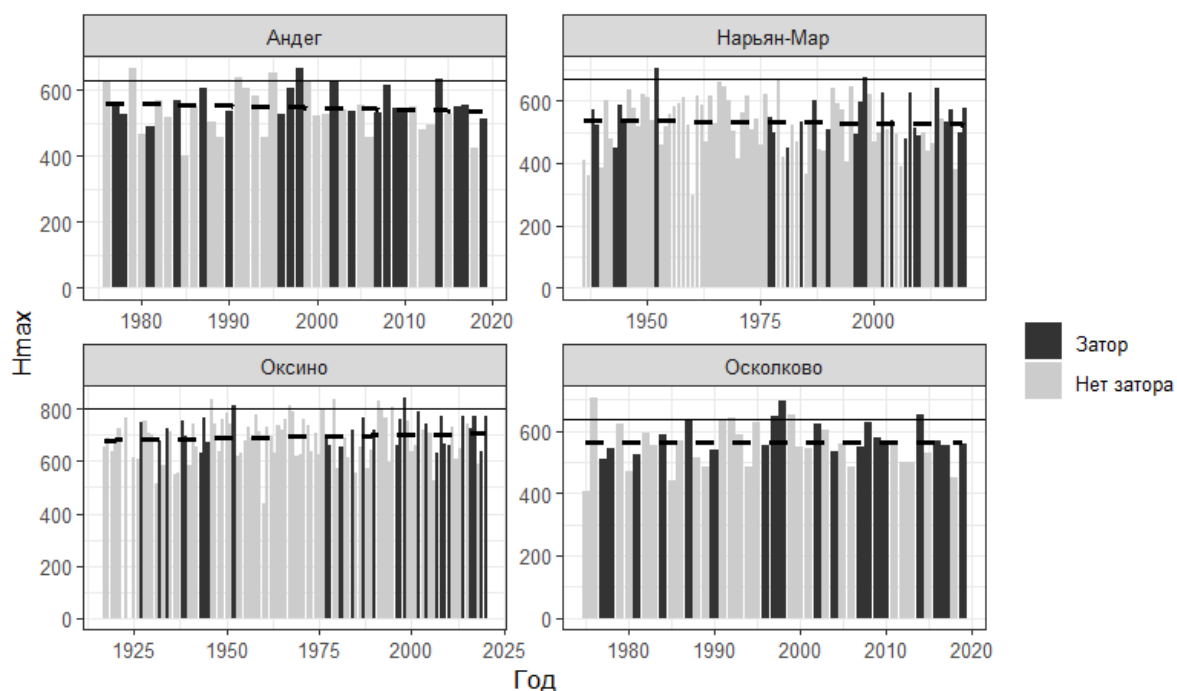


Рис. 1 Многолетние изменения максимальных уровней (см), сплошной линией показаны критические отметки, пунктирной — линейный тренд.

Так, в Нарьян-Маре уровень воды превышал критические и неблагоприятные отметки в 1952 и 1976 годах, когда в городе были затоплены значительные территории, в том числе в центральной части. В 1998 году высокое весеннее половодье сопровождалось ледовыми заторами. В Нарьян-Маре и других населённых пунктах были затоплены и повреждены жилые дома, промышленные и социальные объекты. В последние годы благодаря эффективным и своевременным противопаводковым мероприятиям в Нарьян-Маре ущерб удаётся минимизировать, однако некоторые малые населённые пункты (Великовисочное, Андег, Осколково) в устьевой области затапливаются с периодичностью в несколько лет, последние такие случаи зафиксированы в 2014 и 2017 годах.

Материалы и методы

Используемая в настоящей работе модель ECOMAG (ECOLOGICAL Model for Applied Geophysics) разработана под руководством Ю.Г. Мотовилова в Институте водных проблем РАН [6, 7]. ECOMAG относится к моделям с полураспределёнными параметрами, в которых речной бассейн представлен нерегулярной сеткой элементарных водосборов. Гидрологические процессы описываются упрощёнными дифференциальными уравнениями. При переходе к более высокому масштабному уровню расчёты производятся исходя из представлений о статистическом распределении значений параметров на ландшафтно-однородной территории. Далее, с учетом наличия множества комбинаций типов почв и подстилающих поверхностей на расчётном водосборе, проводится их взвешенное осреднение, где в качестве весов выступают доли площади, занимаемой каждой комбинацией. Динамика воды в почве описывается уравнением водного баланса, при этом отдельно рассматриваются капиллярная и некапиллярная зоны, подповерхностный сток моделируется согласно закону Дарси, русловой сток описывается уравнением кинематической волны. Для расчёта водоотдачи

снега используются балансовые уравнения, также снежный и ледовый покров учитывается при моделировании гидротермических процессов в почве [8].

В последнее время в мире происходит активное внедрение ансамблевого подхода в практику гидрологических прогнозов. Так, исследования в рамках проекта НЕРЕХ (Hydrological Ensemble Prediction Experiment) показали в ряде случаев существенное улучшение надёжности и оправданности при переходе к ансамблевым прогнозам. При прогнозе стока половодья ввиду отсутствия надёжных метеорологических прогнозов на период заблаговременности (до нескольких месяцев) в качестве метеоусловий задаётся ансамбль ранее наблюдавшихся сценариев метеовеличин. Наличие ансамбля сценариев позволяет оценить неопределённость метеорологических условий на период заблаговременности и перейти к вероятностной форме прогнозирования. Выпуск долгосрочных прогнозов в вероятностной форме позволяет потребителям оценить возможный риск и повысить эффективность противопаводковых мероприятий [2, 8]. Ансамблевый подход в долгосрочном прогнозировании речного стока с помощью модели ECOMAG, впервые применённый в России в ИВП РАН, был неоднократно проверен и показал высокую эффективность [10, 5, 1].

Модель была настроена на воспроизведение суточных расходов воды по рядам метеорологических величин для г/п Оксина; коэффициент Нэша-Сатклиффа для суточных расходов за период 1979 – 2019 гг. составил 0.78. Для оценки методики ансамблевого долгосрочного прогнозирования расходов воды реки Печора на гидрологическом посту Оксина с заблаговременностью от 1 до 3-4 месяцев были рассчитаны проверочные прогнозы за исторический период с 1983 по 2019 годы. Прогнозы выпускались с 1 апреля по 1 июля с учетом текущих метеорологических и гидрологических условий на водосборе. От каждой даты выпуска прогноза рассчитывались гидрографы стока по метеорологическим сценариям прошлых лет за период с 1979 по 2019 годы (всего 40 сценариев). Значения по ним осреднялись, таким образом были получены детерминистические прогнозы среднесуточных расходов воды заблаговременностью от 1 до 3 месяцев. Вероятностные оценки были получены путем статистической обработки ансамбля сценариев.

Результаты

Сопоставление фактических и средних ансамблевых среднесуточных расходов показало их достаточно тесную связь ($R = 0.39-0.75$) для мая-июля, причём с увеличением заблаговременности прогноза значения коэффициента корреляции в большинстве случаев уменьшаются. Коэффициент Нэша-Сатклиффа в мае-июле при месячной заблаговременности также достаточно высок (до 0.5 и более), однако с увеличением заблаговременности до 3 месяцев и более снижается до 0.15-0.2 (Рис.2).

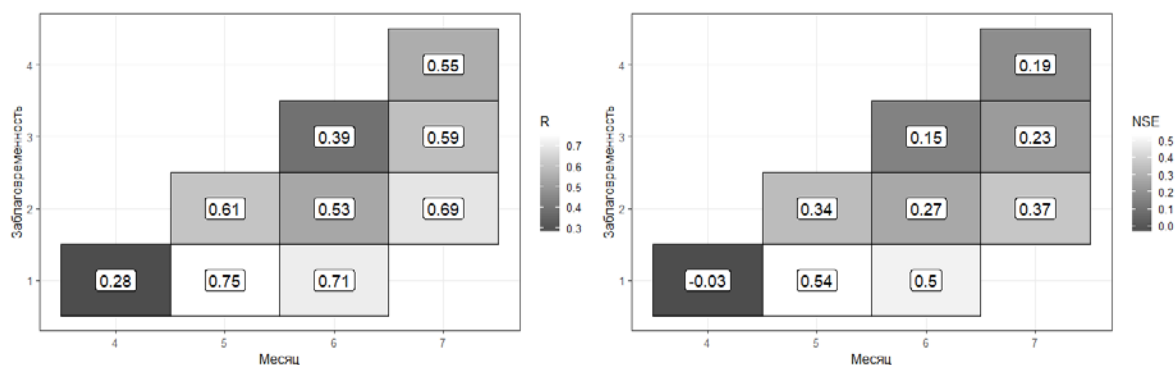


Рис. 2 Значения коэффициента корреляции для различных месяцев и при разной заблаговременности прогноза.

Оценка точности вероятностного прогнозирования производилась по метрике Brier Score (BS). Для 3 месяцев (апреля-июня) были рассчитаны среднемноголетние максимальные расходы за исследуемый период. Для каждого месяца каждого года были определены события превышения (1) и не превышения среднемноголетних максимумов соответствующего месяца. Вероятность превышения согласно прогнозу определялась как доля сценариев, максимальные расходы которых превышают среднемноголетний максимум. Показатель рассчитывается как:

$$BS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\rho_i - o_i)^2,$$

где ρ_i — прогнозная вероятность превышения, o_i — фактическая, N — число наблюдений. Значения BS могут изменяться в диапазоне от 0 (абсолютно точный прогноз) до 1 (наихудший прогноз) [11]. Полученные оценки для каждого из 3 месяцев показывают преимущество прогноза в сравнении с аналогичными результатами при прогнозировании ежегодного превышения среднемаксимального расхода (Табл.).

Табл. Оценка точности вероятностного прогнозирования.

Месяц	BS, вероятностный прогноз	BS, прогноз превышения
4	0.21	0.65
5	0.31	0.40
6	0.16	0.45

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности применения модели ECOMAG для вероятностного прогнозирования стока весенне-летнего половодья в устье Печоры. Полученные результаты могут быть в дальнейшем применены для оценки риска развития опасных гидрологических явлений.

Благодарности

Авторы выражают благодарность доценту кафедры гидрологии суши МГУ Д.В. Магрицкому, а также начальнику ОГМС Нарьян-Мар Л.Ю. Севастьяновой за предоставленные материалы и ценные советы. Исследование выполнено в рамках темы № FMWZ-2022-0003 Государственного задания ИВП РАН.

Acknowledgements

The authors thank D.V. Magritsky, the reader of Land Hydrology department MSU, and Sevastyanova L.Y., head of the UHMS Naryan-Mar for providing necessary data and valuable advices. This study was carried out under Governmental Order to Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, subject no. FMWZ-2022-0003.

Список литературы

1. Борщ С.В., Гельфан А.Н., Морейдо В.М., Мотовилов Ю.Г., Симонов Ю.А. Долгосрочный ансамблевый прогноз весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище на основе гидрологической модели: результаты проверочных и оперативных испытаний // Труды Гидрометцентра России. – 2017. – № 366. – С. 68-86.
2. Кучмент Л.С. Эволюция и изменение парадигмы методов гидрологических прогнозов//Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения, сборник трудов конференции. — Сочи, 2017, с. 84-89

3. Магрицкий Д.В., Скрипник Е.Н. Опасные гидрологические процессы на устьевых участках Северной Двины и Печоры//Актуальные вопросы гидрологии и геоэкологии. — 2016. — С. 42-47
4. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных территорий: прошлое, настоящее и будущее. — М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
5. Морейдо В.М. Оценка предсказуемости притока воды в Чебоксарское водохранилище с помощью численных экспериментов // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения. – 2017. – С. 241-247.
6. Мотовилов Ю.Г. Гидрологическое Моделирование Речных Бассейнов В Различных Пространственных Масштабах. 2. Результаты Испытаний // Водные Ресурсы. – 2016а. – Т. 43. – № 5. – С. 467-475. <https://doi.org/10.7868/s0321059616050096>.
7. Мотовилов Ю.Г. Гидрологическое Моделирование Речных Бассейнов В Различных Пространственных Масштабах 1. Алгоритмы Генерализации И Осреднения // Водные Ресурсы. – 2016б. – Т. 43. – № 3. – С. 243-253. <https://doi.org/10.7868/s0321059616030111>.
8. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. — Москва: Изд. Российской Академии наук, 2019, 300 с.
9. Сумачёв А.Э., Банщикова Л.С. Ледовый режим реки Печоры в современных климатических условиях и принципы прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода // Науки о Земле. — 2021, №10. — С.75-80
10. Gelfan A.N., Motovilov Y.G., Moreido V.M. Ensemble seasonal forecast of extreme water inflow into a large reservoir // Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. – 2015. – Т. 369. – С. 115-120. <https://doi.org/10.5194/piahs-369-115-2015>.
11. Forecast Verification methods Across Time and Space Scales. Доступна online: https://www.cawcr.gov.au/projects/verification/#Links_to_other_verification_sites. Дата обращения: 31 August 2023.

Современное состояние государственной гидрологической сети наблюдений в Арктической зоне РФ

О.В. Муждаба*, А.В. Штанников, М.В. Третьяков

*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург
aqua_olga@aari.ru*

Аннотация. Рассматривается современное состояние и работа государственной гидрологической и устьевой сети больших рек, впадающих в моря, расположенной в Арктической зоне РФ. На основе сведений, предоставленных Управлениями по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, выполнен анализ актуального состояния сети гидрологических наблюдений. Сделаны выводы о фактическом состоянии и производстве работ на гидрологической сети, о составе, качестве и полноте наблюдений, включая измерения расходов воды. Обсуждаются вопросы надежности высотной основы пунктов наблюдений, кадрового дефицита, результаты автоматизации наблюдений. Предложены возможные пути решения недостатков организации и обеспечения гидрологических наблюдений в современных условиях.

Ключевые слова: гидрологическая сеть, научно-методическое руководство, Арктическая зона, Росгидромет.

Current status of the state hydrological observation network in the Arctic zone of the Russian Federation

O.V. Muzhdaba*, A.V. Shtannikov, M.V. Tretiakov

*Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia
aqua_olga@aari.ru*

Abstract. In this contribution, we consider the present state and operation of the state hydrological and estuarine network of large rivers flowing into the seas located in the Arctic zone of the Russian Federation. Based on the data provided by the Hydrometeorology and Environmental Monitoring Departments, the analysis of the current state of the hydrological observation network is made. Conclusions are drawn on the actual state and work on the hydrological network, on the composition, quality and completeness of observations, including measurements of water discharge. We discuss the issues of reliability of the altitude base of observation points, staff shortage, and the results of observation automation. Possible solutions to the shortcomings of hydrological observation organisation and provision under current conditions are proposed.

Keywords: hydrological network, scientific and methodological guidance, Arctic zone, Roshydromet.

Введение

В соответствии с нормативными документами Росгидромета [4] Арктический и антарктический НИИ (ААНИИ) осуществляет научно-методическое руководство сетью гидрометеорологических наблюдений на поверхностных водных объектах суши Арктической зоны РФ (АЗРФ). Сухопутная площадь АЗРФ в современных административных границах занимает почти треть территории России. При этом численность арктической сети составляет 213 гидрологических постов на реках и озерах, 60 постов и станций, в устьевых областях больших рек и 46 морских береговых станций,

что в сумме составляет всего 11% от общего количества наблюдательных подразделений (НП) Росгидромета. Расположение арктической сети представлено на Рис. 1.

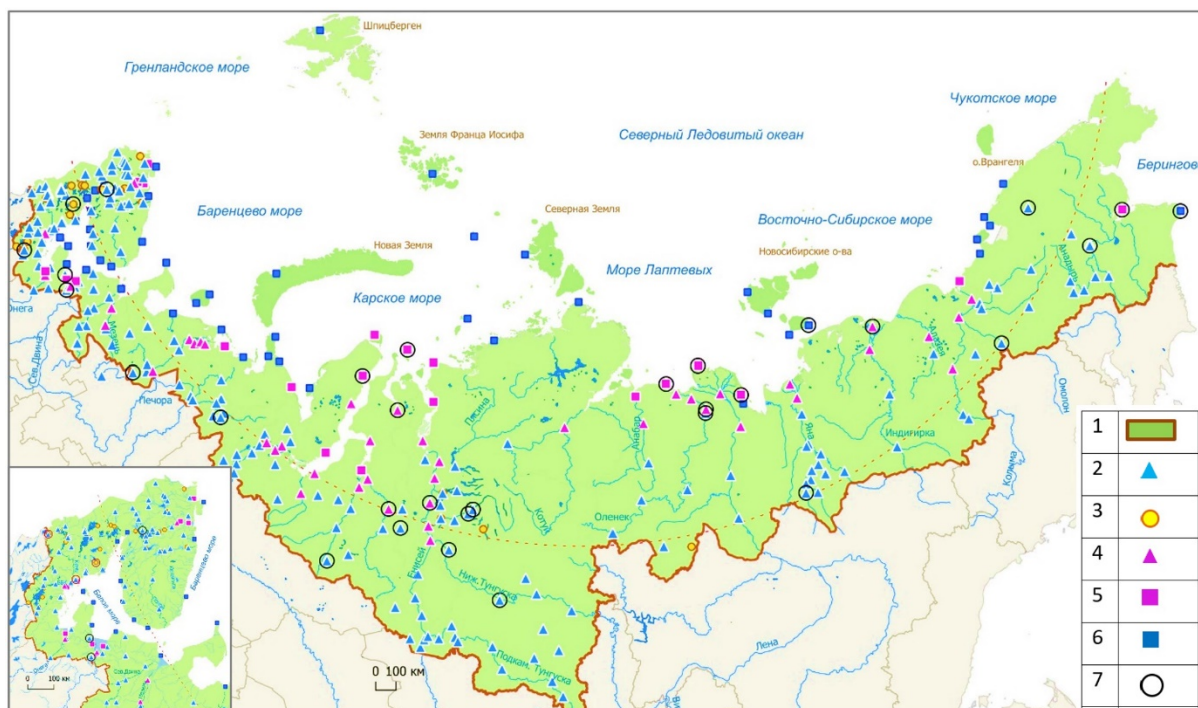


Рис. 1 Действующая гидрометеорологическая наблюдательная сеть Росгидромета в Арктической зоне РФ по состоянию на 01.01.2023 г. Условные обозначения: 1 – сухопутная территория Арктической зоны РФ; наблюдательная сеть: 2 – гидрологическая речная, 3 – гидрометеорологическая озёрная, 4 – гидрологическая устьевая, 5 – гидрометеорологическая морская в устьевых областях больших рек, 6 – гидрометеорологическая морская вне устьевых областей больших рек, впадающих в море, 7 – законсервированная или неработающая.

Целью исследования является анализ фактического состояния гидрологической сети АЗРФ. Рассматриваются вопросы состава арктических наблюдательных подразделений (НП) и его изменения в динамике за более ранние годы, качества наблюдений и работ. Отражена критическая ситуация, сложившаяся с выполнением работ по измерению расходов воды в восточной Арктике, в том числе на замыкающих створах больших рек, впадающих в моря. Обсуждаются вопросы надежности высотной основы пунктов наблюдений, кадрового дефицита, результаты автоматизации наблюдений. Сделаны выводы о фактическом состоянии наблюдений и предложены возможные пути решения недостатков организации и обеспечения гидрологических наблюдений в современных условиях.

Материалы исследования

Ежегодно – в рамках научно-методического руководства арктической сетью – в ААНИИ из УГМС (Управления) поступают сведения о состоянии наблюдений и работ на гидрологической и морской сети, расположенной в границах АЗРФ. Результаты обобщения и анализа этих материалов оформляются в виде Обзоров и высылаются руководству Росгидромета и в УГМС, а также размещаются на сайте института [3] для информирования потребителей. В данной работе кратко излагаются основные положения этого, достаточно подробного и объемного документа в части гидрологической и устьевой сети.

Результаты и выводы

Выполненная работа по анализу состояния гидрологической и гидрометеорологической сети в устьевых областях больших рек Арктической зоны РФ, позволила сформулировать следующие выводы и рекомендации.

Объём и качество производимых наблюдений на гидрологической сети АЗРФ нельзя назвать удовлетворительным и соответствующим современным требованиям экономики столь важного и сложного макрорегиона России и характеризуется крайней неравномерностью и по территории АЗРФ, и по зонам ответственности УГМС. В европейской части (Мурманское и Северное УГМС, Карельский ЦГМС) и в Ямало-Ненецком АО (Обь-Иртышское УГМС) наблюдения производятся с хорошим качеством и достаточной полнотой. В восточной Арктике Управления (Северное, Средне-Сибирское, Якутское и Чукотское) испытывают непреодолимые трудности из-за катастрофического отсутствия квалифицированных специалистов в сетевых и наблюдательных подразделениях и на протяжении уже многих лет вынуждены снимать с плана сложные виды гидрологических работ.

По состоянию на 01.01.2023 г. в АЗРФ действовало 351 НП гидрометеорологической и гидрологической сети. Из них фактически работало 319, что составляет 91% от списочного состава сети. Тенденция сокращения наблюдательной сети, резко обозначившиеся после 1990 г., продолжается и в настоящее время, хотя и замедлилась. Критически мала численность сети на реках бассейнов морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Берингова в границах АЗРФ. С 1995 г. полностью прекращены наблюдения на реках бассейна Чукотского моря. Численность НП по бассейнам морей представлена на Рис. 2.

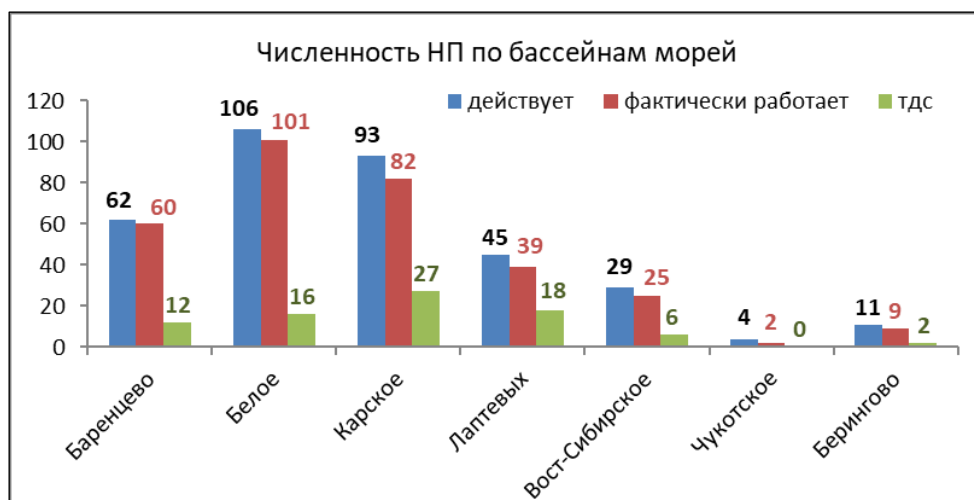


Рис. 2 Количественный состав гидрометеорологической и гидрологической сети в 2022 г по бассейнам морей, водосборы или части которых расположены в АЗРФ.

В последние 10 лет на территории современной Арктической зоны РФ закрыты или прекратили работу 46 НП. За это же время на арктических территориях был организован (в 2020 г.) всего лишь один новый гидрологический пост.

Регулярное проведение инспекций станций и постов методистами Управлений – действенная мера по обеспечению качества гидрологических наблюдений и работ. Однако для проведения инспекций не менее 2-х раз в год (по нормативным документам) требуются значительные денежные средства, прежде всего, на транспортные расходы. Таким образом на многих труднодоступных НП контрольное нивелирование водомерных устройств ежегодно не проводится. Зачастую к нивелированию постов привлекаются специалисты метеорологических станций, в отдельных случаях и наблюдатели постов. Из-за сложной логистики и отсутствия средств на

командировочные расходы межинспекционные периоды в некоторых случаях уже достигли 30 лет (5 постов), более десятка лет методистами не посещались 11 постов в восточной Арктике. В Якутском и Среднесибирском УГМС посты, в основном, инспектируются раз в 2-4 года.

Полностью разрушена система специальных наблюдений на гидрометеорологической наблюдательной сети на устьевых взморьях больших рек, включая рейдовые наблюдения. Все устьевые гидрологические посты, расположенные на устьевых участках рек и находящиеся в зоне переменного подпора со стороны моря, вынужденно работают программам речных постов, проводя наблюдения в 2 срока [3, 5].

Сохраняются тенденции по прекращению измерений расходов воды на постах ГП-1, перевод постов на экспедиционное обслуживание, снятия с постов реперного статуса с возможностью их последующего закрытия.

В Росгидромете успешно идет процесс внедрения в работу мобильных гидрологических лабораторий (МГЛ) на основе производственных подразделений Управлений. Такая организация наблюдений показала свою эффективность в регионах с развитой транспортной сетью, но связана с определенными трудностями в полярных арктических районах. В восточной части АЗРФ из-за огромных расстояний, мобильные экспедиционные группы (гидропартии) вынуждены использовать авиатранспорт, ограничены в средствах на командировочные расходы и не способны обеспечить полный комплекс измерений на удалённых постах при краткосрочных и эпизодических посещениях и получить данные наблюдений, удовлетворяющие требованиям ведения Водного кадастра.

По состоянию на 01.01.2023 в АЗРФ работало 39 автоматизированных гидрологических комплексов (АГК), что составляет 14% гидрологической арктической сети. При этом лишь 9% АКГ работало хорошо и корректно, а данные наблюдений использовались в режимной обработке и для оперативных целей. На этом фоне более благополучно выглядит ситуация в Мурманской области, где эффективная автоматизация внедрена на половине наблюдательной сети. При этом автоматизация практически не затронула устьевую сеть больших рек. Лишь устьевая сеть европейских рек (Северное УГМС), в достаточной мере оснащена автоматическими средствами измерений. Устьевая сеть других больших рек не оснащена самописцами уровня воды на постах, расположенных в зоне переменного подпора со стороны моря. Следует обеспечить круглогодичное измерение уровня воды с ежечасной дискретностью на станциях и постах, расположенных на устьевых взморьях и на участках боковых притоков устьевой области, подверженных влиянию моря.

Состояние работ по измерению расходов воды на большей части арктической территории можно назвать критическим. В настоящее время плотность стоковой сети в регионе находится на самом низком уровне после 1985 г. Параметры плотности не соответствует нормам ВМО [1] и в европейской части ниже рекомендованных почти в 4 раза, в десятки раз в восточной АЗРФ. Плотность стоковой сети по арктическим районам субъектов РФ представлена на Рис. 3.

Основные причины недостаточности измерений на малых и средних реках – отсутствие средств на приобретение оборудования и его монтаж для восстановления гидрометрических створов в труднодоступных районах, а также невозможность обеспечить проведение этих работ соответствующими специалистами из-за нехватки финансовых средств для оплаты.

На больших реках положение усугубляется отсутствием катеров и судов необходимого класса (типа «Ярославец», «Водолазный бот» или соизмеримых по осадке) для измерений расходов воды в период открытого русла.

Более двух десятилетий не находит разрешения ситуация с недостаточностью или полным отсутствием в течение года измерений водного стока на замыкающих створах

больших и полизональных рек, впадающих в моря. В 2022 г. из 20 больших рек только на трех замыкающих створах рек (Сев. Двина, Печора, Оленёк) выполнен план по измерению расходов воды, и амплитуда колебаний уровня воды достаточно освещена измеренными расходами, что позволяет выполнять оценку речного стока с достаточной степенью надёжности. На других больших реках фактические измерения на замыкающих створах не достигают необходимых плановых показателей, а на замыкающих створах всех больших рек Восточно-Сибирского, Чукотского и Берингова морей измерения расходов воды отсутствуют полностью и этот период увеличивается с каждым годом, достигая уже трёх десятилетий. Современные трудности и недостатки наблюдений за уровнями и расходами воды на устьевой сети детально рассматриваются в работе [5].

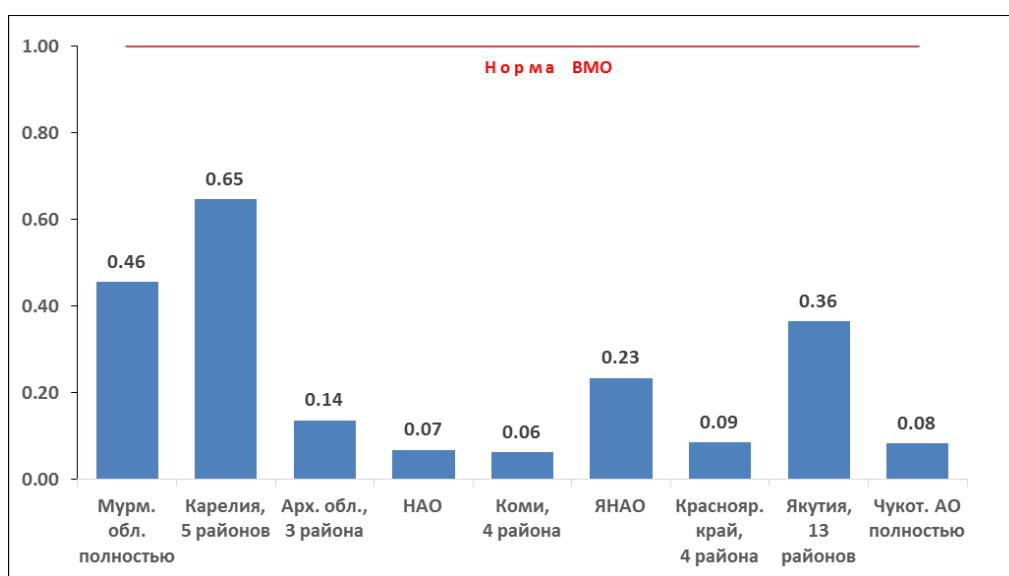


Рис. 3 Плотность стоковой сети по арктическим районам субъектов РФ.

В целях получения обоснованных знаний, надлежащего научного обеспечения наблюдаемых и прогнозируемых изменений климата необходимо восстановить круглогодичные наблюдения за водным стоком, стоком взвешенных наносов и содержанием гидрохимических и биогенных элементов в устьях крупнейших рек восточной Арктики – Енисей, Хатанга, Анабар, Лена, Яна, Алазея, Индигирка, Колыма и Анадырь. Указанные мероприятия могут быть осуществлены в рамках программы «Единая цифровая платформа Росгидромета» [2].

Современное состояние высотной основы пунктов наблюдений гидрологической сети в АЗРФ, особенно в её азиатской части можно считать неудовлетворительным. На 35 постах репера Росгидромета пришли в полную негодность, требуют перезакладки либо полностью уничтожены.

Критическое положение фиксируется в Арктике и с реперами Государственной геодезической сети, необходимыми для привязки высотной основы гидрологических постов к Балтийской системе высот (БС) и установки современного оборудования, в том числе автоматизированных комплексов. В основном это обусловлено отсутствием пунктов геодезической сети, указанных в выписках Росреестра, а также значительным удалением исходных пунктов геодезической сети от гидрологических постов. Многие репера ГУГК утрачены или находятся в неудовлетворительном состоянии. Почти треть постов (84 НП) гидрологической сети АЗРФ не имеют необходимого репера ГУГК для переуравнивания их высотной основы в БС-77.

Следует провести обновление планово-высотной основы постов и обеспечить их необходимым количеством реперов (оптимально 3 репера: основной, контрольный и

рабочий). Затем в обязательном порядке заново выполнить привязку реперов к государственной геодезической сети, чтобы убедиться, насколько длительное отсутствие необходимого количества реперов и нерегулярное выполнение контрольных нивелировок могли привести к нарушению однородности уровней рядов.

Сложная и практически неразрешимая ситуация складывается с кадровым обеспечением арктических оперативно-методических и наблюдательных подразделений. Значительная часть гидрологических постов не работает или законсервирована (32 НП, что составляет 9% от списочного состава гидрологической сети АЗРФ) вследствие невозможности найма наблюдателей из-за крайне низких зарплат, а также из-за отсутствия трудоспособных жителей в населенных пунктах.

Укомплектованность специалистами методических подразделений гидрологической сети составляет 78%, из них менее половины (45%) имеют профильное образование. Оперативно-методические центры – основа качественного функционирования наблюдательной сети продолжают терять квалифицированные кадры. Одним из вариантов привлечения и заинтересованности молодых специалистов для работы на арктической сети могло бы стать предоставление государственной льготной ипотеки после накопления определённого трудового стажа.

Также наметилась противоречивая тенденция между стремлением руководства страны, в том числе в лице Росгидромета, обеспечить высокотехнологичным и крайне дорогим оборудованием наблюдательную арктическую сеть и полным отсутствием социально-экономической поддержки квалифицированного персонала для ее обслуживания в долгосрочном плане. В итоге современное оборудование и дорогостоящие приборы используются неэффективно, АГК работают некорректно, простаивают из-за поломок или даже не установлены.

В реализации ведомственного проекта «Развитие системы государственного мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды в АЗРФ» [2] или в рамках планируемой к исполнению программы «Единая цифровая платформа Росгидромета» [2] должны быть отдельно прописаны вопросы кадрового обеспечения деятельности Росгидромета.

Развитие системы государственного мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды в АЗРФ должно вестись комплексно – с обязательной проработкой вопроса подготовки и дальнейшей поддержки специалистов гидрометеорологического профиля для работы в Арктике. К этой работе целесообразно активно привлекать муниципалитеты для решения их социальных проблем через трудоустройство местного населения.

Список литературы

1. ВМО-№ 168 Руководство по гидрологической практике. Том I. Гидрология: от измерений до гидрологической информации. Женева: ВМО, 2011. 314 с.
2. Декларация целей и задач Росгидромета на 2023 г. Доступна online: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_445056/ Дата обращения: 23.07.2023.
3. Обзор состояния и работы гидрологической сети в Арктической зоне Российской Федерации за 2022 год. СПб.: ААНИИ, 2023. Доступен online: <https://www.aari.ru/assets/files/93/57t0bk-93-obzor-hydronet-azrf-2022.pdf> Дата обращения: 23.07.2023.
4. РД 52.04.567-2003. Руководящий документ. Положение о государственной наблюдательной сети. СПб., 2003. 45 с.
5. Третьяков М.В., Муждаба О.В., Пискун А.А., Терехова Р.А. Состояние гидрологической сети наблюдений Росгидромета в устьевых областях рек АЗРФ // Водные ресурсы. 2022. Т. 4. № 5. С. 583–595. DOI: 10.31857/S0321059622050157

Особенности формирования и развития таликов на примере оазиса Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида)

А.В. Немчинова^{1,2*}, С.В. Попов^{1,4}, А.С. Боронина^{2,4}, Л.С. Лебедева², А.С. Бирюков⁴

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

²Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

³Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия

⁴Полярная Морская Геологоразведочная Экспедиция, г. Санкт-Петербург, Россия
nemchinova02@mail.ru

Аннотация. В настоящем исследовании представлены результаты математического моделирования формирования и эволюции субаэриальных таликов в верхних слоях пород холмов Ларсеманн (Восточная Антарктида). Было рассмотрено четыре смоделированных сценария с различными метеоусловиями. Моделирование показало, что талики на холмах Ларсеманн (Восточная Антарктида) могут образовываться, но находятся в нестабильном состоянии, что подразумевает их не долгосрочность существования. Основным условием формирования талых зон в районе исследования является наличие снежного покрова в зимнее время и его отсутствие в летнее.

Ключевые слова: Антарктические оазисы, мерзлота, субгляциальные талики, уравнение теплопроводности, задача Стефана, конечно-разностные схемы.

Features of the formation and development of taliks on the example of the Larsemann Hills Oasis (East Antarctica)

A.V. Nemchinova^{1,2*}, S.V. Popov^{1,4}, A.S. Boronina^{2,3}, L.S. Lebedeva², A.S. Biryukov⁴

¹Saint-Petersburg State University, St. Petersburg

²Melnikov Permafrost Institute, Yakutsk, Russia

³State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

⁴Polar Marine Geosurvey Expedition (PMGE), St. Petersburg, Russia
nemchinova02@mail.ru

Abstract. This study presents the results of mathematical modeling of the formation and evolution of subaerial taliks in the upper layers of rocks of the Larsemann hills (East Antarctica). Four simulated scenarios with different weather conditions were considered. Modeling has shown that taliks on the Larsemann hills (East Antarctica) can form, but are in an unstable state, which implies their non-long-term existence. The main condition for the formation of melt zones in the study area is the presence of snow cover in winter and its absence in summer.

Keywords: Antarctic oasis, permafrost, subaerial taliks, heat equation, Stefan problem, finite difference schemes.

Введение

Вся непокрытая льдом территория континента Антарктиды попадает в зону распространения многолетнемерзлых пород, так как среднегодовые температуры окружающего воздуха отрицательные и сплошной растительный покров отсутствует [4;

5]. Исследования распространения многолетней мерзлоты в Антарктиде начались ещё в 50-х годах прошлого столетия и продолжаются и по сей день.

Известно, что до 1960-х годов под ледниковым покровом континента предполагалось повсеместное распространение многолетней мерзлоты. Однако с течением времени стало понятно, что применительно к субгляциальной среде Антарктиды вопрос распространения мерзлоты не так прост, как кажется на первый взгляд. После доказательства теории о таянии ледника спровоцированное увеличением его мощности, исследователи пришли к выводу, что многолетняя мерзлота, вероятно, распространена только по периферии ледника, где его мощности не превышают 1500-2000 м. Однако подтвердить это предположение как тогда, так и сейчас крайне затруднительно ввиду практически полного отсутствия данных термометрии подледниковых озёр и отобранных образцов горных пород. Многочисленные подледниковые озёра, водные прослойки и присутствие влажного грунта лишней раз определяют сложность и неоднозначность существующих представлений о распространении субгляциальной многолетней мерзлоты и указывают на актуальность этой научной проблемы.

Настоящая работа посвящена выяснению возможности существования субаэральные и субгляциальные талики в районе оазиса Холмы Ларсеманн (Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида), а также выяснению вклада различных факторов на процесс их формирования и эволюции. Основой оценки является математическое моделирование, базирующееся на метеорологических и геофизических данных.

Материалы и методы исследования

В рамках изучения многолетней мерзлоты Центральной Якутии была разработана и реализована в виде компьютерной программы модель формирования и развития таликов. Она основана на решении одномерной, многослойной и многофазной задачи Стефана. В рамках настоящей работы авторы предприняли попытку применить этот положительный опыт для выяснения возможностей формирования и развития *субаэральных* (т.е. на открытой местности) таликов на Холмах Ларсеманн в Восточной Антарктиде.

Концептуально модель представляется следующим образом. В нижней части разреза имеется полуограниченный слой многолетнемерзлых горных пород Ω_P (рис. 1). Выше Ω_P в период относительно тёплого антарктического лета располагается талый слой Ω_T . Выяснение того, имеется ли он также и в холодный зимний период, является задачей настоящего исследования. Также, в зависимости от времени года, часть разреза занимает слой сезонномерзлых пород Ω_F . В тёплое время года происходит его полное или частичное оттаивание, что приводит к образованию талой области Ω_T . С наступлением холодов она промерзает с поверхности, утончается и в конечном итоге исчезает (Рис. 1). В холодное время года на поверхности грунта формируется снежный покров Ω_S , мощность которого меняется с течением времени (Рис. 1).

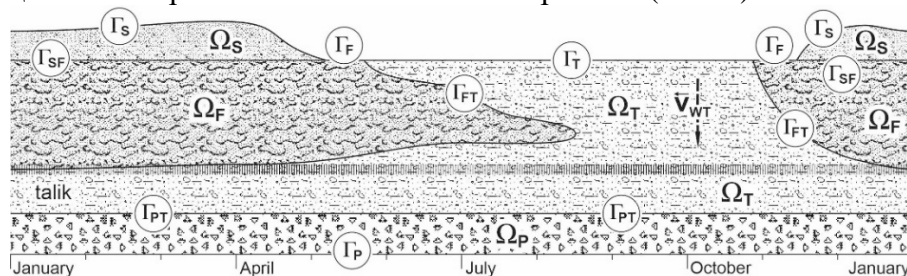


Рис. 1 Иллюстрация математической модели.

Приведённое выше описание применительно к одномерной задаче может быть представлено системой дифференциальных уравнений для каждой из сред. Совместим начало оси аппликат с поверхностью грунта (Ω_F или Ω_T), и направим её вниз. Таким образом, z будет соответствовать глубине по разрезу, при этом для слоя снега Ω_S , z будет принимать отрицательные значения. Кроме того, будем считать, что в мёрзлом грунте Ω_F , вертикальные движения, вызванные разницей плотностей воды и льда, отсутствуют, так как скорости этих деформаций пренебрежимо малы. Также будем считать, что вертикальные движения талой воды в снегу Ω_S отсутствуют. Тогда

$$\rho_j c_j \frac{\partial \theta_j}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_j \frac{\partial \theta_j}{\partial z} \right), \quad z \in \Omega_j, j = P, F, S, \quad (1)$$

где θ – температура среды, λ – её теплопроводность, c – удельная теплоёмкость, и ρ – плотность. В то же время будем полагать возможным вертикальную фильтрацию воды в талый грунт Ω_T со скоростью v_w , которая, ввиду предельного водонасыщения грунта, не будет меняться с глубиной. Если считать, что $v_w(z)$ достаточно мала, и вода в процессе фильтрации успеваает до своей температуры нагреть (или охладить) слой грунта, в котором она перемещается, тогда

$$\rho_T c_T \frac{\partial \theta_T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_T \frac{\partial \theta_T}{\partial z} \right) + v_w \frac{\partial \theta_T}{\partial z}, \quad z \in \Omega_T \quad (2)$$

Здесь и далее, индексы $j = P, T, F, S, I, W$ соответствуют перечисленным выше областям: permafrost, thawed soil, frozen soil, snow, ice and water.

Формулировка краевой задачи требует наличия граничных и начальных условий. На нижней границе Γ_P задаётся постоянная температура многолетнемёрзлых пород $\bar{\theta}_p$, которая, согласно опубликованным данным, для обсуждаемого района составляет $\bar{\theta}_p = -8,5^\circ\text{C}$ [7]. Условие на верхней границе, т.е. на Γ_S , Γ_M и Γ_F , задаётся теплообменом с атмосферой. Граничным условием между талыми и мёрзлыми породами, т.е. $\Gamma_{FT} = \Omega_F \cap \Omega_T$ и $\Gamma_{PT} = \Omega_P \cap \Omega_T$ является условие Стефана, а для остальных границ – условие четвёртого рода (сшивки). В качестве временного интервала для моделирования выберем 20-е октября 2012 года – 5-е мая 2023 года. В качестве начального распределения температуры в толще зададим постоянную температуру по глубине, равную $\bar{\theta}_p$. Поскольку $\bar{\theta}_p < 0$, в начальный момент времени область талика отсутствует.

Вышеизложенное может быть представлено следующими уравнениями, которые дополняют (1) и (2):

$$\lambda_F \frac{\partial \theta_F}{\partial z} \Big|_{\Gamma_{FT}} - \lambda_T \frac{\partial \theta_T}{\partial z} \Big|_{\Gamma_{FT}} = \frac{q_F}{2} \omega_{FT} (\rho_F + \rho_T) \frac{dz_{FT}}{dt} \Big|_{\Gamma_{FT}}, \quad \lambda_S \frac{\partial \theta_S}{\partial z} \Big|_{\Gamma_{SF}} = \lambda_F \frac{\partial \theta_F}{\partial z} \Big|_{\Gamma_{SF}},$$

$$\lambda_P \frac{\partial \theta_P}{\partial z} \Big|_{\Gamma_{PT}} - \lambda_T \frac{\partial \theta_T}{\partial z} \Big|_{\Gamma_{PT}} = \frac{q_F}{2} \omega_{PT} (\rho_P + \rho_T) \frac{dz_{PT}}{dt} \Big|_{\Gamma_{PT}}, \quad \theta_P \Big|_{\Gamma_P} = \bar{\theta}_p \quad (3)$$

$$\theta_P(z) \Big|_{t=0} = \theta_F(z) \Big|_{t=0} = \theta_S(z) \Big|_{t=0} = \bar{\theta}_p, \quad \lambda_j \frac{\partial \theta_j}{\partial z} \Big|_{\Gamma_j} = \alpha_E (\theta_0 - \theta_E), \quad j = T, F, S,$$

где q_F – удельная теплота плавления, $q_F = 332$ кДж/кг, α_E и θ_E – эффективные значения коэффициента теплообмена и температуры окружающего воздуха, которые описываются уравнениями состояния.

Обратимся к граничному условию на поверхности, т.е. последнему из соотношений (3). Как указывалось выше, оно задаётся теплообменом с атмосферой, и имеется множество эмпирических соотношений для различных ситуаций. В наших расчётах будем использовать модель, опубликованную в работе [3], которая успешно применялась для моделирования процессов теплопереноса в российском секторе Арктики и для ледников Шпицбергена [2]. Этот подход предполагает, что условие теплообмена с атмосферой включает в себя суммарный тепловой поток Q_{Σ} ,

$$Q_{\Sigma} = Q_T + Q_E + Q_R - Q_S,$$

где Q_T , Q_E , Q_R и Q_S – потоки тепла соответственно за счёт конвективного теплообмена, испарения, эффективного излучения и солнечной радиации. Именно эта величина и соответствует правой части последнего уравнения (3), при этом эффективные значения коэффициента теплоотдачи α_E и температуры окружающего воздуха θ_E могут быть найдены по соотношениям

$$\begin{aligned} \alpha_E &= \alpha(1 + 1,95 \times 10^{-2} a) + 0,205(\theta_A / 100)^3 \\ \theta_E &= \left\{ \alpha \left[\theta_A - 1,95 \times 10^{-2} (b - p_A \omega_A) \right] + 19,9(\theta_A / 100)^4 + \Lambda_S \right\} / \alpha_E, \end{aligned} \quad (4)$$

где α – коэффициент теплоотдачи поверхности, θ_A – температура окружающего воздуха, p_A и ω_A – упругость насыщенного водяного пара при температуре θ_A и относительная влажность воздуха соответственно.

Изложенная выше задача решалась численно. Для её реализации использована неявная конечно-разностная схема с переменным шагом и последующим применением метода прогонки [1]. Компьютерная программа создавалась на Delphi под управление ОС MS Windows 11. В качестве компилятора использовался пакет Embarcadero Delphi 10.4 Sydney (Embarcadero Technologies, Inc., USA).

Результаты и выводы

На основе представленной выше модели была выполнена серия сценарных расчётов. Они различались граничными условиями на поверхности, прежде всего, температурой окружающего воздуха, а также толщиной снежного покрова и продолжительностью его наличия. Для всех сценариев расчётная толщина грунта задавалась 10 м, что вполне достаточно для наличия значительного запаса холода. На нижней границе задавалась средняя величина геотермического потока, равная 54.6 мВт/м² [6].

Первый сценарный расчёт был основан на реальных данных метеостанции Прогресс, полученных за период с 20 октября 2012 г. по 5 мая 2023 г. Они включали в себя температуру и влажность окружающего воздуха, скорость ветра и высоту солнца над горизонтом. Этот сценарный расчёт выполнялся из предположения о наличии нетающего снежного покрова постоянной толщиной 0,6 м, поскольку на рассматриваемой территории имеется множество снежников различной мощности. Расчёты показывают, что талик не формируется, и происходит общее охлаждение грунта. Это объясняется тем, что снег является хорошим изолятором, который препятствует проникновению солнечного тепла в грунт. Распределение температуры по глубине с течением времени показано на Рис. 2а.

Второй сценарный расчёт выполнялся для ситуации, когда сразу после установления положительных температур на территории оазиса происходило полное таяние снега, а при наступлении отрицательных температур наблюдалось его формирование. Тогда, исходя из температурных данных, началом формирования снежного покрова будет 5-е февраля, а полный его сход 7-го декабря. Максимум толщины снега соответствует 25-му октября. Распределение температуры по глубине с

течением времени показано на Рис. 2б. Как следует из него, талики также не формируются, но в летнее время, за счёт стаивания снега, грунт прогревался, что приводило к приповерхностному таянию. В результате оттаивание происходило на глубину около одного метра.

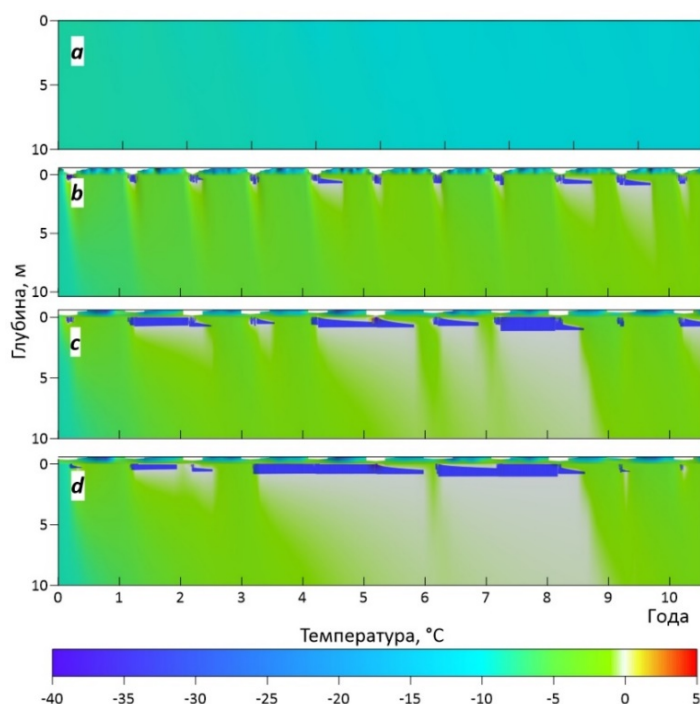


Рис. 2 Распределение температуры с глубиной для различных сценариев: **a** – сценарий 1; **b** – сценарий 2; **c** – сценарий 3; **d** – сценарий 4.

Третий сценарный расчёт выполнялся для территории оазиса, на которой снежный покров начинает формироваться на пятнадцать дней раньше момента установления отрицательных температур окружающего воздуха. Дату достижения максимальной высоты снежного покрова оставим прежней. Распределение температуры по глубине с течением времени показано на Рис. 2с. Как следует из представленного рисунка, за период моделирования три раза: между 4-ым и 5-ым годом, и в период с 8-го по 10-ый, формировались только перезимки. Каждый из них просуществовал около года. Талик, пусть и кратковременно, сформировался так как за тёплые летние месяцы осуществлялся постоянный прогрев грунта, в том числе и в ночное время, поскольку Солнце в этих широтах не заходит. При этом более раннее начало залегания снега, по сравнению с предыдущим сценарием, не позволил потерять накопленное тепло.

Четвёртый сценарный расчёт проводился для тех областей оазиса, на которых снежный покров сходит через 15 дней после установления положительных температур, а формироваться начинает за 20 дней до установления отрицательных. Дату достижения максимальной высоты снежного покрова оставим прежней. Распределение температуры по глубине с течением времени показано на Рис. 2d. Как следует из представленного рисунка, талики формировались дважды с продолжительностью два года. Здесь ситуация более удачная для прогрева грунта, чем в предыдущем сценарии. Полярный день на Прогрессе начинается 20-го ноября. Это означает, что поверхность, в том числе и свободная от снега, постоянно получает солнечное тепло. Однако, отрицательные температуры окружающего воздуха в ночные часы сохраняются. Это означает, что при недостаточном поступлении солнечного тепла, происходит выхолаживание грунта. Если же снег начнёт залегать позже, то, несмотря на отрицательные температуры окружающего воздуха, это приведёт к большей аккумуляции общего количества полученного тепла, и, как следствие, к более устойчивому формированию таликов.

Таким образом, в районе оазиса Холмы Ларсеманн талики имеются, но они находятся в неустойчивом состоянии. Моделирование показывает, что для формирования устойчивых таликовых зон, количества тепла, поступающего в летнее время, недостаточно. Однако при условии общего потепления климата, которое повлияет как на летние, так и на зимние температуры окружающего воздуха, ситуация с формированием устойчивых таликовых зон может измениться. Анализ климатических данных показывает, что имеется значимый положительный тренд, температуры окружающего воздуха, соответствующий $0.0973^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Следовательно, к 2030 году средняя температура окружающего воздуха в районе Холмов Ларсеманн может подняться почти на один градус. Это вполне может стать решающим фактором, который запустит механизм формирования устойчивых таликов. Помимо этого, уменьшение облачности в летнее время также может повысить поток солнечной радиации от 10% до 30%, что приведёт к значительно большему поступлению тепла в грунт.

Благодарности

Авторы благодарят А.В. Сосновского и А.Н. Саламатина за содержательные консультации и рекомендации, которые прояснили ряд важных вопросов и улучшили настоящее научное исследование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда и Якутского научного фонда Проект № 22-17-20040 «Субаэральные и подошёрные талики в сплошной криолитозоне Восточной Сибири: происхождение, современное состояние и реакция на изменение климата».

Acknowledgments

We would like to thank A.V. Sosnovsky and A.N. Salamatina who have assisted us in various ways and have thus contributed to the results obtained in this study. This study was financially supported by the Russian Science Foundation and Yakut Science Foundation Project No 22-17-20040 «Subaerial and lake taliks in continuous permafrost in Eastern Siberia: genesis, current state and reaction to climate change».

Список литературы

1. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Численные методы решения задач конвекции-диффузии. – 2003.
2. Сосновский А.В. Математическое моделирование влияния толщины снежного покрова на деградацию мерзлоты при потеплении климата // Криосфера Земли. 2006. Т. X. №3, С. 83–88.
3. Сосновский А.В. Расчет оптимальной толщины слоя водно-ледовой смеси при намораживании льда на больших площадях // Материалы гляциол. исслед. 1984. № 50. С. 223–231.
4. Bockheim J.G., Hall K.J. Permafrost active layer dynamics and periglacial environments of continental Antarctica // South African J. Sci., 2002, vol. 98 (1–2), p. 82–90.
5. Dobinski W, Szafraniec JE, Szypuła B. Area and borders of Antarctic and permafrost—A review and synthesis. Permafrost and Periglac Process. 2022;1-15. doi:10.1002/ppp.2170
6. Martos, Y. M., Catalán, M., Jordan, T. A., Golynsky, A., Golynsky, D., Eagles, G., Vaughan, D. G., 2017. Heat flux distribution of Antarctica unveiled. Geophysical Research Letters, 44(22), 11-417.
7. Vieira, G., Bockheim, J., Guglielmin, M., Balks, M., Abramov, A. A., Boelhouwers, J., ... Wagner, D., 2010. Thermal state of permafrost and active-layer monitoring in the antarctic: Advances during the international polar year 2007–2009. Permafrost and Periglacial Processes, 21(2), 182-197.

Исследование влияния добычи россыпного золота на формирование стока рек Магаданской области. Предварительные результаты

П.А. Никитина^{1*}, О.М. Макарьева^{1,2}, А.Н. Шихов^{1,3}, А.А. Землянскова^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

²Северо-восточный государственный университет, г. Магадан, Россия

³Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия
nikitina.polina243@gmail.com

Аннотация. В работе представлены первые результаты моделирования формирования стока рек с использованием модели «Гидрограф» на примере р. Амбардах – п. Тонгара (данные по расходам воды 1960–1987 гг.) и р. Сусуман – п. Тонгара (данные по расходам воды 1966–1987 гг.), чьи долины включают нарушенные ландшафты (1,6 – 3 % от площади бассейна). Также сделаны предварительные выводы о влиянии нарушенных территорий на стокоформирующие характеристики поверхности бассейна.

Ключевые слова: модель «Гидрограф», нарушенные ландшафты, гидрологическое моделирование.

Researching of the influence of placer gold mining on the formation of river flow in the Magadan region. Preliminary results

P.A. Nikitina^{1*}, O.M. Makarieva^{1,2}, A. N. Shikhov, A.A. Zemlianskova

¹Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

²Northeastern State University, Magadan, Russia

³Perm State University, Perm, Russia
nikitina.polina243@gmail.com

Abstract. The paper presents the first results of river flow formation modelling using the "Hydrograph" model on the example of the Ambardakh River - Tongara settlement (runoff data from 1960-1987) and the Susuman River - Tongara settlement (runoff data from 1966-1987). Enumerated watersheds include disturbed landscapes (1.6 - 3 % of the basin area). Preliminary conclusions on the influence of disturbed areas on the flow-forming characteristics of the basin surface were also made.

Keywords: model «Hydrograph», disturbed landscapes, hydrological modelling.

Введение

Магаданская область занимает первое место в России по добыче россыпного золота. Золотодобыча на россыпных месторождениях сопровождается значительным воздействием на природную среду, в частности загрязнением рек взвешенными веществами и тяжелыми металлами, нарушением ландшафтов. Основное воздействие, связанное с дражной добычей золота, происходит в долинах рек, русла которых подвергаются значительной деформации. Многочисленные пруды-отстойники и русловая сеть антропогенного происхождения подвержены процессам заиливания и заболачивания. Образуются дамбы, которые в периоды интенсивных осадков могут прорываться и приводить к формированию катастрофических паводков. По данным [1] площадь нарушенных территорий для Магаданской области составляет порядка 720,5 км², большая часть которой характерна для Сусуманского и Тенькинского районов.

Одним из проблемных населенных пунктов Магаданской области в этом отношении является г. Сусуман, где в последнее десятилетие катастрофические наводнения наблюдались в 2016 и 2019 гг.

В исследовании предлагается провести количественную оценку вклада климатических изменений и антропогенного воздействия (нарушение ландшафтов речных долин и деформация русел, Рис. 1) в формирование опасных гидрологических явлений на примере р. Берелех (г. Сусуман). Это позволит оценить возможный ущерб от несвоевременных мер рекультивации речных долин и разработать рекомендации по снижению рисков затопления и минимизации ущерба.



Рис. 1 Пример нарушенных ландшафтов в долине р. Берелех (Сусуманский район Магаданской области).

На первом этапе решены следующие задачи:

1. выполнена ретроспективная оценка динамики нарушенных ландшафтов бассейна р. Берелех;
2. проведен сбор необходимых гидрометеорологических данных, оценка параметров гидрологической модели для бассейна р. Берелех в целях моделирования процессов формирования катастрофических паводков;
3. проведено моделирование процессов формирования стока за исторический период, для которого имеются данные наблюдений за расходами воды без учета влияния нарушенных ландшафтов на формирования стока воды.

Материалы и методы исследования

Для выделения техногенных участков в пределах долины р. Берелех использовались спутниковые снимки Landsat и Sentinel-2, а также различные дополнительные данные для выделения из участков со сходными с ними спектральными характеристиками. Для верификации материалов использовался картографический слой горных отводов на территорию Магаданской области за 2021 г., а также информация из открытых источников.

Для исследований процессов формирования стока используется гидрологическая модель Гидрограф [2]. Модель Гидрограф применяется в масштабе от единичной почвенной колонки до бассейнов крупных рек без изменения структуры и набора параметров для идентичных ландшафтов. Результатами моделирования является сток воды в замыкающем створе, водный баланс, распределенные переменные состояния ландшафтов – характеристики снежного покрова, температура и влажность почвы на разных горизонтах, глубина протаивания и промерзания и др. [3; 4; 6]. Одной из ключевых особенностей модели "Гидрограф" является отсутствие ограничений, связанных с допущением о стационарности моделируемой системы, которые часто применяются в других гидрологических моделях.

Модель может учитывать изменения в ландшафте после нарушений, такие как лесные пожары, вырубка деревьев и другие изменения. Эти изменения могут быть описаны с использованием динамического набора параметров, что делает модель более гибкой [3; 4].

В качестве объектов моделирования (период 1966–1987 гг.) выбраны водосборы рек в районе исследования:

1. р. Амбардах – п. Тонгора, площадь водосбора 135 км² (1,6% – нарушенные территории), абсолютные отметки высот 707–1725 м.
2. р. Сусуман – п. Тонгора, площадь водосбора 932 км² (3% - нарушенные территории), абсолютные отметки высот 700–2096 м.

При использовании модели «Гидрограф» применяется метод последовательной оценки параметров. В настоящей работе он проводится для условий горных водосборов Северо-Востока России с учетом динамики характеристик деятельного слоя, различий ландшафтов и закономерностей процессов формирования стока, в том числе на основе данных наблюдений исторических научных стационаров, таких как Колымская водно-балансовая станция [5], стационар Сунтар-Хаята [3] и современный стационар Анмангындинская наледь [6].

Результаты

Оценка нарушенных земель. Для оценки динамики площади нарушенных земель в ходе добычи золота в долине р. Берелех был обработан ряд спутниковых снимков за период 2000–2022 г. Согласно данным за 2022 г. (Рис. 2) полностью нарушенные земли занимают 1.69% общей площади бассейна р. Берелёх (~16.5 тыс. га). В бассейне р. Берелех наблюдается значительная трансформация русла. Участки разработок занимают 16% от площади пойм этой реки, значительную долю которых представляют техногенные водоемы.

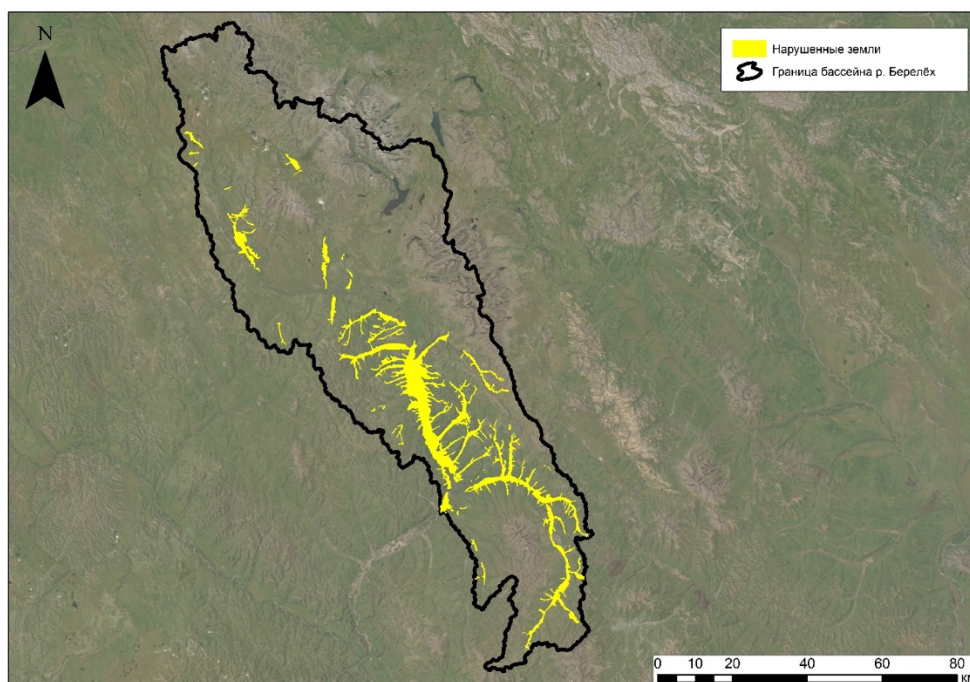


Рис. 2 Нарушенные территории в пределах бассейна р. Берелёх.

Моделирование процессов формирования стока за исторический период

Для гидрологического моделирования была проведена схематизация и параметризация выбранных водосборов. В пределах исследуемой территории на основе работ [3-6] были выделены четыре стокоформирующих комплекса (СФК), а также нанесены репрезентативные точки (РТ). В Табл. представлена информация о распределении СФК, количестве РТ для выбранных объектов, на Рис. 3 представлена схема водосборов рр. Амбардах и Сусуман.

Табл. Распределение СФК в исследуемых бассейнах

Тип СФК	Отметка высот, м	Площадь, км ² (%)	
		бассейн р. Сусуман	бассейн р. Амбардах
Гольцовые высокогорья	> 1000	415 (44,6)	58,5 (43,3)
Склоны северной и южной экспозиции	700–1000	486 (52,2)	74,4 (55,1)
Речная долина	<700	2,6 (0,3)	0,01 (≤ 0,01)
Нарушенный ландшафт		27,9 (3)	2,1 (1,6)

В качестве метеорологического входа использовались данные метеостанции Сусуман (абс. высота 650 м) – суточные величины температуры и влажности воздуха и количества осадков [2]. Для учета высотной поясности на основе данных Колымской водно-балансовой станции введены градиенты изменений метеозлементов с высотой [5].

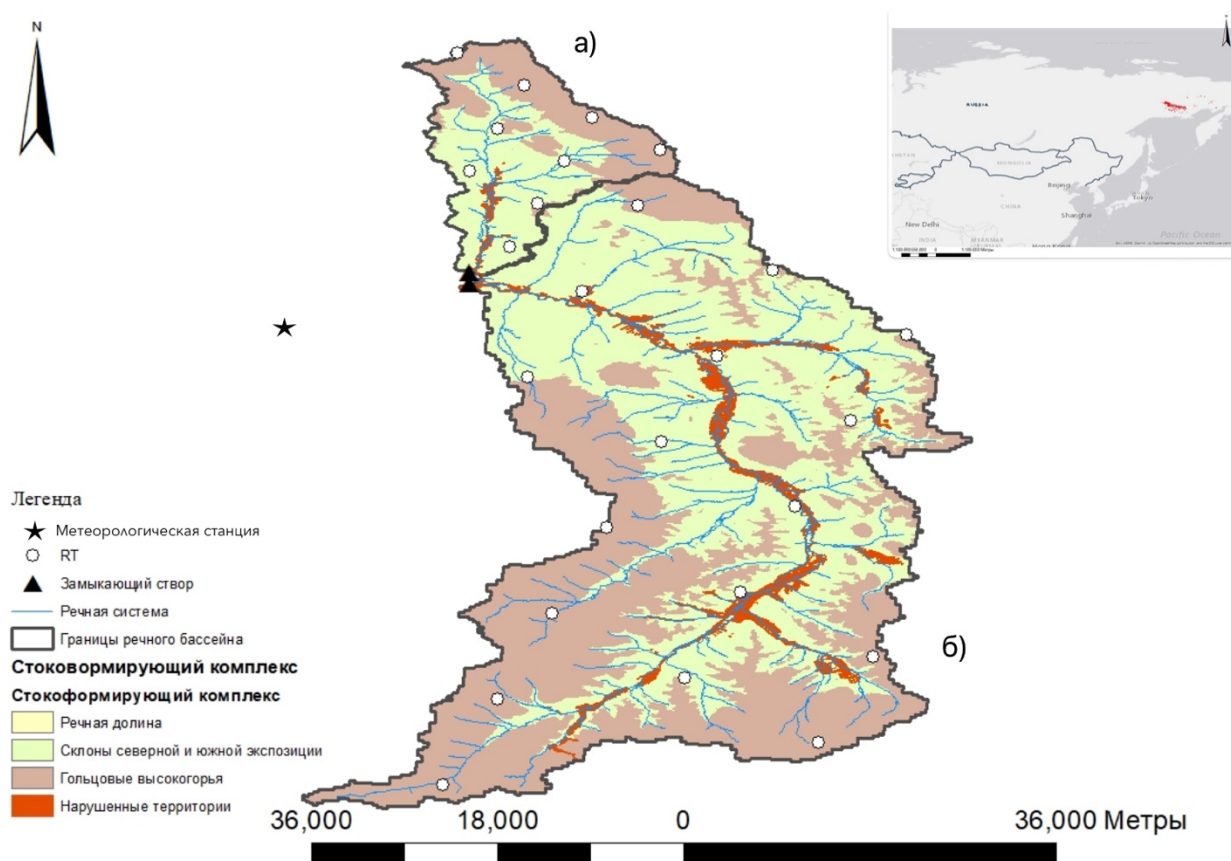


Рис. 3 Водосборы а) р. Амбардах, б) р. Сусуман, подготовленные в формате модели.

Первые результаты моделирования

На Рис. 4-5 представлены результаты моделирования гидрографов стока воды на двух водосборах за исторический период наличия рядов наблюдаемых расходов воды (1966–1987) без учета влияния нарушенных ландшафтов. Рассчитанные значения расхода воды представляют неоднозначную картину, за определенные годы критерий Нэша-Сатклифа (КНС) показывает «хороший» результат, а для других лет «неудовлетворительный». В основном рассчитанные значения расхода воды превышают максимально наблюдаемые в 1,5–2 раза, и не всегда совпадают по срокам прохождения пиков паводков. Разреженная гидрометеорологическая сеть наблюдений за осадками не

позволяет обеспечить высокую точность моделирования. Можно предположить, что при формировании стока происходит комплексирование природных и техногенных факторов.

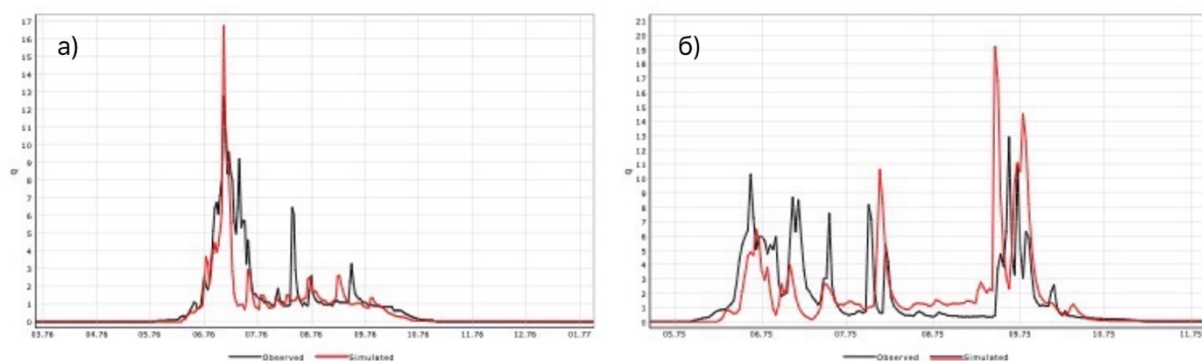


Рис. 4. Рассчитанный гидрограф стока р. Амбрадах – п. Тонгара а) 1976 г. КНС = 0,69; б) 1975 г. КНС = -0,14.

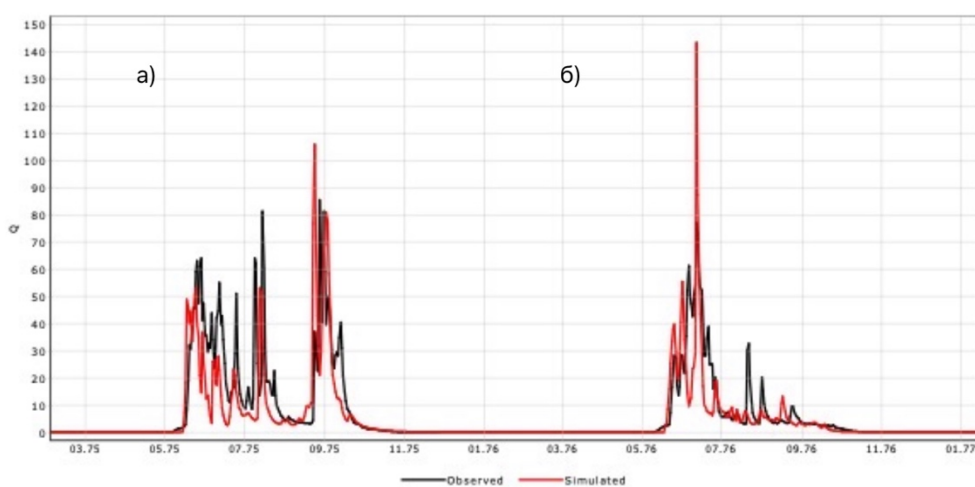


Рис. 5. Рассчитанный гидрограф стока р. Сусуман – п. Тонгора а) 1975 г. КНС = 0, 41; б) 1976 г. КНС = 0,54.

Обсуждение

15 августа 1949 в Сусуманском районе была запущена первая дражная разработка. Данный вид разработки полностью изменяет строение долины реки и её русла. Вследствие разработки образуются галечно-эфельные отвалы, а промытый песок оседает на дно образовавшегося котлована. Для эффективной работы драги необходим определенный уровень воды в дражном котловане, чтобы его обеспечить регулируется приток поверхностных вод и их выпуска из котлована благодаря плотинам и шлюзам. Галечные и эфельные отвалы на полигонах карьерной разработки вместе с, неприменяемыми компонентами карьерной разработки, прудами-накопители и системой канав расположены бессистемно в долинах рек (Рис. 1). В условиях естественного восстановления нарушенных земель, образовавшиеся искусственные водоемы могут прорываться во время половодья или паводков, являясь причиной затопления населенных пунктов. Оседающие пески и приносимые стоком поверхностных вод наносы, могут ускорять процесс кольматации, приводя к заиливанию и заболачиванию территории. Для карьерной разработки необходимо выполнить вскрышные работы. Торф к обработки могут подготовить несколькими способами: а) с использованием взрывчатки; б) гидравлическая оттайка; в) рыхлением. При применении гидравлической оттайки изменяется мощность многолетнемерзлых пород, а также увеличивается интенсивность глубинной и боковой эрозии. Рыхление и массовые взрывы приводят к уменьшению альбеде, что также может приводить к увеличению сезонноталого слоя. Повышенный поверхностный сток, в результате дражной добычи, несет с собой разработанный торф и компоненты взрывных

мероприятий. Реки загрязняются взвешенными наносами и тяжелыми металлами. Из-за содержания пирита в образовавшейся гальке, в поверхностных и грунтовых водах возрастает концентрация железа и сульфидов.

Таким образом, основное влияние нарушенных ландшафтов на процессы формирования стока выражается в следующих процессах и явлениях:

- Изменение русла рек, формирование отвалов, дамб, отстойных озер.
- Прорывы искусственных водоемов при значительных осадках.
- Увеличение мощности протаивания многолетнемерзлых грунтов.
- Увеличение доли поверхностного стока.
- Загрязнение рек взвешенными наносами и тяжелыми металлами.
- Процессы заиливания и заболачивания

Предварительные выводы

Золотодобывающие мероприятия, в бассейне реки Берелех, начались в 1932 году. Регулярная переработка галечно – эфелевых отвалов, времен первых разработок района, для получения остатков золота, не дает ландшафтом восстановиться даже естественным образом. Открытая золотодобыча повышает риски наводнений в населенных пунктах, создавая условия для формирования экстремальных паводков. Ретроспективная информация о расходах воды на выбранных водосборах ведет свой отчет с 1960 г., когда ландшафт района уже можно классифицировать как нарушенный. На данный момент нет данных о естественном стоке рек района.

Благодарности

Оценка нарушенных ландшафтов проведена при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках проекта № 94034170. Моделирование гидрологических процессов и исследование влияния нарушенных ландшафтов на сток проводится в рамках проекта Российского научного фонда № 23–17–20011 и содействия правительства Магаданской области.

Acknowledgments

The assessment of disturbed landscapes was carried out with the support of St. Petersburg State University within the framework of project No. 94034170. The modeling of hydrological processes and the study of the impact of disturbed landscapes on runoff is carried out within the framework of the project of the Russian Science Foundation No. 23-17-20011 and with the assistance of the government of the Magadan region.

Список литературы

1. Shikhov A, Plyushina P, Makarieva O, Zemlianskova A, Mozgina M. Satellite-Based Mapping of Gold-Mining-Related Land-Cover Changes in the Magadan Region, Northeast Russia // *Remote Sensing*. 2023. V. 15(14). Art. No. 3564.
2. Виноградов Ю. Б., Виноградова Т. А. Математическое моделирование в гидрологии. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 298 с.
3. Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Лебедева Л.С., Виноградова Т.А. Моделирование процессов формирования стока рек высокогорной криолитозоны Восточной Сибири (на примере хребта Сунтар-Хаята) // *География и природные ресурсы*. 2019. № 1. С. 178–186.
4. Нестерова Н.В., Макарьева О.М., Виноградова Т.А., Лебедева Л.С. Моделирование процессов формирования стока зоны Байкало-Амурской магистрали на основе данных полигона «Могот» // *Водное хозяйство России*. 2018. №1. С. 18-36.
5. Макарьева О. М., Лебедева Л. С., Виноградова Т. А. Моделирование процессов формирования стока на малых горных водосборах криолитозоны (по материалам Колымской водно-балансовой станции) // *Криосфера Земли*. – 2020. – Т. 24. – №. 1. – С. 43-56.
6. Землянскова А. А. и др. Научный полигон Анмангындинская наледь: комплексный подход изучения процессов водообмена // *Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России*. – 2023. – С. 286-292.

Применение изотопного метода в горной гидрологии на примере озера Таможенное, Южно-Чуйский хребет

А.А. Овсепян*, Д.В. Банцев

*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург
annahit2002@mail.ru*

Аннотация. В работе произведена оценка вклада различных компонентов в сток озера Таможенное, находящегося на территории Южно-Чуйского хребта Центрального Алтая. Для определения доли источников питания было решено уравнение изотопного баланса, где в качестве стокоформирующих компонентов рассматривались лёд с ледника Некрасова и осадки. Было выявлено, что в питании озера преобладают воды ледникового происхождения, а также немаловажную роль играют осадки. Результаты работы базируются на материалах проведенных в 2022 году экспедиционных исследований кафедры Гидрологии суши, использовании картографического материала и его визуализации с применением ГИС-технологий.

Ключевые слова: изотопный состав, Алтай, изотопные методы исследования, опасные гидрологические явления.

Application of the isotope method in mountain hydrology on the example of the lake Tamozhennoe of the South Chui ridge

A.A. Ovsepyan*, D.V. Bantsev

*Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg
annahit2002@mail.ru*

Abstract. The paper evaluates the contribution of various components to the flow of the lake Tamozhennoe, located on the territory of the South Chui ridge of the Central Altai. To determine the proportion of power sources, the isotope balance equation was solved, where ice from the Nekrasov glacier and precipitation were considered as flow-forming components. It was revealed that glacial waters predominate in the lake's nutrition – 61%. Precipitation also plays an important role, with an average contribution of 39%. The results of the work are based on the materials of the expedition research conducted in 2022 by the Department of Land Hydrology, the use of cartographic material and its visualization using GIS technologies.

Keywords: isotopic composition, Altai, isotopic research methods, dangerous hydrological phenomena.

Введение

Исследования содержания стабильных изотопов кислорода и дейтерия в воде являются одним из самых передовых направлений современной гидрологии [1]. Данные об изотопном составе ледникового льда, атмосферных осадков и речных вод позволяют получить информацию об условиях формирования стока, а также оценить вклад различных источников питания в гидрологические объекты.

Изучение стабильных изотопов в настоящее время широко распространено за рубежом, однако в России тема считается малоизученной и, как следствие, горы Алтая подобными исследованиями охвачены недостаточно широко [1].

В июле 2022 года кафедрой Гидрологии суши Санкт-Петербургского государственного университета были проведены рекогносцировочные исследования Южно-Чуйского хребта (республика Алтай, Российская Федерация), в рамках которых были отобраны пробы на содержание стабильных изотопов ^2H и ^{18}O . В статье основной упор сделан на использование дейтерия и кислорода-18 для определения вклада талых ледниковых вод и осадков в озеро Таможенное.

Материалы и методы исследования

Отбор проб с озера осуществлялся в месте установки водомерного поста, ледниковый лёд отбирался с поверхности ледников, образцы на водотоках – с мест, где наблюдается течение, а осадки помещались в пробирку сразу после выпадения, чтобы избежать влияния испарения. Образцы хранились в герметичных пробирках ёмкостью, равной 50 мл. Объём пробы для образцов с озера, ледникового льда и водотоков составлял 40 мл, для осадков в зависимости от их количества.

Анализ изотопных характеристик был произведён в Лаборатории изменения климата и окружающей среды Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (АНИИ). В качестве стандарта использовалась дистиллированная водопроводная вода из Санкт-Петербурга.

Определение доли каждого компонента в питании объекта проводилось с помощью уравнения изотопного баланса:

$$R^{18}\text{O}_1f_1 + R^{18}\text{O}_2f_2 = R^{18}\text{O} [2],$$

где $R^{18}\text{O}_1$ – изотопный состав первого компонента, f_1 – доля первого компонента, $R^{18}\text{O}_2$ – изотопный состав второго компонента, f_2 – доля второго компонента, $R^{18}\text{O}$ – результирующий изотопный состав.

Результаты

Среднее значение всех отобранных проб ледникового льда составляет $-17,3\text{‰}$. Большой разброс изотопного состава (от $13,0\text{‰}$ до $26,4\text{‰}$) является характерным, поскольку слои, слагающие ледник, образуются в разные сезоны с участием как зимних, изотопно легких, так и летних, изотопно тяжелых осадков.

Пробы осадков характеризуются изотопно тяжелым составом в сравнении со льдом, что объясняется высотным эффектом: с увеличением высоты в атмосферном паре уменьшается концентрация тяжелых изотопов [3]. Диапазон значений осадков довольно широкий: $-5,7\text{‰}$ до $-17,5\text{‰}$.

Наглядно изотопное различие стокоформирующих компонентов представлено на Рис. 1. Осадки располагаются ближе к нулю, что говорит об их более тяжелом изотопном составе в сравнении с талыми водами ледника. Также можно увидеть, что изотопный состав ручьев формируется в результате перемешивания атмосферных осадков и талых ледниковых вод, при том сток из озера изотопно тяжелее стока из озера, что свидетельствует о большем вкладе ледниковых вод в питание Таможенного.

Используя уравнение изотопного баланса и данные по расходам воды на исследуемых ручьях, было проведено изотопное разделение гидрографов (Рис. 2). В качестве изотопного состава компонентов приняты среднее $\delta^{18}\text{O}$ ледникового льда и среднее $\delta^{18}\text{O}$ осадков за сутки до отбора проб воды из ручья.

Для ручья, втекающего в озеро Таможенное (Рис. 2), доля ледникового питания составляет в среднем 58% , доля атмосферного, соответственно, 42% . Вклад ледникового питания изменяется от 28% до 73% . Для ручья, вытекающего из озера

Таможенное (Рис. 2), доля ледникового питания изменяется от 37% до 81%, среднее значение составляет 61%.

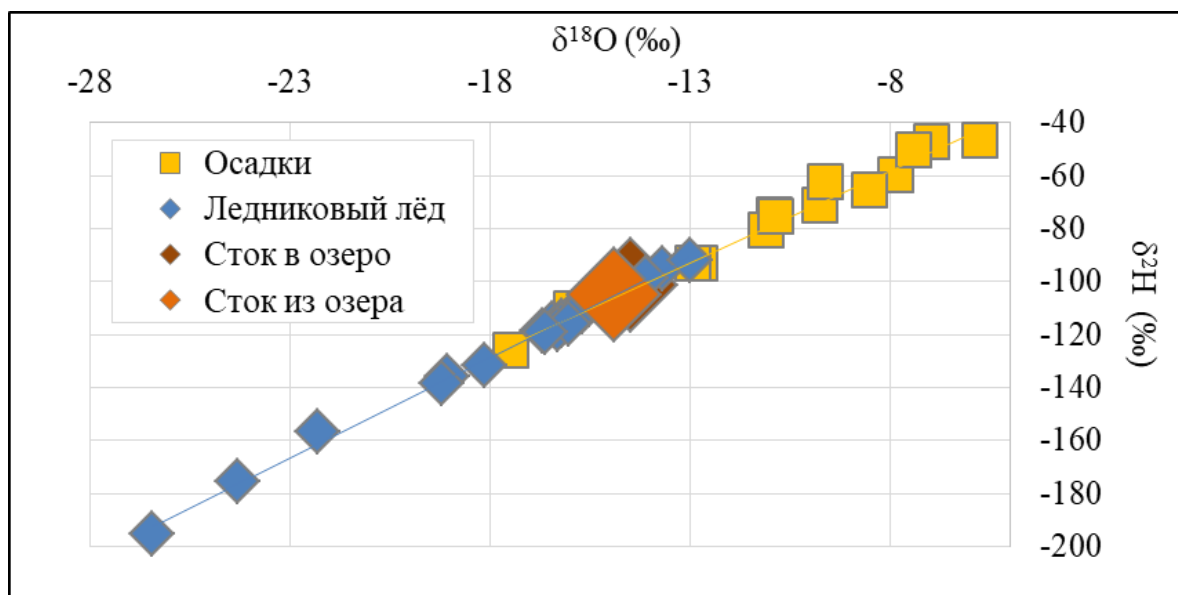


Рис. 1 Зависимость $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ для полученных проб.

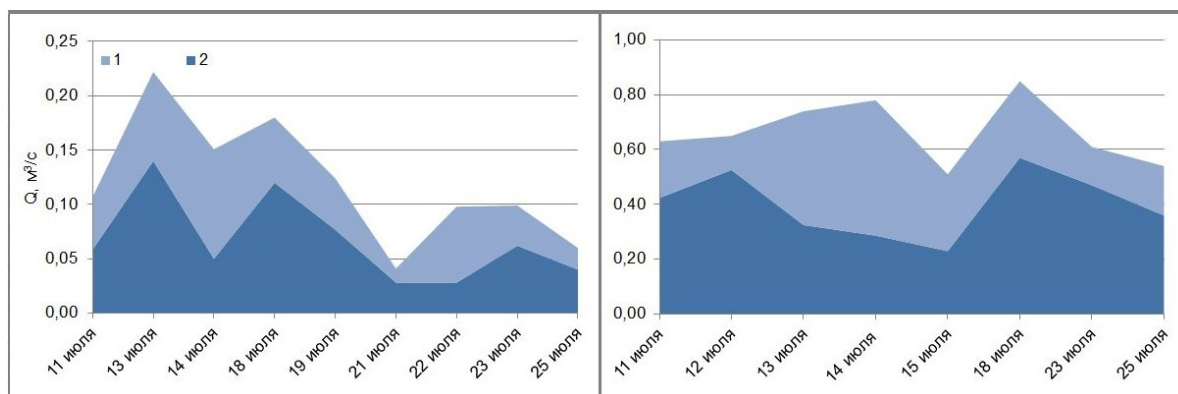


Рис. 2 Результат изотопного разделения гидрографов ручья, втекающего в озеро (слева), и ручья, вытекающего из озера (справа), 1 – атмосферные осадки, 2 – талые ледниковые воды.

Выводы

В результате была получена оценка вклада талых ледниковых вод в питание озера Таможенное. По изотопным исследованиям на леднике Некрасова сделан следующий вывод: большую роль в питании озера играют изотопно лёгкие талые воды ледника, поступающие в период абляции. Однако немалый вклад вносят и изотопно тяжёлые осадки. Средняя доля ледникового питания составляет 61 %, доля питания атмосферными осадками – 39 %.

Благодарности

Исследования производились при поддержке РФФ, проект № 23-27-00173 «Оценка вклада различных источников питания в сток ледниковых рек Юго-Восточного Алтая по данным изотопных индикаторов».

Acknowledgments

The study was supported by RUSSIAN SCIENCE FOUNDATION, project No. 23-27-00173 "Estimation of various components contribution to the glacial streams runoff in the Southeastern Altai according to isotope indicators"

Список литературы

1. Банцев Д.В. Изотопный состав компонентов нивально-гляциальных систем Юго-Восточного Алтая как индикатор их стокоформирующих особенностей: Дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. СПб.: СПбГУ, 2021. 93 с
2. Чижова Ю. Н. и др. Два подхода к расчёту расчленения гидрографа стока реки с ледниковым питанием с помощью изотопных методов //Лёд и снег. – 2016. – Т. 56. – №. 2. – С. 161-168.
3. Екайкин А. А. Стабильные изотопы воды в гляциологии и палеогеографии //СПб.: ААНИИ. – 2016.

Пространственная изменчивость характеристик ледяного покрова Рыбинского водохранилища зимой 2022 года

О.В. Овчинникова*, Н.Л. Фролова, А.А. Виногоров, Н.А. Петров

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
oovmail@mail.ru*

Аннотация. На основе экспедиционных материалов, данных гидрологических постов и дистанционного зондирования приведены сведения о мощности, строении и развитии ледяного покрова Рыбинского водохранилища за зимний и весенний периоды 2022 года. Экспедиционные данные представляют собой результаты бурения кернов льда на 49 точках, расположенных преимущественно вдоль двух профилей, пересекающих Рыбинское водохранилище с юго-запада на северо-восток и с севера на юг и проходящих вдоль треков спутника Jason-3. В 2022 году ледяной покров Рыбинского водохранилища представлял собой лёд смешанного строения, набор и мощность слоёв которого неоднородны во времени и пространстве. Наибольший контраст в строении ледового покрова достигался зимой: в прибрежной зоне формировался водноснеговой лёд, в центральной и восточной частях водохранилища – водно-шуговой лёд, в западной части – водный лёд. Весной почти весь ледяной покров Рыбинского водохранилища представлял собой мощную толщу водноснегового льда.

Ключевые слова: ледяной покров, ледяной покров водохранилищ, строение ледяного покрова, ледовый режим, Рыбинское водохранилище, дистанционное зондирование.

Spatial variability of characteristics of the ice cover of the Rybinsky reservoir in winter 2022

O.V. Ovchinnikova, N.L. Frolova, A.A. Vinogorov, N.A. Petrov

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
oovmail@mail.ru*

Abstract. Based on the data obtained through the expeditionary research, long-term hydrological observation and remote sensing, thickness, structure and development of the ice cover of the Rybinsky reservoir in winter and spring 2022 were characterized. Results of field measurements include accurate description of 49 ice cores mostly obtained for two profiles, which crossed the reservoir from the southwest to the northeast and from the north to the south and coincided with two tracks of the satellite altimeter Jason-3. In 2022 ice cover of the Rybinsky reservoir was heterogeneous and made of several different ice layers. Combination and thickness of these layers were distributed unevenly over the surface of the reservoir and were changing over time. The most uneven distribution was observed in the winter: near the shore ice cover consisted of white ice and black ice, central and east part of the reservoir was made of black ice and frazil ice and west part of the reservoir was made of black ice. In the spring, ice cover became much more homogeneous and consisted of thick layers of white ice and black ice.

Keywords: ice cover, ice cover of reservoirs, structure of ice cover, ice phenology, Rybinsky reservoir, remote sensing.

Введение

Климатические изменения оказывают существенное воздействие на ледяной покров озёр и водохранилищ. Учитывая, что ледяной покров ряда водоёмов является потенциальным источником опасности для местных жителей, его мониторинг и изучение не теряют актуальность. Рыбинское водохранилище является одним из наиболее удобных объектов для изучения особенностей строения ледяного покрова и для мониторинга изменений его характеристик благодаря высокой изученности в советское время и наличию регулярных наблюдений в настоящее время на пяти гидрологических постах. Кроме того, Рыбинское водохранилище обладает существенной неоднородностью гидрометеорологических условий благодаря его большой площади (4,58 тыс. км²). В связи с этим актуальность проведения натуральных наблюдений ледяного покрова водохранилища остается весьма высокой. Причины лежат в значительной протяженности водохранилища, ограниченности данных стандартных гидрологических наблюдений, необходимости привлечения новых дистанционных методов. Целью исследования являлась оценка изменчивости ледяного покрова Рыбинского водохранилища на основе натуральных наблюдений и данных дистанционного зондирования.

Материалы и методы исследования

Натурное изучение строения и характеристик ледяного покрова Рыбинского водохранилища проводилось в рамках двух экспедиций, организованных в феврале (25 января – 5 февраля) и апреле (1-2 апреля) 2022 года. В каждой точке измерений определялись толщина льда, высота и плотность снежного покрова, для отобранных кернов описывалась структура льда. Всего за время зимней и весенней экспедиций было отобрано 40 и 9 кернов льда, соответственно. Причём 30 зимних точек измерений образовывали два профиля: I профиль из 21 точки пересекал водохранилище с юго-запада на северо-восток в его центральной части, II профиль из 9 точек пересекал водохранилище с севера на юг в его восточной части (Рис. 1 и 2). Местоположение профилей было выбрано так, чтобы они проходили вдоль треков спутника Jason-3. В дальнейшем это позволит провести сопоставление данных со спутника и данных непосредственных измерений на водохранилище. Для анализа полученных данных использовались данные по уровням и ледовым явлениям по пяти гидрологическим постам Рыбинского водохранилища, ряд космических снимков Рыбинского водохранилища, а также архивные данных о погоде в Брейтово, Пошехонье, Рыбинске и Череповце за изучаемый период.

Результаты и выводы

Общие особенности. Данные наблюдений показали, что ледяной покров Рыбинского водохранилища преимущественно представляет собой лёд смешанного строения (слоистый лёд), то есть состоит из слоёв льда разных типов (Рис. 1 и 2). Подобная неоднородность характерна почти для всех природных водоёмов, но отличительной особенностью Рыбинского водохранилища является изменение набора и мощности слоёв разных типов льда во времени и пространстве. Это обусловлено существенной неоднородностью гидрометеорологических условий в пределах водохранилища таких как условия замерзания и нарастания льда. В пределах водохранилища встречается 3 основных типа льда: водный лёд (или кристаллический лёд, Рис. 3а), снежный лёд (Рис. 3б) и шуговой лёд (Рис. 3в).

Ледяной покров в зимний период. Наибольший контраст в строении ледяного покрова наблюдался зимой и был обусловлен неоднородностью и длительностью процесса замерзания водохранилища. В 2022 году сразу после устойчивого перехода температур воздуха через 0 °С (1 декабря) в прибрежной зоне, а также частично в подветренной западной части водохранилища началось образование заберегов.

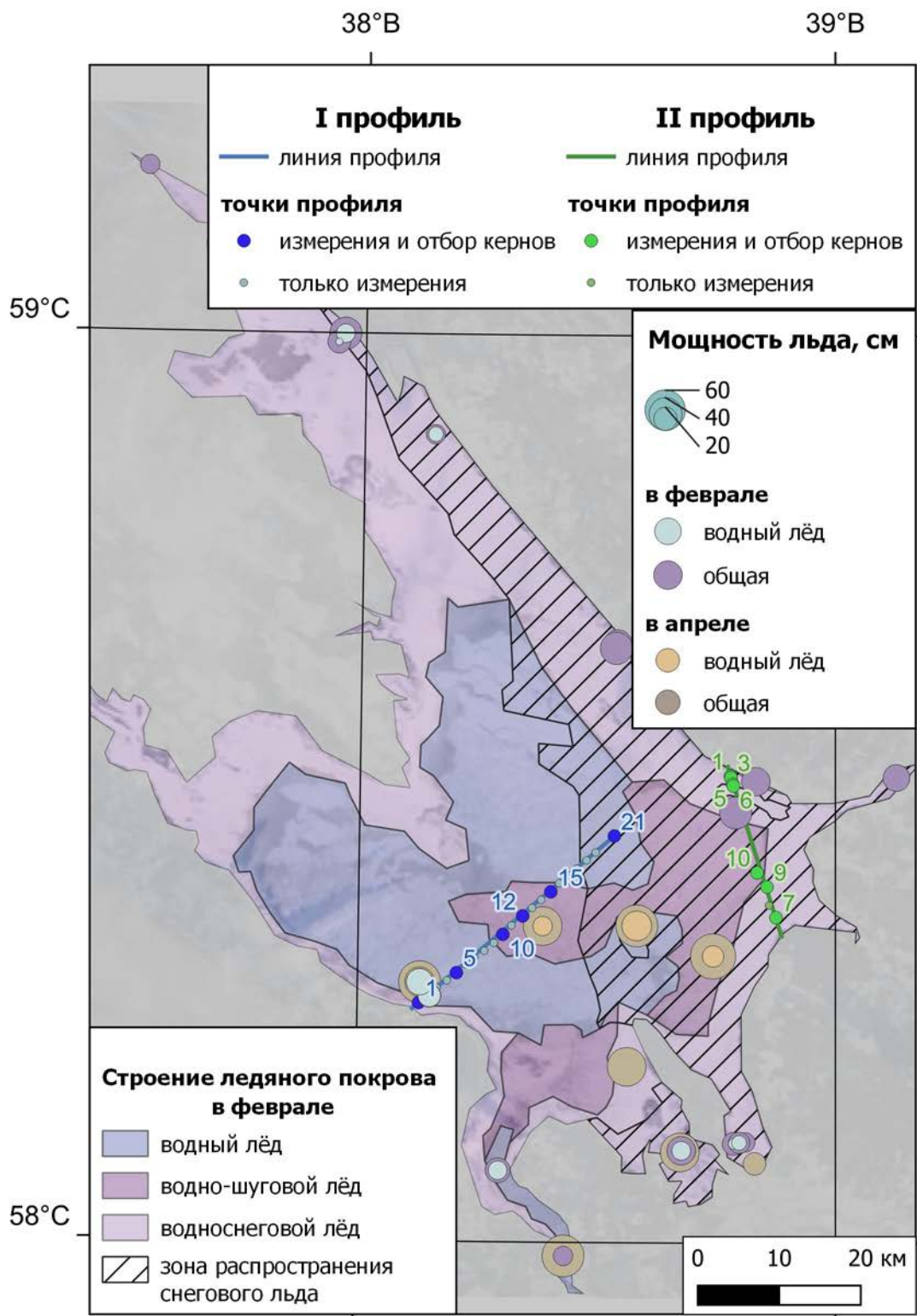


Рис. 1 Данные об общей мощности ледяного покрова и мощности водного слоя льда в феврале и апреле на точках наблюдений (кроме профилей). Мощность льда отражается размером пунсона и пропорциональна для всех категорий. Для точек, на которых не проводился отбор кернов указана только общая мощность ледяного покрова. В качестве основы для карты использовано изображение Рыбинского водохранилища в видимом диапазоне многоканального спектрорадиометра MODIS спутника Terra на 05.12.21 (источник: worldview.earthdata.nasa.gov).

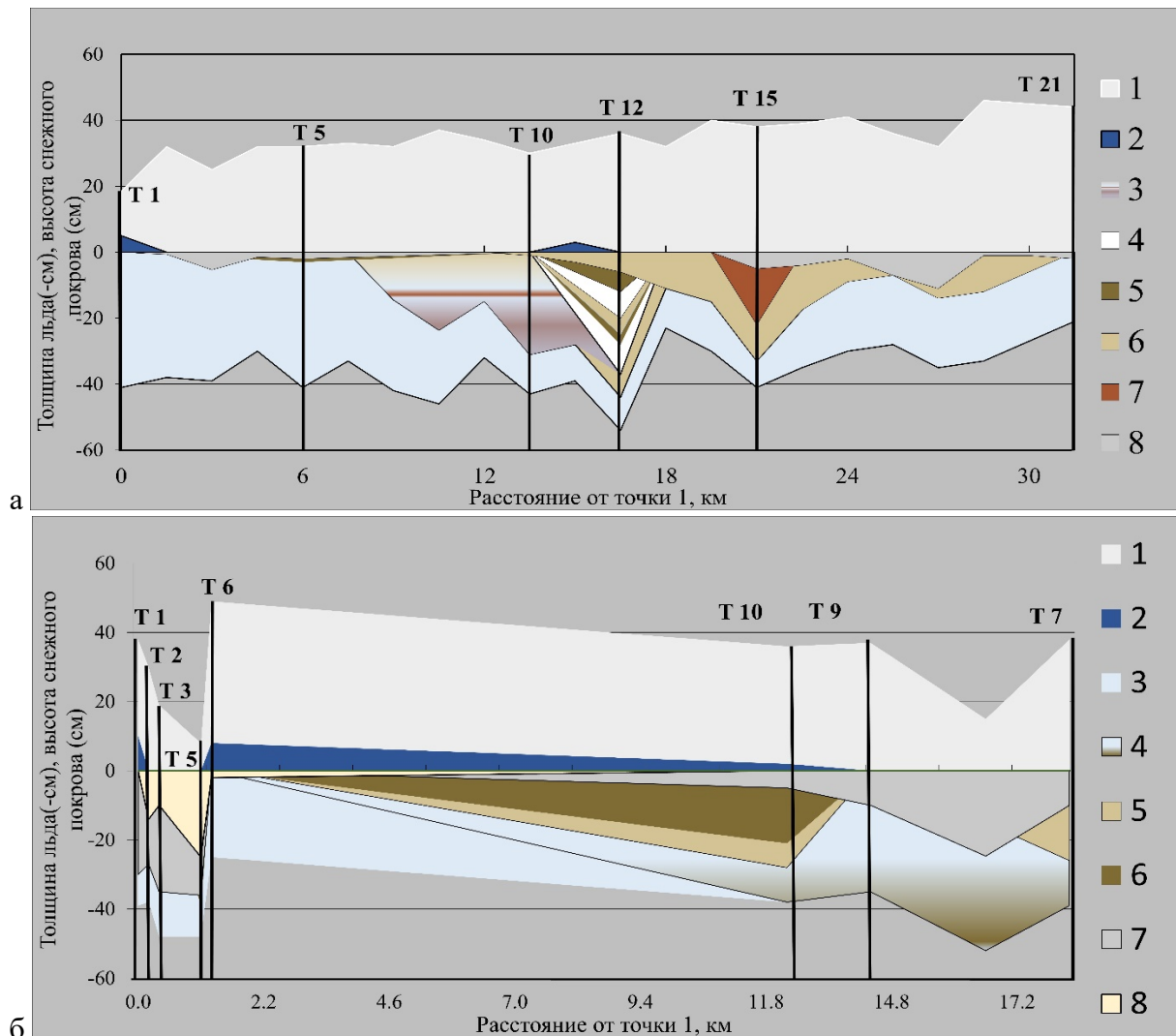


Рис. 2 Строение ледяного и снежного покрова вдоль I и II профилей: а – I профиль: 1 – снег; 2 – вода; 3 – сочетание коричневого шугового и прозрачного водного льда; 4 – водный лед (прозрачный); 5 – водный лед (коричневатый); 6 – белесый шуговой лёд; 7 – коричневый шуговой лёд; 8 – снежный лёд; б – II профиль: 1 – снег; 2 – вода; 3 – водный лед (прозрачный); 4 – водный лед (прозрачный с коричневыми включениями); 5 – шуговой лёд; 6 – водный лед (коричневый); 7 – снежный лед; 8 – промерзший снег. Размер области отражает мощность снежного покрова для положительных значений и толщину льда для отрицательных. Внутри областей показано строение снежного и ледяного покровов. Цвета на графике подобраны в соответствии с цветом описанных слоёв льда.

В это же время в центральной и восточной частях водохранилища наблюдалось сильное ветровое волнение (скорости ветра достигали 20 м/с), в результате чего переохлаждение воды распространилось на большую глубину, что привело к образованию шуги. После резкого падения температур до -20° (5-9 декабря) внутренний лёд в центральной части водохранилища начал смерзаться, образовав слой *шугового льда*, а забереги начали интенсивно нарастать с нижней границы за счёт образования *водного льда* в процессе кристаллизации воды на нижней поверхности ледяного покрова [2]. Дальнейшее нарастание водного льда происходило на нижней поверхности всего покрова Рыбинского водохранилища. Однако, на участках распространения шугового льда интенсивность этого процесса была ниже, так как шуговой лёд выступал в роли

теплоизолятора. Одновременно с процессом смерзания внутреннего льда наблюдался процесс его дрейфа с запада на восток (вероятно, под действием преобладающих западных ветров). Это привело к отсутствию в западной части водохранилища прослойки шугового льда, а также к нарастанию шуги на нижней границе уже образовавшегося ледяного покрова в центральной части водохранилища. Кроме того, в 2022 году в процессе ледостава наблюдался также процесс дрейфа отдельных льдин, о чём свидетельствует наличие торосов и трещин вдоль границы забегов в восточной части водохранилища (местоположение торосов определялось натурно, а также по радиолокационным снимкам, где они соответствовали областям повышенной яркости). Таким образом, в начале зимнего периода в западной части водохранилища сформировался однородный ледяной покров исключительно из водного льда, а в центральной части водохранилища – ледяной покров сложной структуры с чередующимися прослойками водного и шугового льда (водно-шуговой лёд, Рис. 1-3).



Рис. 3 Образцы льда из разных частей Рыбинского водохранилища: а – точка 1, I профиль; б – точка 1, II профиль; в – точка 10, I профиль; г – типичное строение ледяного покрова водохранилища в апреле.

Согласно материалам комплексного изучения Рыбинского водохранилища, проводимого в 1960-70-ые гг., для водохранилища была характерна большая однородность в строении ледяного покрова в период замерзания [1]. Следовательно, можно предположить, что ледовый режим Рыбинского водохранилища подвержен некоторым изменениям в связи с глобальным изменением климата и, в связи с этим, требует более детального изучения, в том числе с использованием дистанционных технологий.

Зимний покров в весенний период. По мере дальнейшего развития мощность ледяного покрова водохранилища существенно увеличилась, а его неоднородность снизилась. В апреле почти весь ледяной покров водохранилища состоял из двух основных слоёв: снежного и водного льда (водноснеговой лёд). В центральной части водохранилища между этими слоями наблюдалась небольшая прослойка сильно трансформированного и спрессованного шугового льда (Рис. 3г). Процесс уменьшения дифференциации ледяного покрова происходил вследствие образования снежного льда при промерзании уплотненного, смоченного водой снега. В 2022 году в феврале промачивание снега происходило в результате повышения его давления на ледяной покров, и выхода воды под давлением из трещин и лунок, поэтому большие мощности снежного льда наблюдались только в восточной части водохранилища, в месте скопления большого числа трещин и торосов (Рис. 1). В апреле снежный лёд был уже распространён повсеместно мощным слоем, так как в результате серии оттепелей (с 17 по 20 февраля и с 20 по 27 апреля) весь снежный покров, образовавшийся на

поверхности ледяного покрова, пропитался водой, повторно замёрз и превратился в снежный лёд. При этом явление выхода воды на лёд не наблюдалось, так как возрастающее давление льда и снега на водную поверхность нивелировалось падением уровня воды в водохранилище.

Окраска ледяного покрова. Яркой особенностью ледяного покрова на некоторых участках Рыбинского водохранилищ являлась интенсивная и часто неравномерная окраска как водного, так и шугового льда (точки 10-15 I профиля, точки 7-10 II профиля, Рис. 3б). Подобное «загрязнение», вероятно, вызвано повышенной концентрацией органических взвесей в воде в момент образования льда на некоторых участках водохранилища, что можно объяснить тем, что при наполнении Рыбинского водохранилища было затоплено 800 км² торфяных болот. Таким образом, особенности донных отложений водохранилища до сих пор оказывают влияние в том числе на особенности его ледяного покрова.

Заключение

Одно из основных свойств ледяного покрова Рыбинского водохранилища – неоднородность толщины и структуры в пределах акватории. Благодаря большой площади, процесс замерзания водохранилища является многоступенчатым и неравномерным, что приводит к образованию слоистого льда. Зная метеорологические условия в момент замерзания можно предсказать особенности структуры льда и его характеристики. По результатам натурных наблюдений было выявлено несколько закономерностей строения и развития ледяного покрова Рыбинского водохранилища. Из-за высоких скоростей ветра для центральной и восточной частей водохранилища характерно образование шугового льда. В зимний период районы формирования снежного льда совпадают с районами образования трещин. Наибольшее скопление трещин наблюдается в восточной части водохранилища, вдоль границы заберегов. Благодаря тому, что из-за оттепелей весь снежный покров Рыбинского водохранилища преобразуется в снежный лёд, а интенсивность нарастания водного льда обратно пропорциональна мощности вышележащих слоёв снега и льда, ледяной покров водохранилища к моменту вскрытия становится однородным.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам и студентам кафедры гидрологии суши МГУ за организацию и участие в экспедициях на водохранилище в феврале и апреле 2022 года.

Acknowledgments

The authors thank researchers and students of the Department of Land Hydrology for organization and participation in the two expeditions to the Rybinsky reservoir in February and April 2022.

Список литературы

1. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Водоохранилища Верхней Волги / под ред. З.А. Викулиной, В.А. Знаменского. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 291 с.
2. Донченко Р.В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 242 с.
3. Клюев П.В., Лебедев С.А. Климатическая изменчивость ледового режима Рыбинского водохранилища по данным СВЧ-радиометра, ориентированного в надир // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2019. № 56. С. 145–156.
4. Zakharova E., Agafonova S., Duguay J., Frolova N., Kouraev A. River ice phenology and thickness from satellite altimetry: potential for ice bridge road operation and climate studies // The Cryosphere. 2021. № 15. P. 5387–5407.

Маленькими шагами к большой науке

А.А. Осмоловская, А.В. Пименов, В.К. Герасимов, А.А. Роскова, С.А. Беляев

*Муниципальное бюджетное учреждение дополнительного образования "Тенькинский центр дополнительного образования детей, пос. Усть-Омчуг, Магаданская область
moudod.tenka@yandex.ru*

Аннотация. На территории Магаданской области между школьниками и научными сотрудниками Санкт-Петербургского государственного университета было налажено взаимодействие для проведения совместных исследований. На протяжении трех лет учащиеся 7–9 классов участвуют в полевых экспедициях и отбирают пробы осадков для дальнейшего анализа их изотопного состава.

Ключевые слова: Магаданская область, криосфера, изменение климата, наледь.

Small steps towards big science

A.A. Osmolovskaya, A.V. Pimenov, V.K. Gerasimov, A.A. Roskova, S.A. Belyaev

*Municipal budgetary institution of additional education "Tenkinsky center for additional education of children, Ust-Omchug, Magadan region, Russia
moudod.tenka@yandex.ru*

Abstract. On the territory of the Magadan region, cooperation was established between pupils and scientists of St. Petersburg State University to conduct joint research. For three years, pupils of grades 7-9 have been participating in field expeditions and collecting precipitation samples for further analysis of their isotopic composition.

Keywords: Magadan region; cryosphere; climate change; aufeis.

Введение

Взаимодействие современного общества с окружающей средой – важная и актуальная проблема. Люди являются частью экосистемы «человек-природа-общество». Изучая окружающую среду, люди, в ходе различных мероприятий, постигают правила и нормы поведения в природной среде. В школьной программе урока географии есть курс география родного края, из которого ученики узнали, что значительная часть территорий Магаданской области, в том числе районы перспективного горнопромышленного освоения, расположены в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов и характеризуются как труднодоступные, малонаселенные и неизученные.

Посетив краеведческий музей в пос. Усть-Омчуг, можно узнать, что на территории Тенькинского муниципального округа находятся два уникальных природно-научных стационара – это Колымская водно-балансовая станция и бассейн р. Анмангында, в котором формируется гигантская наледь подземных вод. На последний объект жители пос. Усть-Омчуг выезжают каждое лето, потому что он находится в 30 км от населенного пункта. Активные исследования наледи проводились в 60-х-90-х годах прошлого столетия. Только спустя 30 лет, в 2020 году группа ученых-гидрологов – выпускников Санкт-Петербургского государственного университета – возобновила исследования [2]. К изучению природных процессов присоединилась и наша группа юных исследователей.

Многие исследователи и мы сами наблюдаем, что происходит изменение климата. Отмечено, что за последние десятилетия на Кольме температура воздуха, в среднем по региону, повысилась на 2.3°C [3], увеличилось количество и сила природных пожаров. Изменился режим осадков и водный баланс. Все это повышает риски возникновения катастрофических наводнений, которые происходят в регионе практически каждый год. Люди становятся свидетелями больших паводков, которые нарушают обычный распорядок дня всех жителей поселка и приносят большие потери различных ресурсов. Для составления прогнозов опасных явлений необходимы данные, которые можно было использовать для анализа происходящих изменений, а также зарекомендованные методы расчета.

Под руководством к.т.н., в.н.с. Ольги Михайловны Макарьевой, кураторством м.н.с. Анастасии Александровны Землянковой была составлена программа научных исследований, в которых ученики пос. Усть-Омчуг могли принимать участие. Среди них: 1) участие в полевых работах в разные сезона года для знакомства с методами изучения природной среды; 2) режимный отбор проб осадков для дальнейшего анализа их изотопного состава; 3) проведение собственных измерений и помощь во время полевых выездов; 4) подготовка докладов и выступление на конференции.

Целью исследования являлась количественная оценка изменений характеристик природной среды криолитозоны Тенькинского муниципального округа.

Материалы и методы исследования

Пункт отбора осадков

При методической поддержке сотрудников Арктического и Антарктического научно-исследовательского института был организован пункт отбора осадков для дальнейшего изучения их изотопного состава. Площадка выполнена из прочного полиэтилена размером 1 на 1 метр на устойчивой опоре. Используется в зимний период для отбора твердых осадков, в летний – обычное пластиковое ведро. Осадки отбирались во время выпадения или сразу после их окончания в специальные колбы Corning. Крышка колбы покрывалась парафином для исключения возможности испарения, которое влияет на изменение изотопного состава. Пробы хранились в обычном холодильнике. Всего отобрано около 20 проб. В дальнейшем пробы отправлялись в Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ) в г. Санкт-Петербург.

Одновременно с нами пункты отбора осадков были организованы в поселках Мадаун, Кулу и городе Магадан.

Исследования образцов проводились с помощью лазерного анализатора Picarro 2130, который позволяет установить массу стабильного изотопа. Обработка данных проводилась Хомяковой Викторией (инженер лаборатории ЛИКОС ААНИИ).

Организация пункта наблюдений за динамикой наледи

В 2023 г. была поставлена задача зафиксировать разрушение наледи в теплый период времени. Для этого использовалась фотоловушка SEELOCK S308. Был установлен автоматический режим съемки 4 раза в день с 9 утра до 9 вечера через каждые 4 часа. Фотоловушка была закреплена на дереве с помощью стяжки, идущей в комплекте. За период с 21 июня по 5 сентября было получено 304 фотографий.

Гидрологические работы

В июне 2023 г. с помощью измерителя скорости потока ИСП-1 был измерен расход воды на руч. Подземный, который впадает в р. Анмангында. Он течет по левому берегу наледной поляны и в период половодья активно разрушает наледь. Проведено измерение минерализации воды, а также отобраны пробы на изотопный и гидрохимический состав.

Полевые методы исследования

Научные экспедиции (Рис. 1) и встречи с ведущими учеными проходили в разное время года. За период с 2020 по 2023 г. состоялось 5 экспедиций, 8 научных встреч и просветительских мероприятий, участникам стали 65 ребят.

Были освоены методы управления беспилотным летательным аппаратом, с помощью которого проводились фото- и видеосъемки. Сотрудниками из Института мерзлотоведения и Института нефтегазовой геологии и геофизики имени А. А. Трофимука СО РАН показаны геофизические методы исследования строения наледной поляны и измерения толщины льда.

Сотрудниками Северо-Восточного и Санкт-Петербургского государственных университетов были показаны приборы для наблюдения за климатическими и геокриологическими параметрами. Мы принимали участие в считывании данных с термометрических скважин и осадкомеров, установленных в разных частях водосбора р. Анмангында.

В 2022 г. в июне совместно с сотрудниками ААНИИ были проведены работы по послойному отбору проб наледного льда на изотопный состав.

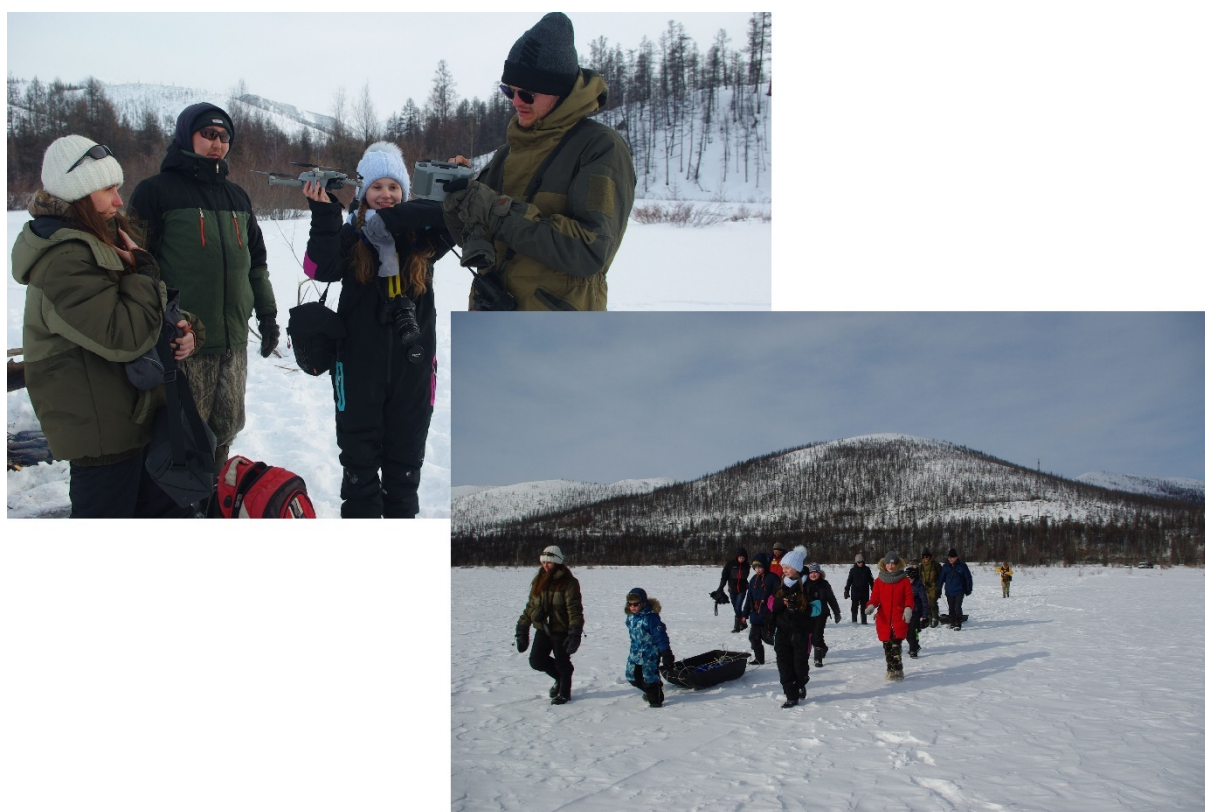


Рис. 1 Полевой выход на Анмангындинскую наледь.

Результаты исследования и выводы

Изотопный состав осадков

Изотопный состав осадков в пос. Усть-Омчуг изменяется от -11.24‰ до -42.50‰ по $\delta^{18}\text{O}$ и от -97.30‰ до -337.32‰ по δD . Для сравнения в г. Магадан $\delta^{18}\text{O}$ варьируется от -4.39 до -33.16‰ , а δD от -32.40 до -254.34‰ . Это связано с тем, что пос. Усть-Омчуг расположен в континентальной части, а г. Магадан на побережье Охотского моря, в связи с чем осадки формируются из разных воздушных масс.

Результаты исследования были опубликованы в научно-исследовательском журнале «Метеорология и гидрология» в 2023 г. [1].

В рамках взаимодействия юных и ведущих исследователей в ААНИИ была проведена экскурсия по лаборатории, в которой проводился анализ проб осадков, а также проведена научно-популярная лекция о климате.

Динамика наледи

По данным фотоловушки (Рис. 2) на участке реки разрушение наледи проходило активно. После того, как блоковое разрушение закончилось, наледь медленно стаивала под действием радиации. В поле зрения фотоловушки наледь окончательно растаяла 2 сентября 2023 г.

Из-за сильного ветра направление объектива фотоловушки было изменено.



Рис. 2 Динамика Анмангындинской наледи летом 2023 г. по данным фотоловушки.

Гидрология

По состоянию на 21.06.2023 г. расход воды ручья Подземный (Рис. 3) составил $0.29 \text{ м}^3/\text{с}$, а 14.06.2021 г. он составлял $0.32 \text{ м}^3/\text{с}$. Необходимо проведение параллельных наблюдений на притоках р. Анмангында для расчета водного баланса и вычисления доли вклада наледного стока в сток реки.

Экспедиции и лекции

В ходе знакомства с различными методами исследования были расширены знания о том, чем занимаются ученые в сфере наук о земле. Получен опыт сбора в полевой маршрут, знания о технике безопасности и правил нахождения в лесу. Это ценные жизненные навыки. В рамках лекций мы узнали о текущих изменениях климата и взаимодействии природных компонентов между собой. Также поняли какая ответственность лежит на человеке за сохранность природы.



Рис. 3 Измерение расхода воды на руч. Подземный (приток р. Анмангында).

Учащиеся школ и центров дополнительного образования могут быть настоящими помощниками в сборе ценной информации. На своем примере мы убедились, что каждый может отобрать пробы осадков или речной воды для дальнейшего анализа учеными в лабораториях. В настоящее время реализуется проект, поддержанный компанией АО «Полюс», в рамках которого учащиеся школы пос. Усть-Омчуг будут проводить наблюдения за динамикой снежного покрова, проводить измерения глубины сезонно-талого слоя и учиться обрабатывать данные термометрических скважин.

Результаты работ были представлены на конференциях регионального, всероссийского и международных уровней.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Администрации Тенькинского муниципального округа и лично главе Денису Анатольевичу Ревутскому, научному коллективу СВГУ/СПбГУ в лице Ольги Михайловны Макарьевой, Наталии Вадимовны Нестеровой, Андрея Алексеевича Осташова и Анастасии Александровны Землянсковой, руководству Санкт-Петербургского государственного университета.

Участие в конференции и продолжение исследований проведено при поддержке золотодобывающей компании АО «Полюс».

Acknowledgments

The authors express their gratitude to the Administration of the Tenkinsky Municipal District and personally to the head Denis Revutsky, the staff of the scientific group represented by Olga Makarieva, Natalia Nesterova, Andrey Ostashov and Anastasia Zemlianskova, the leadership of St. Petersburg State University.

Participation in the conference and continuation of research were carried out with the support of the gold mining company JSC "Polyus".

Список литературы

1. Хомякова В., Землянскова А., Екайкин А., Макарьева О., Нестерова Н., Осташов А., Тебенькова Н. Содержание изотопов кислорода в осадках в Тенькинском районе Магаданской области, 2023, 2, 100–111. 10.52002/0130-2906-2023-2-100-111.
2. Makarieva O.M., Nesterova N.V., Ostashov A.A., Zemlyanskova A.A., Tumskoy V.E., Gagarin L.A., Ekaykin A.A., Shikhov A.N., Olenchenko V.V., Khristoforov I.I., 2021. Perspectives of the Development of Complex Interdisciplinary Hydrological and Geocryological Research in the North-East of Russia. Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences 66 (1), 74–90. doi: 10.21638/spbu07.2021.105
3. Makarieva O., Nesterova N., Post D., Sherstyukov A., Lebedeva L. Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost. Cryosphere. 2019, 13, 1635–1659, <https://doi.org/10.5194/tc-13-1635-2019>

Гидродинамический режим гиперприливного эстуария малой реки Сёмжи: возможности 1D и 2D моделирования

Е.Д. Панченко^{1,2*}, Т.А. Федорова¹

¹Институт водных проблем РАН, г. Москва

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
panchenko.zhe@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты моделирования гидродинамики гиперприливного устьевое участка малой реки Сёмжи, впадающей в эстуарий Мезени, где величина прилива составляет 6 – 9 м. Моделирование участка реки от устьевого створа до места затухания приливных колебаний уровня воды в 23.5 км от него было выполнено с использованием как одномерной (HEC-RAS), так и двумерной (STREAM 2D CUDA) модели. Целью исследования было оценить способности моделей воспроизвести характеристики сложного гидродинамического режима гиперприливной реки: скорость распространения приливной волны вверх по руслу и ее трансформацию, динамику уровней и расходов воды на протяжении полусуточного приливного цикла на различном удалении от устьевого створа. Обе модели были разработаны и откалиброваны на основе детальных экспедиционных данных, полученных в августе 2018 г. при величине прилива, близкой к сизигии. Результаты обеих моделей хорошо согласуются между собой и достоверно отражают наиболее важные характеристики приливной гидродинамики. Время начала прилива и наступления полной воды воспроизводятся с точностью до 10 минут, экстремальные уровни воды – с погрешностью 5 – 15% от диапазона приливных колебаний, расходов воды – 5 – 10%. Целесообразность использования двумерной модели при моделировании протяженного участка малой приливной реки оправдана с точки зрения трудозатрат только в случаях, когда необходимо исследование неравномерности скоростного поля потока в поперечном сечении русла и его трансформации в ходе приливного цикла.

Ключевые слова: приливное устье, гидродинамическое моделирование, эстуарий Мезени, приливный цикл.

Hydrodynamic regime of the Syomzha hypertidal estuary: possibilities of 1D and 2D modelling

E.D. Panchenko^{1,2*}, T.A. Fedorova¹

¹Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
panchenko.zhe@yandex.ru

Abstract. The results of hydrodynamic modelling of the Syomzha estuary, flowing into the Mezen estuary, are presented. The Syomzha estuary is hypertidal with the tidal range of 6 – 9 m. 23.5 km of the estuary was modeled using both one-dimensional (HEC-RAS) and two-dimensional (STREAM 2D CUDA) models. The aim of the study was to assess the ability of the models to reproduce the characteristics of the complex hydrodynamic regime of a hypertidal river: the upstream tidal wave propagation velocity and its transformation, water levels and discharges over the half-day tidal cycle at different distances from the estuary. Both models were developed and calibrated based on detailed expedition data obtained in August 2018 at

spring tide. The results of both models agree well with each other and reliably reflect the most important characteristics of tidal hydrodynamics. The times of low and high water are reproduced with an accuracy of 10 minutes, extreme water levels – with an error of 5 – 15% of the range of tidal fluctuations, extreme water discharges – 5 – 10%. Using a two-dimensional model for a small tidal river is appropriate only in cases where it is necessary to study the non-uniformity of the flow velocities in the cross section of the channel and its transformation during the tidal cycle.

Keywords: tidal estuary, hydrodynamic modelling, the Mezen estuary, tidal cycle.

Введение

Гидродинамический режим приливного устья реки определяется множеством факторов, действующих как со стороны реки, так и со стороны моря. Одним из эффективных инструментов его исследования является гидродинамическое моделирование, позволяющее получить детальную пространственно-временную картину изменения гидродинамических характеристик по всей длине приливного участка реки. В случаях, когда основной целью исследования является анализ изменений характеристик потока по длине участка реки, а их вариации в поперечном сечении и по глубине незначительны или не представляют интереса, обычно используются одномерные (1D) модели. В работе представлены результаты совершенствования ранее разработанной одномерной модели гиперприливного устья малой реки Сёмжа [4] и сопоставление ее эффективности с двумерной моделью, разработанной и откалиброванной на основе одинаковых натуральных данных.

Материалы и методы исследования

Река Сёмжа впадает в эстуарий Мезени в шести километрах выше ее устьевого створа. Длина реки составляет 63 км, площадь бассейна – 490 км². В условиях летней межени дальность распространения приливных колебаний уровня воды составляет порядка 20 – 25 км. Таким образом, устьевой участок, гидродинамический режим которого формируется под влиянием приливов, занимает примерно треть общей длины реки. Средний уклон дна реки составляет 0.61‰, средний уклон устьевого участка втрое меньше – 0.26‰. На устьевом взморье Сёмжи величина прилива в сизигию превышает 8.5 м, увеличиваясь относительно величины в Белом море за счет движения приливной волны по сужающемуся Мезенскому заливу и эстуарию Мезени.

В устьевой области Сёмжи в августе 2015 и августе 2018 гг. проводились специальные полевые исследования, направленные на сбор данных для гидродинамического моделирования реверсивных водных потоков. Экспедиции проходили в периоды сизигии на фоне летней межени, когда речной расход воды был в десятки раз меньше приливного расхода в устье реки. В ходе экспедиций были проведены промерные работы, а также измерены уровни и расходы воды в нескольких створах, находящихся на различном удалении от устья (Рис.1). На основе данных измерений глубин и непрерывной регистрации хода уровня воды барометрическими самописцами была построена ЦМР дна устьевого участка Сёмжи, обеспечившая одинаковые данные о рельефе русла для обеих гидродинамических моделей. Уровни воды измерялись в створах №2 – 5 в 2018 г. и № 1, 2, 5 в 2015 г. Расходы воды в течение полного полусуточного приливного цикла – в створах №3 и №4 в 2018 г., и в характерные фазы цикла в створах №2 и №5 в 2015 г. Методика полевых измерений описана в работах [1, 6].

Одномерная модель была разработана в программном комплексе HEC-RAS (США) [5], в основе которого лежат одномерные уравнения системы Сен-Венана. Для создания двумерной плановой (2DH) модели использовался отечественный программный комплекс STREAM 2D CUDA [2], основанный на численном решении

уравнений Навье-Стокса, осредненных по глубине («двумерных уравнений Сен-Венана»).

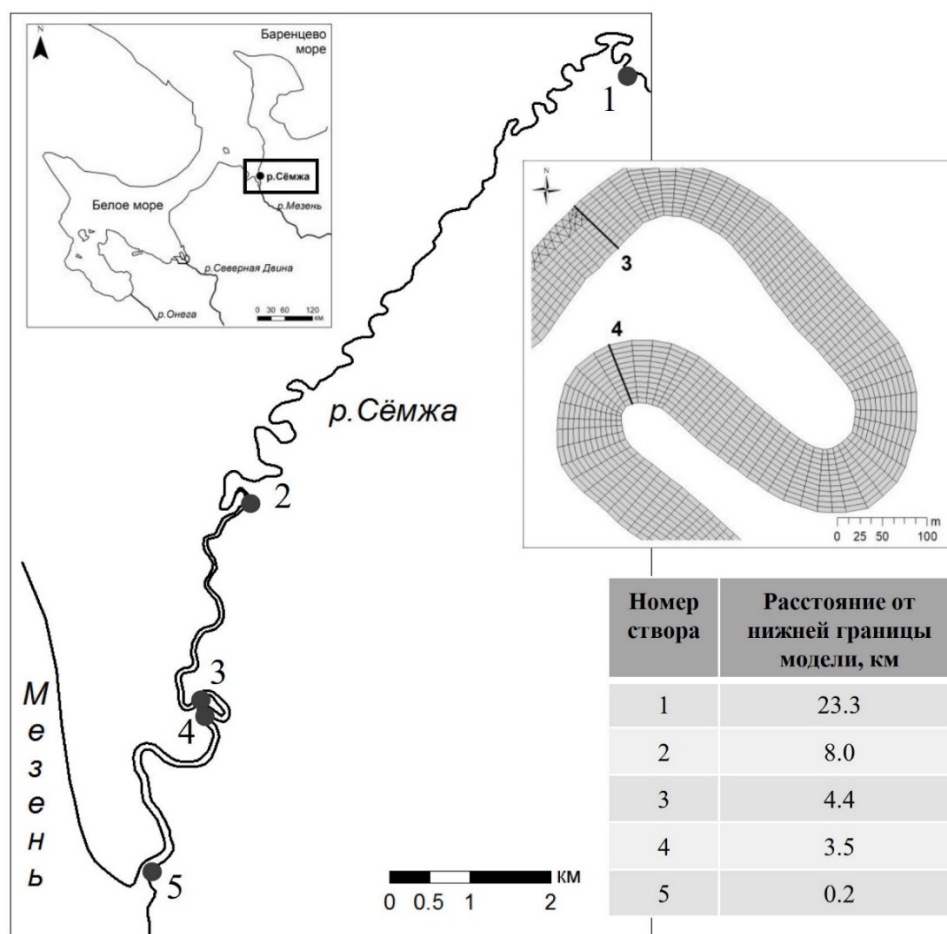


Рис. 1 Схема моделируемого участка р. Сёмжи.

Области моделирования охватывают устьевой участок Сёмжи от устьевого створа (№5 на рис.1) до 23.5 км (№1 на Рис.1), где влияние прилива на гидродинамический режим реки не сказывается. В одномерной модели рельеф русла задан 147 поперечными профилями русла и поймы, расположенными на расстоянии 100 – 150 м друг от друга; в двумерной модели – в ячейках гибридной прямоугольно-треугольной сетки с шириной ячеек 5 м и длиной – от 10 до 20 м (17602 ячеек) (врезка на Рис.1). В качестве верхнего граничного условия задавался постоянный расход воды 5 м³/с (соответствующему измеренному), на нижней границе – ход уровней воды на протяжении нескольких приливных циклов (соответствующий записям самописца в створе №5). Моделирование охватывало два приливных цикла, сравнение с фактическими данными проводилось по второму циклу (первый цикл использовался для «разгона» моделей).

Основным калибровочным параметром в моделях является коэффициент шероховатости Маннинга. Калибровка моделей проводилась по данным измерений 13 – 14 августа 2018 г. В ходе калибровки модели были разбиты на одинаковые участки с разными значениями коэффициента шероховатости: $n=0.015$ для участка 0.2 – 5 км выше устьевого створа, $n=0.02$ для 5 – 10 км, $n=0.03$ для 10 – 23.5 км.

Результаты и выводы

Результаты моделирования в одномерной и двумерной моделях оказались очень близки. Разница между измеренной и смоделированной величиной прилива в

калибровочных створах увеличивается при удалении от нижней границы модели. В створе №4 фактический диапазон изменения уровней воды составляет 6.2 м, в 1D модели – 5.8 м, в 2D модели – 5.7 м (т.е. смоделированные уровни меньше на 6 – 8%). При этом в створе №2 при фактической величине прилива 3.72 м смоделированная величина в обеих моделях составила 3.12 м (меньше на 15%) (Рис. 2).

В створе №2 минимальные уровни воды до начала прилива смоделированы с высокой точностью (разница 2 – 5 см), однако максимум уровня воды в моделях занижен более чем на 0.5 м. При этом следует отметить, что по данным измерений в обеих экспедициях, в этом створе максимальный уровень на метр превышает максимум на нижней границе, хотя время наступления полной воды различается в створах всего на 10 – 20 минут. В моделях же максимальный уровень в створе № 2 практически совпадает с максимальным уровнем, заданным на нижней границе.

В створах №3 и №4, напротив, хуже моделируются минимальные уровни воды, причем дальнейшее уменьшение коэффициента шероховатости не влияет на это. В створе №4 отливные уровни воды в моделях оказались завышены относительно фактических на 0.5 м, при том, что максимальные уровни различаются лишь на 18 см.

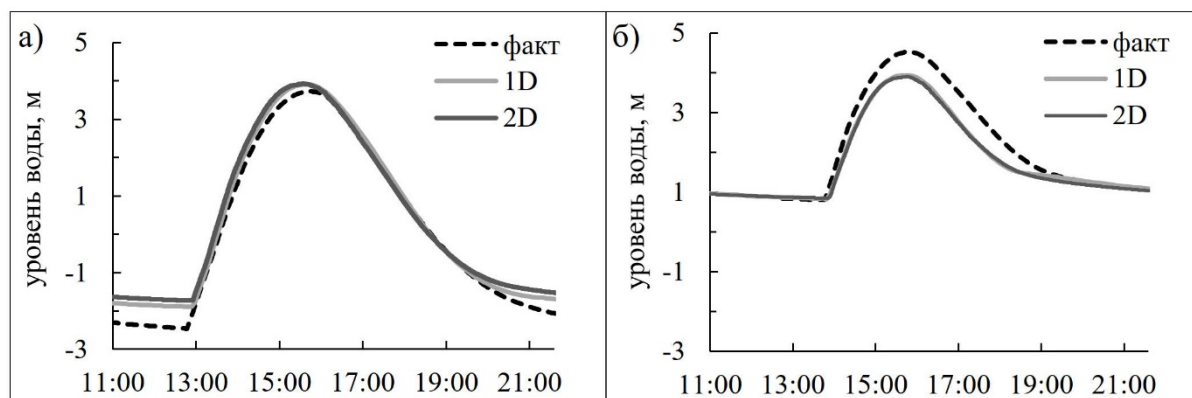


Рис. 2 Уровни воды в створе 4 (а) и створе 2 (б).

Время наступления полной воды и время начала прилива воспроизводятся обеими моделями достаточно точно, с разницей не более 10 минут во всех створах (что сопоставимо с точностью визуальной регистрации времени замедления течения в начале прилива), то есть скорость распространения прилива моделируется точно.

Расход воды до начала прилива воспроизводится обеими моделями точно. Диапазон изменения расходов воды за приливный цикл отличается в моделях от фактического всего на 5 – 10%. В створе №2 обе модели немного завышают максимальный приливный (отрицательный) расход, а максимум на отливе точно воспроизводится в двумерной модели и завышается в одномерной. Максимальный приливный расход воды в моделях наступает примерно на 10 минут раньше и уменьшение значений расходов начинается несколько быстрее, чем в реальной волне.

Таким образом, результаты одномерной модели хорошо согласуются с результатами двумерной плановой модели. Однако точность моделирования оказалась несколько ниже, чем для мезоприливного устья более крупной реки, например, для эстуария Онеги [3], несмотря на то, что для малой реки данные о рельефе были заданы более детально. Диапазон изменения уровней воды воспроизводится моделями с точностью 5 – 15%, диапазон изменения расходов воды с точностью 5 – 10%.

Сопоставление результатов моделирования с натурными данными показывает, что использование двумерной модели для достаточно протяженного участка малой приливной реки может быть оправдано с точки зрения трудозатрат только в случаях,

когда необходимо исследование неравномерности скоростного поля потока в поперечном сечении русла и его трансформации в ходе приливного цикла.

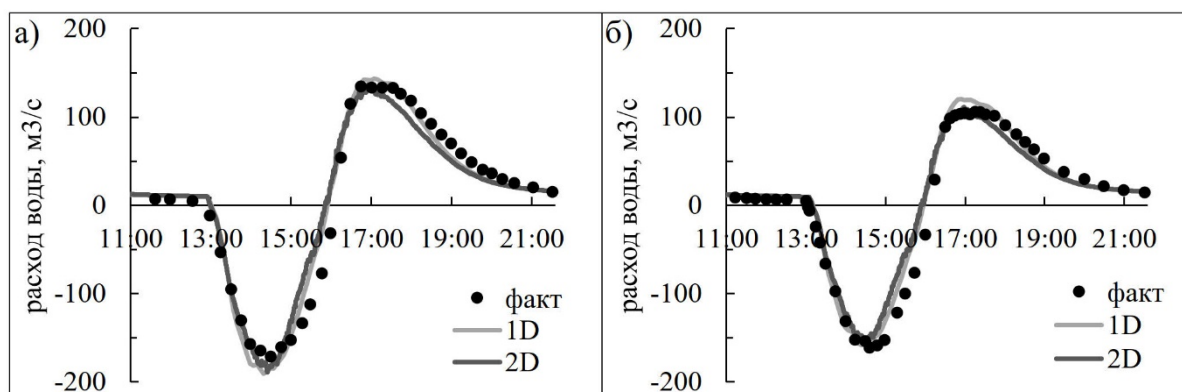


Рис. 3 Расходы воды в створе 2 (а) и створе 3 (б).

Благодарности

Авторы благодарны участникам полевых работ – А.М. Алябяну, Н.А. Демиденко, М. Льюменсу, Л. Льюменсу, А. Попрядухину.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01184, <https://rscf.ru/project/22-29-01184/>.

Acknowledgments

The authors are grateful to the participants of fieldwork – A.M. Alabyan, N.A. Demidenko, M. Leummens, L. Leummens, A. Popryadukhin.

The work was supported by Russian Science Foundation project №22-29-01184, <https://rscf.ru/project/22-29-01184/>.

Список литературы

1. Алябян А.М., Панченко Е.Д., Алексеева А.А. Особенности динамики вод в приливных устьях малых рек бассейна Белого моря // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2018. № 4. С. 39–48.

2. Алексюк А.И., Беликов В.В. Программный комплекс STREAM 2D CUDA для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках с использованием технологий Compute Unified Device Architecture (на графических процессорах NVIDIA) // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2017660266 от 20.09.2017. 2017.

3. Панченко Е.Д., Льюменс М., Лебедева С.В. Моделирование гидродинамических процессов в приливном устье реки Онеги // Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова «Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению», Санкт-Петербург, 3–9 декабря 2020 г. С. 135–140.

4. Панченко Е.Д. Опыт одномерного гидродинамического моделирования в микро-, мезо- и макроприливных устьях малых рек // Сборник статей по материалам XIII семинара молодых ученых вузов, объединяемых советом по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов докладов международной научной конференции «Эрозионные, русловые и устьевые процессы», Набережные Челны, 25–28 апреля 2022 г. С. 94–100.

5. Программный комплекс HEC-RAS [Электронный ресурс]. URL: <https://hec-ras.software.informer.com>. Дата обращения: 23.07.2022.

6. Panchenko E., Alabyan A. Friction factor evaluation in tidal rivers and estuaries // METHODSX. 2022. Vol. 9. P. 101669.

Шум потока как индикатор речного стока

А.Д. Пнюшков, С.В. Бузмаков*, А.В. Юхно

*Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург
bsv.ru@list.ru*

Аннотация. В настоящее время развитию косвенных методов в гидрологии уделяется особое внимание. Так, для определения уровней и расходов воды малых водотоков, можно использовать данные об уровне звукового давления потока. Авторами в рамках гидрологического мониторинга малых водотоков Санкт-Петербурга данный метод был апробирован на ряде рек и ручьев с бурным течением с использованием диктофонов с функцией интервальной записи. Были получены характеристики водного режима р. Юля-Йоки и руч. Смолячков и сформированы методологические и технические аспекты применения этого метода.

Ключевые слова: шум потока, характеристика водного режима, расход воды, косвенные методы, малые водотоки.

Flow noise as an indicator of river flow

A.D. Pnushkov, S.V. Buzmakov*, A.V. Iukhno

*State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia
bsv.ru@list.ru*

Abstract. Nowadays, special attention is paid to the development of indirect methods in hydrological observations. Thus, to determine small stream water level and run-off, data on the noise pressure level of the stream can be used. Within the framework of hydrological monitoring of small streams of St. Petersburg, this method was tested by the authors on a number of rivers and creeks with a rapid turbulent flow using voice recorders with the interval recording function. The characteristics of the water regime of the Juli-Yoki river and Smolyachkov creek were obtained. Methodological and technical aspects of the application of this method were also formed.

Keywords: flow noise, water regime characteristic, river discharge, indirect hydrological approaches.

Введение

Водный поток при больших уклонах и шероховатостях русла создаёт шум. Его необходимая интенсивность для применения метода создаётся на горных участках рек, шероховатость русла которых, согласно таблицам Срибного, составляет более 0,080. Высокая шероховатость русла, наличие преград для потока и его турбулентность – необходимые условия для возникновения шума потока. Физически он возникает при разрыве молекулярной связи между отдельными молекулами воды, нарушении сил поверхностного натяжения. Так, отдельные капли воды, выплескиваются потоком в воздух и, падая обратно на ее поверхность, создают полости. Затем эти капли погружаются в ее толщу, образуя пузырьки воздуха. Эти пузырьки вибрируют в потоке, создавая волны давления, которые вносят основной вклад в шум потока.

Чем быстрее выплеснутые потоком капли воды падают обратно на поверхность, тем больше создается пузырьков воздуха и тем интенсивнее турбулентность. Таким

образом в турбулентных потоках постоянно перемещается множество пузырьков воздуха, при этом чем больше их размер – тем ниже частота звука, издаваемого ими, и наоборот [1].

Далее, этот шум регистрируется с помощью средств записи наблюдателем, и, после необходимых преобразований, анализируется в виде спектрограмм, с выделением необходимой чистоты и уровня звукового давления.

Зная связь акустических характеристик потока с расходом или уровнем воды, становится возможным определить эти параметры в турбулентном потоке без батиметрической съёмки русла.

Для определения шума потока можно использовать различные средства: сейсмодатчики которые могут фиксировать распространение звука в твёрдых средах и эффективность которых исследовалась в рамках [2] и [3] или микрофоны, которые воспринимают звук в воздушной среде [4]. В 2021 г. был зарегистрирован патент под авторством российского исследователя С.Г. Копысова [5]. Суть изобретения заключается в определении расхода воды по связи между частотой звука, издаваемого потоком, и расходом воды.

Объекты исследования

В качестве объекта исследований были выбраны две малые реки с естественным режимом формирования сток рядом с Санкт-Петербургом. Наблюдения производились в период весеннего половодья 2023 года. Запись шума производилась на участке р. Юля-Йоки (Рис. 1а), который характеризуется бурным течением, малыми глубинами (порядка 0.5 м и валунами диаметром ~ 10 см). Второй участок на руч. Смолячков (Рис. 1б) представляет собой истечение потока из трубы. Измерения производились в период с 03.02.2023 и 28.03.2023 по настоящее время. Один раз в сутки на протяжении часа с 05:00. Данный временной промежуток выбран как время с наименьшим предположительным антропогенным влиянием на шум.

а)



б)



Рис. 1 Место установки диктофонов на р. Юля-Йоки (а) и руч. Смолячков (б).

Материалы и методы

Для записи звука были использованы диктофоны «Сорока-11» с функцией интервальной записи данных. Диктофоны устанавливались на специальном креплении на дерево (р. Юля-Йоки) и нижнюю часть водопропускной трубы (руч. Смолячков), таким образом, чтобы была хорошая слышимость потока и обеспечена необходимая маскировка для защиты от вандализма. Запись производилась в формате «.WAV» с частотой дискретизации 32 кГц и разрядностью 16 бит.

Обработка звука осуществлялась в свободно распространяемом программном обеспечении (ПО) «Audacity» [6], интерфейс которой представлен на Рис. 2б. Из полного часового фрагмента записи выбирались небольшие (продолжительностью 5-10 секунд)

эпизоды без посторонних звуков – порывы ветра, пение птиц, шум проезжающих машин, жужжание насекомых (Рис. 2а). Обработка звуковых эпизодов производилась с помощью быстрого преобразования Фурье с помощью окна Хэмминга шириной 1024 отсчёта, для разложения выбранного участка на спектры, которое представлено функцией «Spectrum».

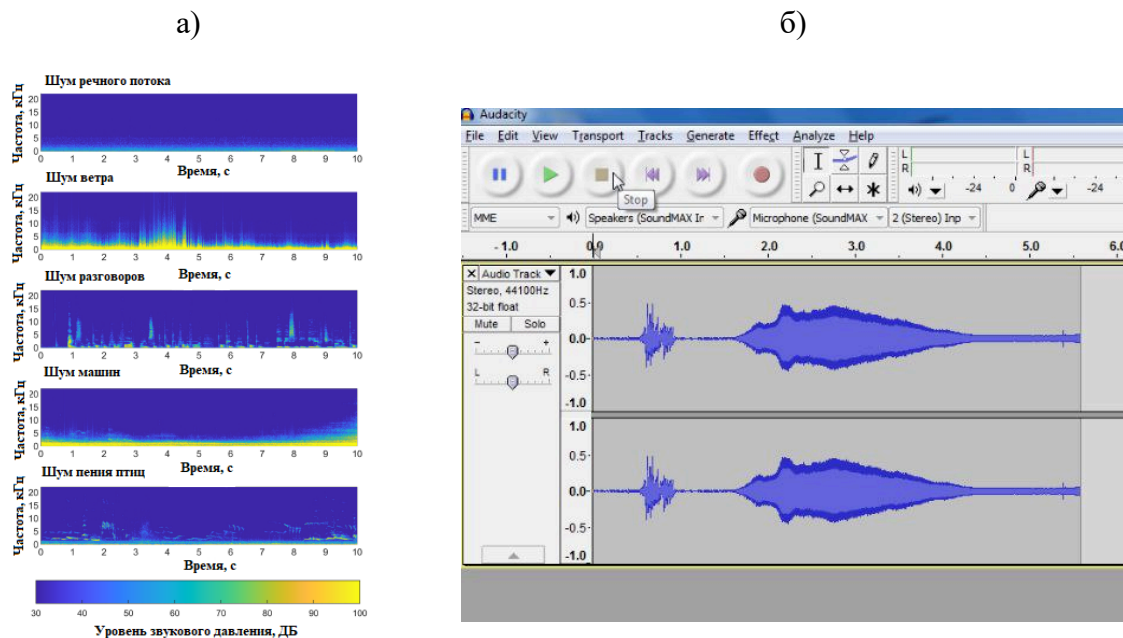


Рис. 2 Пример спектрограмм различных шумов (а) [4] и окна ПО Audacity (б).

Уровни воды на постах измерялись автономными гидростатическими датчиками с дискретностью один раз в час и контролировались ручными стандартными измерениями от постоянных отметок во время периодических измерений расходов воды.

Поскольку наблюдения за шумом производились в ночное время и не совпадали со временем измерения уровня воды, то анализировалась связь шума не с расходом воды, а именно с уровнем.

Результаты и обсуждения

На обоих постах наилучшая связь с уровнем воды наблюдалась на частоте 220 Гц. Второй частотой с наилучшей корреляцией являлась на Юля-Йоки 14 кГц, на Смолячковом ручье 11 кГц (Рис. 3).

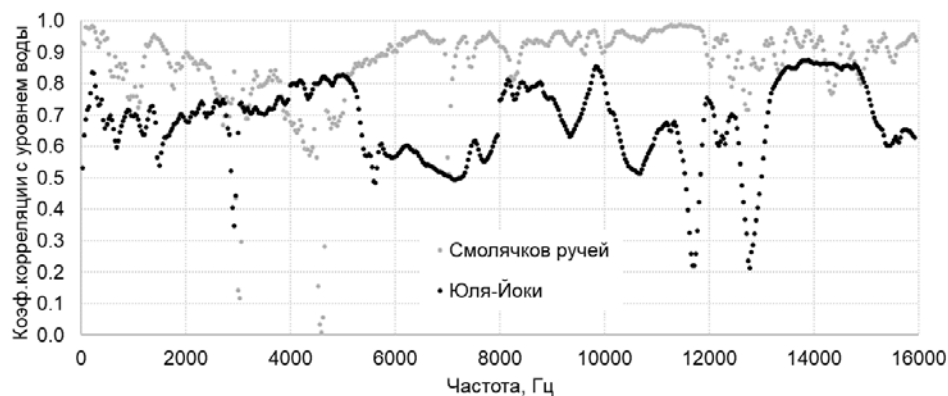
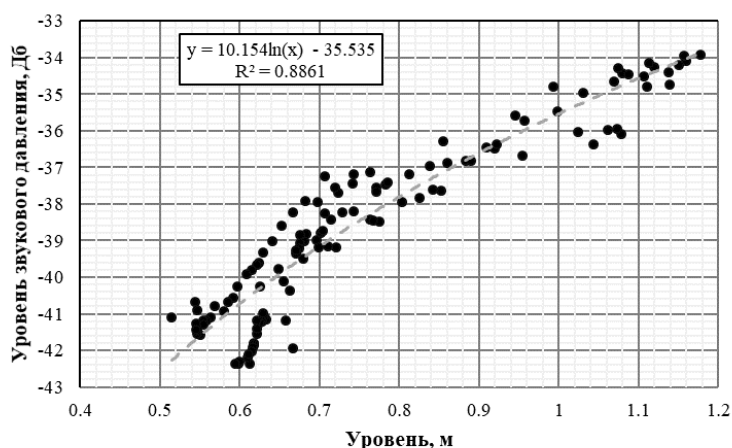


Рис. 3 Изменение коэффициента корреляции между уровнем звукового давления и уровнем воды по разным частотам.

Связь общего звукового давления (без разложения спектра на отдельные частоты) и уровня воды тесная и характеризуется парным линейным коэффициентом корреляции 0.932 для Юля-Йоки и 0.976 для Смолячкова (Рис. 4а, б). Стоит отметить, что связь по Смолячкову ручью определялась не по всему ряду наблюдений, а лишь по данным за период спада половодья в связи с возникающими заторами. Если анализировать связь с отдельными частотами (220 Гц и 11-14 кГц), то её теснота по Смолячкову повышается до 0.98, а вот по Юля-Йоки понижается до 0.87.

а)



б)

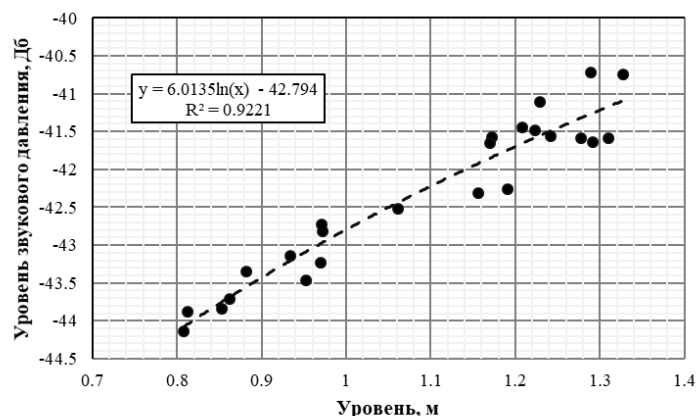


Рис. 4 Связь уровня общего звукового давления с уровнем воды для а) реки Юля-Йоки и б) Смолячкова ручья.

На данный момент нет однозначного объяснения причин качества связей уровней воды и уровней звукового давления на конкретных частотах. Причины чего предстоит выяснить в предстоящих исследованиях.

Из приведённых выше графиков можно сказать, что связь между уровнями звукового давления и уровнями воды в водотоке является однозначной, но не линейной, хоть и близкой к ней и может быть использована для восстановления или уточнения уровней воды на водотоке.

При расчёте стока для Смолячкова ручья выяснилось, что наивысший уровень воды наблюдался 30 марта и составил 1.95 м над нулём поста (Рис. 5), что по кривой расходов соответствует значению в $3.3 \text{ м}^3/\text{с}$, при том, что максимальный зафиксированный расход в этом году был $1.3 \text{ м}^3/\text{с}$. Подобные пики меньшей амплитуды

также наблюдались 2 и 3 апреля и проходили они абсолютно идентично. Уровень воды начинал резко подниматься в три часа ночи, достигал своего максимума в 8 часов утра и уже к 11 часам дня опускался до начальной отметки. Температура воды не изменялась и была порядка 0.7°C. Ошибка датчика была исключена фиксацией наивысших уровней воды при следующем посещении поста 14 апреля, которые соответствовали отметкам 2 м над нулем поста.

Водосбор ручья практически не подвержен антропогенному воздействию и при постоянной за период прохождения этих пиков температуре варианты о залповых выбросах сточных вод были исключены. Сам пункт наблюдений находится в 30 метрах выше по течению от шоссе, в котором проложены одна водопропускная 1,5 метровая труба с сороудерживающей решеткой на входе. При прохождении зимних паводков к решетке примерзли вынесенных потоком ветки и перегородили часть живого сечения, что создало подпор воды на посту, который наблюдался вплоть до 14 апреля. В период посещения поста 28 марта ещё наблюдались ледовые явления в виде заберегов и выдавленного на берег льда. Наиболее вероятным вариантом возникновения пиков был и остается заторы льда, подошедшего с верховьев ручья после пика половодья у сороудерживающей решетки. Однако оснований полностью исключать повышение стока при этих подъёмах за счёт прорыва пойменных понижений или заторов выше по течению с высвобождением больших масс воды не представлялось возможным.

Наблюдения за шумом потока были начаты 28 марта на спаде первой волны половодья и закончены 6 мая. В связи с возникновением подпорных явлений связь между шумом потока и уровнем воды рассматривалась только с 14 апреля – начало поверочного периода (Рис. 4б). Поскольку датчики записывали звук ровно в момент образования пиков основной задачей было пересчитать расход воды за резкие скачки уровня воды при помощи связи с шумом потока. Шум записывался в нижней части водопропускного сооружения длиной 25 м и подпор воды в верхней его части никак на него повлиять не мог. По линии связи были получены фиктивные бесподпорные уровни воды, а далее по кривой расходов сток. За счёт корректировки на шум расход воды за 30 марта был уменьшен с 3.3 до 0.58 м³/с, 2 апреля с 1.7 до 0.72 м³/с и 3 апреля с 1.1 до 0.68 м³/с. Даже на слух поток за 30 марта тише, чем, например, за 17 апреля.

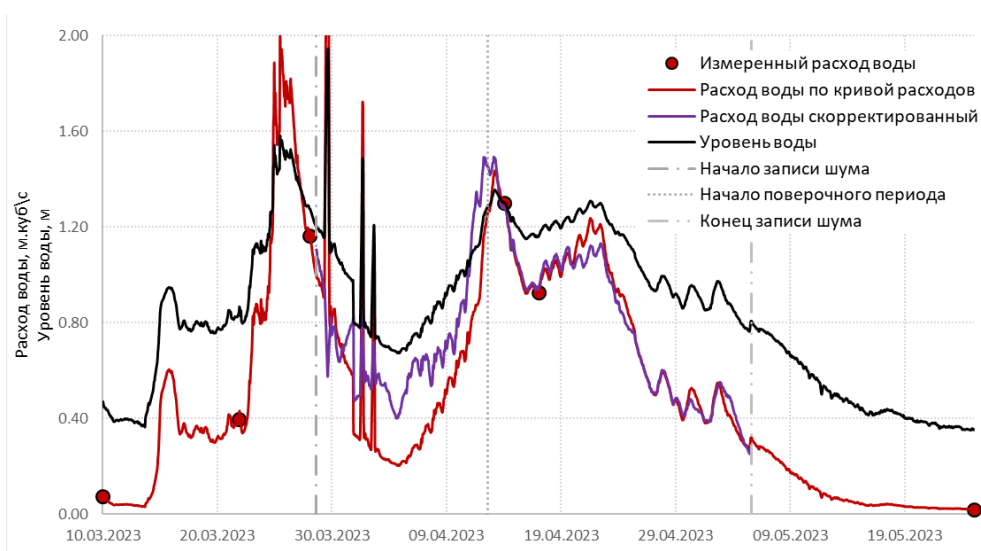


Рис. 5 Гидрометрические параметры половодья 2023 года на Смолячковом ручье.

Поскольку измеренных расходов за дни с 28 марта по 14 апреля не имеется, было решено пересчитать сток за этот период не по кривой расходов с фактическими уровнями воды, а фиктивными, полученными по связи с шумом потока (скорректированные

расходы). Согласно проведенным расчётам объём стока за период с 28 марта по 6 мая при таком подходе увеличился с 2359 тыс.м³ до 2543 тыс.м³, что составляет 7.2%. Такой поход на данный момент времени не имеет достаточного обоснования в связи с тем, что нет основания утверждать, что связь между расходом и уровнем воды за периоды подъёма и спада более неоднозначна, чем связь шума потока с расходом воды. Но исследуя этот метод далее возможно решить проблему неоднозначности на некоторых участках рек.

Выводы и обсуждения

Шум потока имеет весьма специфичное и очень узкое применение в гидрометрии. Рассмотренная технология может являться основной только в случае, когда стандартные гидрометрические методы не могут применяться по разного рода обстоятельствам. Однако шум потока может использоваться как источник дополнительной ценной информации для корректировки исходных данных или для непрерывной записи речного стока. Это особенно актуально для горных рек с быстроразвивающимися дождевыми паводками и малых рек с наличием переменных подпорных явлений.

Список литературы

1. Fässler L. Listening to an alpine intermittent stream: Development of an autonomous microcontroller device to measure water level: Master thesis / Fässler L. — Bern (Switzerland), 2023. — 62 p.
2. Shakti P.C., Sawazaki K. River discharge prediction for ungauged mountainous river basins during heavy rain events based on seismic noise data // Progress in Earth and Planetary Science – 2021. – Vol. 8 (1), No. 58.
3. Ruiz M., Crescentini L., Amoroso A., Gallart J. Seismic monitoring of an Alpine mountain river // Geophysical Research: Solid Earth – 2014. – Vol 119, № 4. – P. 3276–3289.
4. Osborne W.A., Hodge R.A., Love G.D., Hawkin P., Hawkin R.E. Babbling brook to thunderous torrent: Using sound to monitor river stage // Earth Surf. Process. Landforms – 2021. – № 46. – P. 2656–2670.
5. Копысов С.Г., Устройство для измерения расхода воды на горных реках с бурным течением, Россия – Описание полезной модели к Патенту 208404, 16 Декабрь 2021.
6. Audacity ® | Free, open source, cross-platform audio software for multi-track recording and editing [Электронный ресурс]. URL.: <https://www.audacityteam.org/> (Дата обращения 11.08.2023).

Источники и механизмы поступления взвешенных наносов в дельту р. Лены

К.Н. Прокопьева*, А.М. Тарбеева, С.Р. Чалов

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
prokris3@mail.ru*

Аннотация. Распределение мутности в дельте р. Лены носит сложный характер. Для выявления факторов, влияющих на ее распределение, проведено сопоставление значений мутности, полученных по космическим снимкам и измерениям в поле, с геокриологическим строением и темпами отступления берегов. На основе маршрутных обследований малых водосборов проводилась типизация источников поступления наносов и оценка объемов выноса с притоков, впадающих в дельтовые протоки Лены. Установлено, что наибольшее влияние на мутность оказывает интенсивность отступления берегов и их геокриологическое строение. Наибольшие значения мутности приурочены к участкам разрушения р. Леной останцов едомной равнины. Отступление этих высокольдистых песчано-алевритовых отложений дает высокие значения мутности в течение всего теплого периода года. Притоки повышают мутность ленских вод только в периоды половодья и паводков, а в маловодные периоды снижают ее. На содержание взвешенных частиц в водах оказывает влияние также ветровое волнение и русловой режим рукавов. Наименьшая мутность наблюдается в маловодных протоках, расположенных вдоль коренных берегов.

Ключевые слова: мутность, ледовый комплекс, р. Лена, Северная Якутия, Арктика.

Sources and mechanisms of suspended sediment delivery to the Lena River Delta

K.N. Prokopeva, A.M. Tarbeeva, S.R. Chalov

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
prokris3@mail.ru*

Abstract. The distribution of water turbidity as an indicator of the concentration of suspended sediment in the Lena Delta is complex. To identify the factors affecting it, the turbidity values obtained from satellite images and field measurements were compared with geocryological structure and rates of bank erosion, as well as the processes in the basins of small watercourses flowing into the Lena delta channels. It was revealed that the intensity of bank erosion and their geocryological structure have the greatest influence on turbidity. The highest values of turbidity are confined to areas of erosion of the yedoma plain remnants. Such ice-rich silty deposits give high turbidity values throughout the warm period of the year. The tributaries increase the turbidity of the Lena waters only during periods of snowmelt and rainstorms, and reduce it in low-water periods. The turbidity of the water is also influenced by wind waves and the depth of the channel. The least turbidity is observed in the channels located along the bedrock banks.

Keywords: turbidity, Ice Complex, Lena River, Northern Yakutia, Arctic.

Введение

В условиях изменения климата и деградации многолетнемерзлых пород оценка стока наносов северных рек, закономерностей и факторов его формирования является весьма актуальной. Распределение взвешенных наносов в дельте р. Лены носит сложный характер. Их источниками являются как процессы разрушения русла и берегов (русловая составляющая стока наносов), так и поступление наносов из притоков (бассейновая составляющая). Для выявления причин неоднородностей в распределении взвешенных наносов по рукавам дельты проведено сопоставление значений мутности (как основной характеристики стока взвешенных наносов) с морфологией, строением, механизмами и темпами отступления берегов, а также характером эрозионных процессов на малых водосборах, впадающих в дельтовые протоки Лены.

Вершиной дельты Лены считается о. Тит-Ары. Дельта имеет сложное строение и включает в себя не только аллювиально-дельтовые отложения Лены, но и останцы поздненеоплейстаценовой едомной равнины, а также массивы древних морских отложений и останцы скальных пород [1]. Площадь дельты Лены вместе с неаллювиальными останцами составляет около 32 000 км², площадь собственно аллювиально-дельтовых образований оценивается в 20 000 км² [2].

В дельте наблюдаются четыре крупных рукава – Быковская, Трофимовская, Туматская и Оленекская протоки, которые соединены между собой многочисленными малыми протоками, численность которых достигает 6000. Рукава и протоки дельты размывают как современные аллювиальные берега, так и останцы более древних неаллювиальных отложений, которые служат источником русловой составляющей стока наносов. Около 60% стока воды проходит через Трофимовскую протоку.

Источниками бассейновой составляющей стока наносов дельты Лены в основном являются водотоки, стекающие с сопок и хребтов, обрамляющих дельту с юга. В западной части дельты – это кряж Чекановского, а в восточной – Хараулахский хребет. Эти низкогорные массивы не превышают 500 м, и лишь в бассейне р. Кёнгдэй на Хараулахском хребте – 994 м. Суммарная площадь водосбора малых водотоков, впадающих в дельту р. Лены, составляет около 10 000 км². Наиболее крупными из них являются реки Кёнгдэй (площадь водосбора 2370 км²) и Улахан-Юрх (1973 км²).

Методы исследования

Для оценки распределения взвешенных наносов по рукавам и протокам дельты, а также его изменения во времени использовались разновременные спутниковые снимки Landsat. Методика дешифрирования концентрации взвешенных наносов (SSC) основана на моделировании связи значений коэффициента отражения (ρ) красном канале видимого спектра с концентрацией взвешенных частиц, измеренной в полевых условиях [4]. Для анализа снимков использовалась платформа Google Earth Engine и база данных спутниковых снимков Landsat с 2000 по 2022 гг., которая включает в себя свыше 150 безоблачных изображений.

Полевые определения концентрации взвешенных веществ проводились с 11 по 15 августа 2022 г и с 9 по 17 июля 2023 г. Были отобраны пробы воды вдоль Быковской, Оленекской и Туматской протоки для определения весовой мутности воды (SSC) методами фильтрации. Продольные измерения мутности воды по всей длине Быковской протоки проводились 9 августа 2022 г. (при уровне по г/п Кюсюр равном 940 см), 9 июля 2023 г. (уровень составляет 1174 см) и 16 июля 2023 г. (уровень равен 1006 см) путем измерения оптической мутности воды (NTU), которые пересчитывались в весовые значения мутности по устойчивой ($\tau = 0,93$) зависимости $SSC = f(NTU)$.

Для оценки факторов русловой составляющей стока наносов проводился пространственный анализ динамики берегов за 2000-2021 гг. Для этого были сопоставлены снимки Landsat, покрывающие 90% площади дельты Лены за 2000 и

2021 гг. Анализ русловых деформаций был основан на классификации разновременных растровых изображений. Для этого на снимках выделены три класса: 1) водная поверхность, 2) поверхность, закреплённая растительностью и 3) пески. Отступанием берега считались участки, которые на снимке 2000 г. закреплены растительностью, а на снимке 2021 г. представляют собой водную поверхность.

Для оценки бассейновой составляющей стока наносов проводились маршрутные обследования малых водосборов, относящихся к бассейну дельты Лены, на которых проводилась типизация источников поступления наносов и оценка объемов выноса путем оценки динамики малых эрозионных форм [3]. На основе морфологии днищ долин оценивалась связанность потоков наносов (*sediment connectivity*) в пределах малых бассейнов [5]. В устьях некоторых водотоков в полевых условиях определялось содержание взвешенных веществ.

Результаты и обсуждение

Распределение мутности вдоль рукавов отличается по секторам дельты. В Трофимовской протоке в 62% случаев наблюдалось увеличение мутности воды по длине. Противоположная ситуация характерна для Быковской, Туматской и Оленекской проток, где мутность уменьшается по длине. Например, в Туматской протоке на 23 ситуации уменьшения мутности приходится 12 ситуаций увеличения мутности воды. При этом характер распределения мутности воды быстро меняется в зависимости от смены гидрологических и синоптических условий. Например, в период полевых измерений в Быковской протоке, которые проводились на спаде половодья и в период межени (Рис. 1), 9 июля 2023 г. мутность воды на участке от о. Столб до протоки Синицина увеличивалась с 10 до 20 мг/л. Уже 16 июля 2023 г. наблюдалась обратная ситуация на фоне понижения расходов воды (с 9 июля по 16 июля уровень воды по данным г/п Кюсюр уменьшился на 186 см, что составляет примерно $10\,000\text{ м}^3/\text{с}$) мутность воды вдоль протоки уменьшалась с 20,3 мг/л у о. Столб до 13,5 мг/л в протоке Синицина. Локальный максимум наблюдался в заливе Неелова и составлял 35,8 мг/л. Ситуация с увеличением мутности вдоль протоки от 2-3 мг/л до 10 мг/л соответствовала измерениям от 16 августа 2022 г., приходящимся на период межени. Быстрая изменчивость мутности воды также подтверждается спутниковыми измерениями за период полевых наблюдений (сплошная линия на Рис. 1).

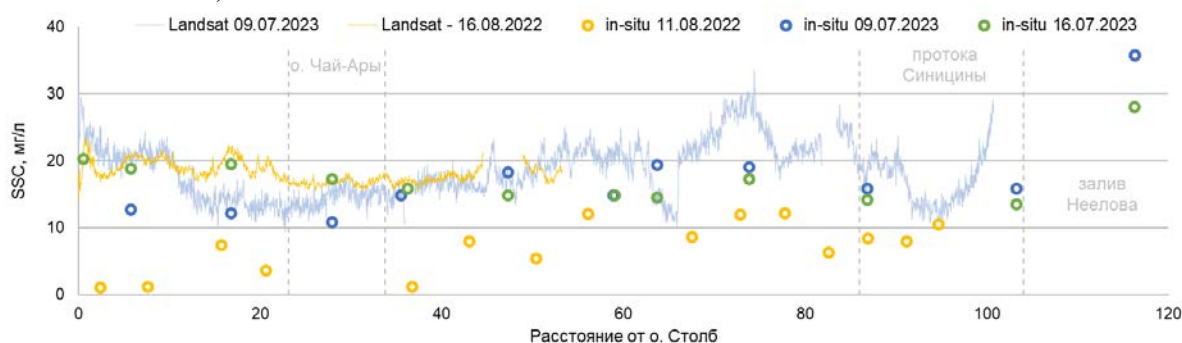


Рис. 1 Продольное изменение концентрации взвешенных наносов (SSC) Быковской протоки по данным полевых наблюдений (точки) и дешифрирования спутниковых снимков Landsat (линии).

Выявленные различия в характере распределения мутности по длине проток могут быть связаны с внешними факторами, такими как неоднородности геологического и мерзлотного строения берегов, влияние абразионных процессов, впадение притоков, локальные изменения уклонов, метеорологические условия и др.

Особую роль в условиях слабоустойчивого русла, характерного для проток дельты Лены, может играть динамика берегов. Интенсивность отступления берегов

увеличивается от верхних частей рукавов к морскому краю дельты, где усиливается абразионная деятельность моря Лаптевых, но также сильно она различается по секторам дельты. Наибольшей интенсивностью русловых деформаций отличается продолжение Трофимовской протоки – Сардахская, где интенсивность отступления берегов достигает 15 м/год. Высокая интенсивность русловых деформаций обусловлена здесь составом разрушаемых отложений: берег о. Собо-Сисе представлен отложениями ледового комплекса (едомой), где объемная доля подземного льда достигает 90%. Эти отложения находятся непосредственно на урезе воды. Тонкие частицы, содержащиеся в ледовом комплексе, легко взмучиваются и долго не оседают, что обеспечивает высокие значения мутности. Кроме того, высокая льдистость отложений способствует термическому разрушению берегов водами р. Лены и потоками воздуха, что также приводит к повышению мутности воды. Так 27.08.2020 в истоке Сардахской протоки содержание взвешенных веществ составляло 15-20 мг/л, в средней части она увеличивалась до 35 мг/л, с максимумами достигающими 50 мг/л. Влияние температурного фактора прослеживается в Трофимовской, Сардахской и Оленекской протоках, на берегах которых обнажается ледовый комплекс.

При сопоставлении отдельных карт мутности и карты интенсивности отступления берегов за 2000-2021 гг. получены уравнения тенденции, отражающие связь изменения мутности воды (SSC) с увеличением площади отступления ($S_{отступ}$) на участке Сардахской протоки у о. Собо-Сисе:

$$SSC = 2,14 * \ln(S_{отступ}) + 36,2$$

На мутность воды оказывает влияние ветровое волнение и сгонно-нагонные явления. Так, существенное увеличение мутности в заливе Неелова (115 км от о. Столб, Рис. 1) объясняется взмучиванием донных отложений в большой мелководной акватории, а также наличием источника тонкодисперсных частиц в едомных отложениях Быковского полуострова.

Увеличение концентрации взвешенных наносов прослеживается и с увеличением скорости ветра, что подтверждается результатами ежедневного отбора проб у о. Самойловский (Табл.).

Табл. Содержание взвешенных частиц по данным пробоотбора и средняя суточная скорость ветра по данным реанализа ERA5-Land в Оленекской протоке у о. Самойловского в 2022 г.

дата	Содержание взвешенных частиц, мг/л	Скорость ветра, м/с,
11 августа	24,3	4,51
14 августа	32,1	6,23
15 августа	14,2	3,47

На основе дешифрирования спутниковых снимков, приходящихся на период прохождения половодья и выпадения обильных жидких осадков, установлено, что на мутность воды в Оленекской протоке и в вершине дельты у о. Тит-Ары, влияние оказывают малые притоки р. Лены на дельтовом участке. Например, по данным снимков Landsat от 31 августа 2010 и 6 августа 2011 г. (выпадение осадков до 10 мм) концентрация взвешенных наносов Оленекской протоке увеличивалась до 20%.

Источниками наносов на водосборах малых рек являются разнообразные экзогенные процессы, которые различаются в зависимости от уклонов и состава подстилающих отложений. Наибольшую площадь в пределах водосбора дельты Лены занимают холмистые предгорья с отметками менее 200 м, распространённые вдоль

Быковской протоки. Они характеризуются пологими (до 5-7 градусов) склонами, покрытыми маломощным (до 5 м) рыхлым чехлом тонкодисперсных (преимущественно склоновых) отложений с включением маломощных (до 1-2 м шириной) полигонально-жильных льдов, покрыты тундровой растительностью. На этих территориях развиты суффозионные выносы наносов на поверхность растительного покрова, связанные с формированием небольших подземных каналов стока по морозобойным трещинам. Ежегодное поступление таких наносов оценивается от первых кубических дециметров до первых кубометров на каждую такую форму. В нижних частях склонов малых долин наблюдается образование эрозионных рытвин с ежегодным объемом выноса на каждую форму до 20 куб. м., включая лед, объем которого может достигать 50%. Более крупные термоэрозионные овраги на исследуемой территории преимущественно малоактивны и развиваются при аномальных паводках, а в их отсутствие – под действием нивации, поэтому объемы их выноса невелики. Также среди источников наносов отмечаются единичные оползни и солифлюкционные языки.

На некоторых террасовидных поверхностях и в межгорных впадинах, с многочисленными термокарстовыми озерами и развитой полигональной сетью, распространены высокольдистые отложения, часть из которых может относиться к едомным, например в Кёнгдэйской впадине [6]. Здесь широко распространены процессы вытаивания полигонально-жилных льдов и эрозионно-термокарстовые овраги, характеризующиеся коленообразными изгибами и развивающиеся при вытаивании подземных льдов за счет тепловой энергии воды (Рис. 2Б). Такие овраги имеют весьма высокие скорости роста и их образование связывают с потеплением.

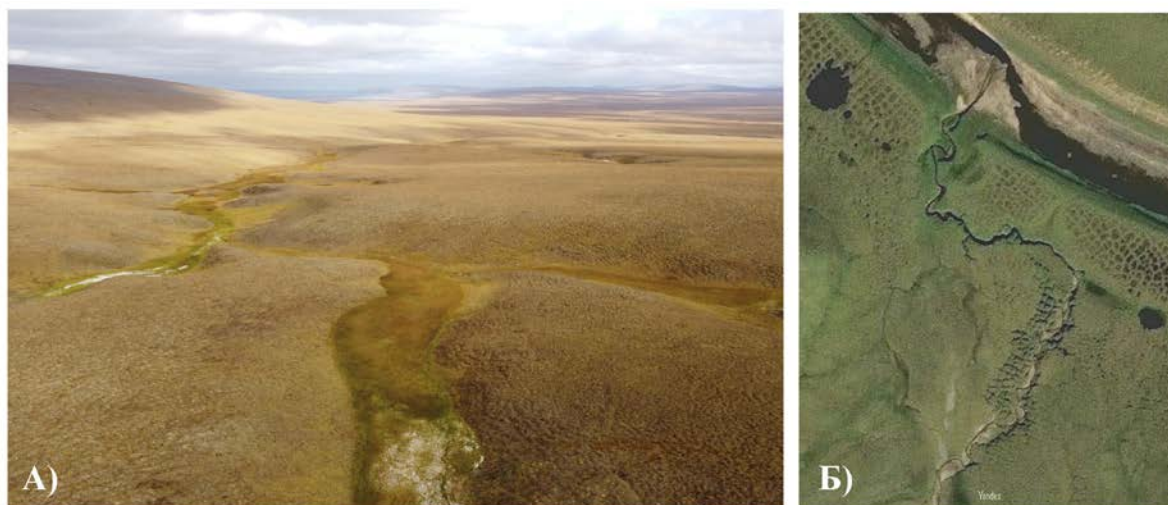


Рис. 2 Притоки р. Лены: А) области аккумуляции наносов ниже оврагов в верховьях р. Крест-Кёнгдэй; Б) Участок активного разрушения рыхлых отложений в нижнем течении одного из притоков Лены с хр. Чекановского.

Горные территории малоисследованы. Они характеризуются уклонами до 30 градусов, в основном имеют грубообломочный чехол отложений. Растительность на них разрежена или отсутствует. Здесь развито массовое смещение обломочного материала, водокаменные потоки, нивационная деятельность.

Наши наблюдения на малых водосборах показывают, что большая часть наносов, поступающих с малых водосборов, оседает в долинах малых рек и ручьев, где образуются внутренние зоны аккумуляции наносов или наблюдаются четковидные русла, перехватывающее сток наносов, то есть, не доходит до русла Лены [3] (Рис. 2А). По нашим измерениям, охватывавшим межень и невысокие паводки, содержание

взвешенных частиц в ручьях, впадающих в протоки Лены, не превышает 1-5 мг/л, то есть существенно ниже, чем в самой Лене.

Однако в устьях некоторых притоков в половодье и высокие паводки на снимках отмечается существенное увеличение мутности. Это свойственно наиболее крупным притокам, имеющим русла с развитыми аллювиальными формами, а также источники тонкодисперсного материала в нижнем течении. Например, на заозёрных террасовидных поверхностях вдоль Оленекской протоки, где были зафиксированы высокие значения мутности после паводков, активно развиваются эрозионно-термокарстовые овраги (Рис. 2Б). На приустьевом участке р. Улахан-Юрях, где река размывает триасовые песчаники и алевролиты, активно развиваются эоловые процессы, также являющиеся источниками наносов. Кроме того, устья наиболее крупных притоков и боковых проток во время половодья и паводков находятся в подпоре от Лены, что приводит к оседанию в них наносов, которые затем вторично поступают в р. Лену. Объемы выноса наносов из горных районов пока остаются неизученными.

Выводы

Формирование стока взвешенных наносов в дельте р. Лены является многофакторным процессом. Наибольшее значение имеют состав и льдистость отложений берегов, интенсивность русловых деформаций и ветровое волнение.

Формирование наносов на водосборе связано с проявлениями экзогенных процессов, часть из которых активизируется при потеплении и деградации многолетнемерзлых пород. Возможность поступления наносов из притоков в русло Лены зависит от морфологии долины и русла. Большая часть наносов из малых водотоков оседает в верховьях долин или четковидных расширениях русел, не достигая дельты р. Лены. Более крупные притоки с аллювиальными руслами поставляют наносы в половодье и паводки, если размывают рыхлые отложения в приустьевой области.

Благодарности

Полевые исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 21-17-00181. Обработка данных осуществлялась по плану НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (№ 121051100166-4).

Acknowledgments

The field works were supported by Russian Science Foundation, project № 21-17-00181. Data processing was conducted under the state assignment of the Research laboratory of soil erosion and fluvial processes, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (project no. 121051200166-4).

Список литературы

1. Большиянов Д.Ю., Макаров А.С., Шнайдер В., Штоф Г. Происхождение и развитие дельты реки Лены. СПб.: ААНИИ, 2013. 268 с.
2. Коротаев В.Н. Геоморфология речных дельт. М.: МГУ. 1991. 224 с.
3. Тарбеева А.М., Ефремов В.С., Лебедева Л.С., Шапов В.В. Эрозионные процессы на малых тундровых водосборах севера Якутии // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 3, с. 15–30.
4. Chalov S., Prokopenko K. Sedimentation and erosion patterns of the Lena River anabranching channel // Water. 2022. Vol. 14, no. 23. P. 3845.
5. Heckmann T., Cavalli M., Cerdan O., Foerster S., Javaux M., Lode E., Smetanova A., Vericat D., Brardinoni F. Indices of sediment connectivity: opportunities, challenges and limitations // Earth-Science Reviews, 2018, Vol. 187, P. 77–108.
6. Strauss J., Laboor S., Schirrmeister L., Fedorov A. N. et al. Circum-Arctic Map of the Yedoma Permafrost Domain, *Frontiers in Earth Science*, 2021, vol. 9, 758360.

Современные изменения стока рек Средней Сибири

Д.А. Прысов*, А.В. Мусохранова

*Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение
ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия
prisov.krasn@gmail.com*

Аннотация. По данным метеорологических станций за 1952-2020 гг. проанализировано многолетнее изменение основных климатических показателей на исследуемой территории. Тренды температуры воздуха характеризуются устойчивым повышением 0,39-0,45 °С/10 лет; для большинства исследуемых метеостанций за период с 1966 по 2020 гг. отмечено увеличение атмосферных осадков – на 2,3-32,6 мм/10 лет. На основании данных наблюдений на гидрологических постах проанализирована динамика стока за период 1939–2020 гг. Анализ изменения зимнего меженного стока показал, что на исследуемых реках, начиная с 40-х годов, отмечен тренд увеличения этого показателя от 0,13 до 1,25 мм/год. Годовой сток увеличился от 0,09 до 0,93 мм/год. На основании полученных результатов можно констатировать, что повышение температуры воздуха, прежде всего, отражается на изменении зимней межени, а увеличение осадков в исследуемом регионе находит отклик в изменении годового стока.

Ключевые слова: речной сток, температурные тренды, атмосферные осадки, динамика стока, Средняя Сибирь.

Modern changes in the flow of rivers in Central Siberia

D.A. Prysov*, A.V. Musokhranova

*V.N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Science, Siberian Branch
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian
Branch, Krasnoyarsk, Russia
prisov.krasn@gmail.com*

Abstract. We analyzed the trends of the major climatic variables for the study area between 1952 and 2020 using weather station data. Air temperature tended to increase steadily from 0.39°C to 0.45 °C per decade. Most weather stations recorded precipitation rises of 2.3-32.6 mm/decade between 1966 and 2020. Based on stream gauge data, we detailed the 1939-2020 water yield changes. Our analysis of winter low water for the rivers of interest revealed that this indicator has increased by 0.13 to 1.25 mm/year since 1940's. Annual water yield exhibited a rise of 0.09-0.93 mm. These findings are sufficient to state that increasing air temperature impacts primarily winter low water, whereas increasing precipitation induces annual water yield changes in the region under study.

Keywords: river runoff, temperature trends, atmospheric precipitation, flow dynamics, Central Siberia.

Введение

В последнее время возрос интерес к процессам, связанным с глобальным изменением климата, что, в свою очередь, делает актуальным изучение гидрологических процессов на территориях распространения многолетнемерзлых

пород. Для Сибири эта проблема является экологически значимой, т.к. огромные площади этого региона находятся в зоне многолетней мерзлоты. Обзор литературы по вопросам глобального изменения климата показал, что в рамках данной проблемы четко вырисовываются два направления: 1 – изучение собственно климатических изменений в криолитозоне Сибири; 2 – изменения геоэкологических условий (в том числе гидрологических) в связи с возможными изменениями климата [1; 3-5; 6; 10]. При этом авторы отмечают, что процесс потепления неоднороден как во времени, так и в пространстве и проявляется по-разному на региональном уровне.

Вследствие того, что ученые придерживаются различных концепций о причинах, вызывающих глобальные изменения климата, и используют для прогноза различные сценарии потепления климата, выводы о влиянии глобальных изменений климата на гидрологический режим в криолитозоне бывают противоречивы.

В связи с этим перед авторами настоящей работы была поставлена задача – выявить на региональном уровне специфику изменения гидрологического режима рек Средней Сибири в условиях глобального потепления климата.

Материалы и методы исследования

Объектами исследований служили пять водосборных бассейнов в северных районах Красноярского края (Рис. 1), расположенных в пределах трех лесорастительных зон, включая лесотундру, северную и среднюю тайгу. Питание рек смешанное, с высоким весенним половодьем, проходящим обычно за один месяц. Реки Турухан и Советская Речка являются левыми притоками Енисея. Территория водосборов этих рек равнинная и очень заболоченная. Реки Нижняя Тунгуска, Ерачимо и Подкаменная Тунгуска формируют свой сток в Среднесибирском плоскогорье, которое отличается разнообразием как гидрологических, климатических, так и лесорастительных условий. Основным критерием при выборе рек была длительности рядов наблюдений за стоком, на отдельных объектах она составляет от сорока восьми до восьмидесяти двух лет.

Для формирования базы данных использовались фондовые материалы УГМС – данные многолетних наблюдений за расходом воды на гидрологических постах и данные метеостанций исследуемого региона [7]. Среднегодовые температуры воздуха и суммы осадков по данным метеостанций приведены на рис. 1. На основе данных по расходам воды в реках были рассчитаны показатели годового и межennaleго стока и проанализированы гидрографы за весь период наблюдений. В нашем случае зимняя межень – это величина среднего стока с ноября по апрель. Выделение линейного тренда и его анализ осуществлены методом наименьших квадратов в программе Microsoft Excel и Statsoft Statistica 10.

Результаты

Анализ линейных трендов среднегодовых температур приземного воздуха за период с 1952 по 2020 годы показал, что в районе исследований наблюдалась устойчивая тенденция к повышению температуры воздуха от 0,39 до 0,45 °C/10 лет. Анализ линейных трендов температуры воздуха по сезонам показал, что максимальные тренды температуры воздуха (0,68-0,71 °C/10 лет) наблюдаются весной, значительное потепление отмечено также и в зимние месяцы (0,44-0,56 °C/10 лет). Летом и осенью температурные тренды менее значительны, но отражают динамику потепления климата.

Большое значение наряду с температурой воздуха для формирования стока рек имеет режим увлажнения, определяемый атмосферными осадками. За период наблюдения с 1966 по 2020 гг. в среднем 66,0 % годовой суммы осадков формируется в

летне-осенний период. Зимой и весной выпадает соответственной 16,7 и 17,3 % годовой суммы осадков.

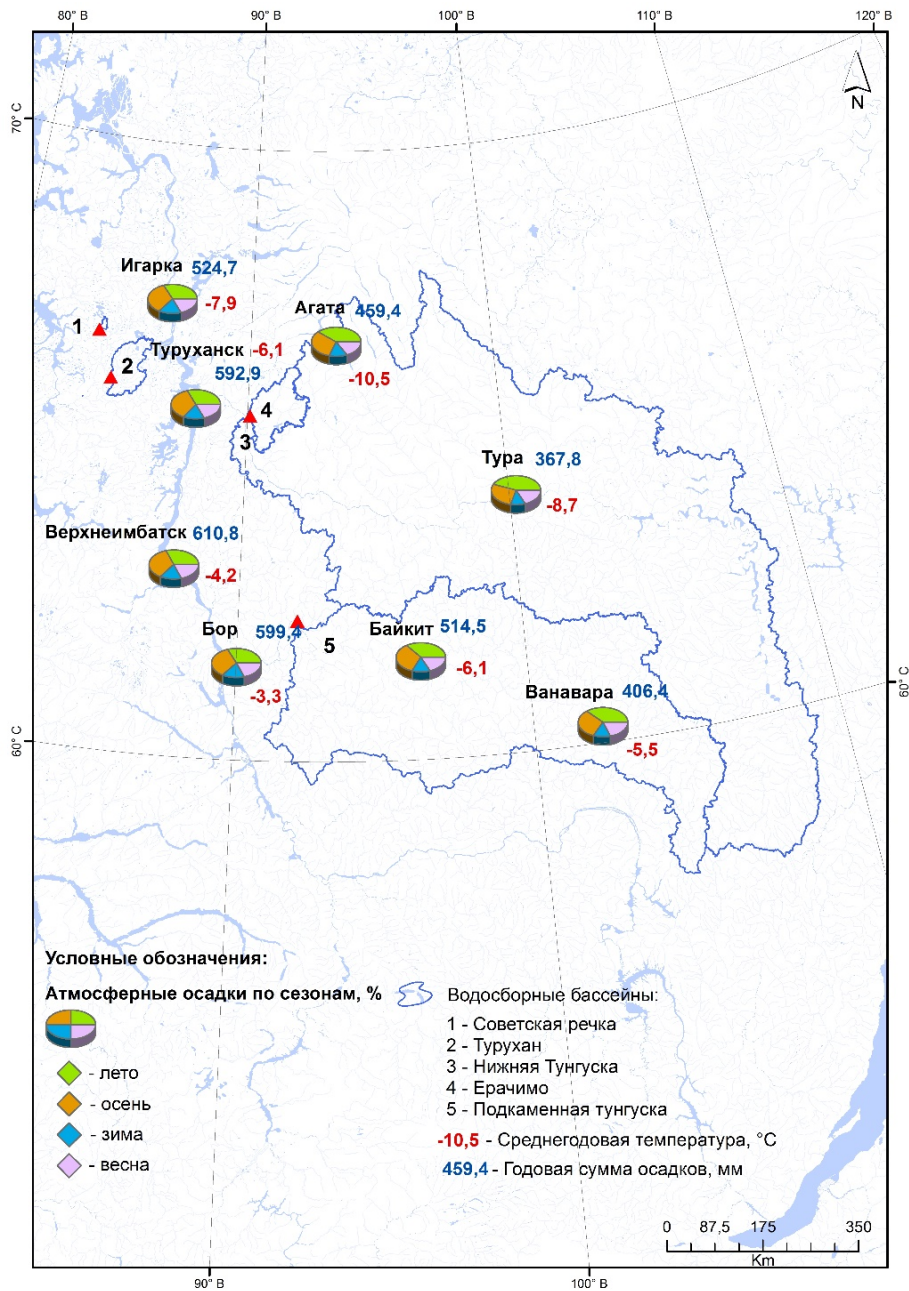


Рис. 1 Карта-схема района исследований.

В отличие от температурных трендов коэффициенты трендов атмосферных осадков имеют не только значительные различия в абсолютных величинах, но различаются по знаку. За период с 1966 по 2020 год на двух метеостанциях из восьми коэффициенты линейных трендов атмосферных осадков имеют знак «минус», а для шести метеостанций характерны тенденция увеличения осадков, интенсивность увеличения годовой суммы осадков за период с 1966 по 2020 год составляет 2,3-32,6 мм/10 лет, на двух метеостанциях (Агата и Байкит) за этот же период отмечено снижение годовой суммы осадков -0,9...-1,2 мм/10 лет.

Как показывает анализ литературных и собственных данных изменение климатических условий непосредственно отражается на речном стоке [2; 8; 9; 11]. В более ранних работах нами были представлены уравнения регрессии, показывающие связь стока северных рек от метеорологических факторов [3; 11]. Анализ полученных гидрологических моделей показал, что годовой сток рек существенно зависит от комплекса гидро-климатических параметров. Для всех исследуемых рек увеличение стока было связано с ростом годовой суммы атмосферных осадков, особенно зимних. Была выявлена неоднозначная связь величины годового стока с температурой воздуха в теплый период года.

Годовой сток увеличился на всех реках от 0,09 до 0,93 мм/год (Табл.). Анализ изменения зимнего меженного стока по годам за разные периоды показал, что на всех исследуемых реках начиная с 40-х годов отмечен тренд увеличения этого показателя от 0,13 до 1,25 мм/год (Табл.). Это указывает на то, что слой сезонного промерзания грунтов не смыкается с верхней границей вечной мерзлоты и в течение зимы реки имеют грунтовое питание. Запасы грунтовых вод пополняются за счет влаги от оттаивания мерзлых грунтов в летний период. При этом как научный, так и практический интерес представляет сравнительный анализ динамики годового стока и зимней межени, т.е. как меняется доля меженного стока по отношению к годовому для определенных отрезков времени.

Табл. Параметры линейного тренда стока рек Средней Сибири.

Река – пункт наблюдений	Годы наблюдений (лет)	Параметры линейного тренда	
		годового стока, мм/год	зимнего меженного стока, мм/год
Советская речка – пос. Советская речка	1975-2020 (48)	0,11	0,76
Турухан – фактория Янов Стан	1941-1945, 1949-2016 (73)	0,84	0,22
Ерачимо – Большой порог	1949-1962, 1968-2020 (67)	0,93	1,25
Нижняя Тунгуска – Большой порог	1939-2020 (82)	0,40	0,13
Подкаменная Тунгуска – фактория Кузьмовка	1939-2020 (82)	0,09	0,15

Анализ данных по меженному стоку в период с ноября по апрель показал значительную межгодовую изменчивость этой величины как в абсолютных, так и относительных величинах (процентное отношение зимнего меженного стока к годовому). В отдельные годы доля меженного стока (% от годового) увеличивается в среднем 5-15 раз по сравнению с годами, отличающимися минимальной величиной зимней межени. Для всех рек без исключения отмечен положительный тренд увеличения доли зимнего меженного стока по отношению к годовому, особенно хорошо прослеживается данная тенденция для рек Ерачимо и Советская речка (Рис. 2).

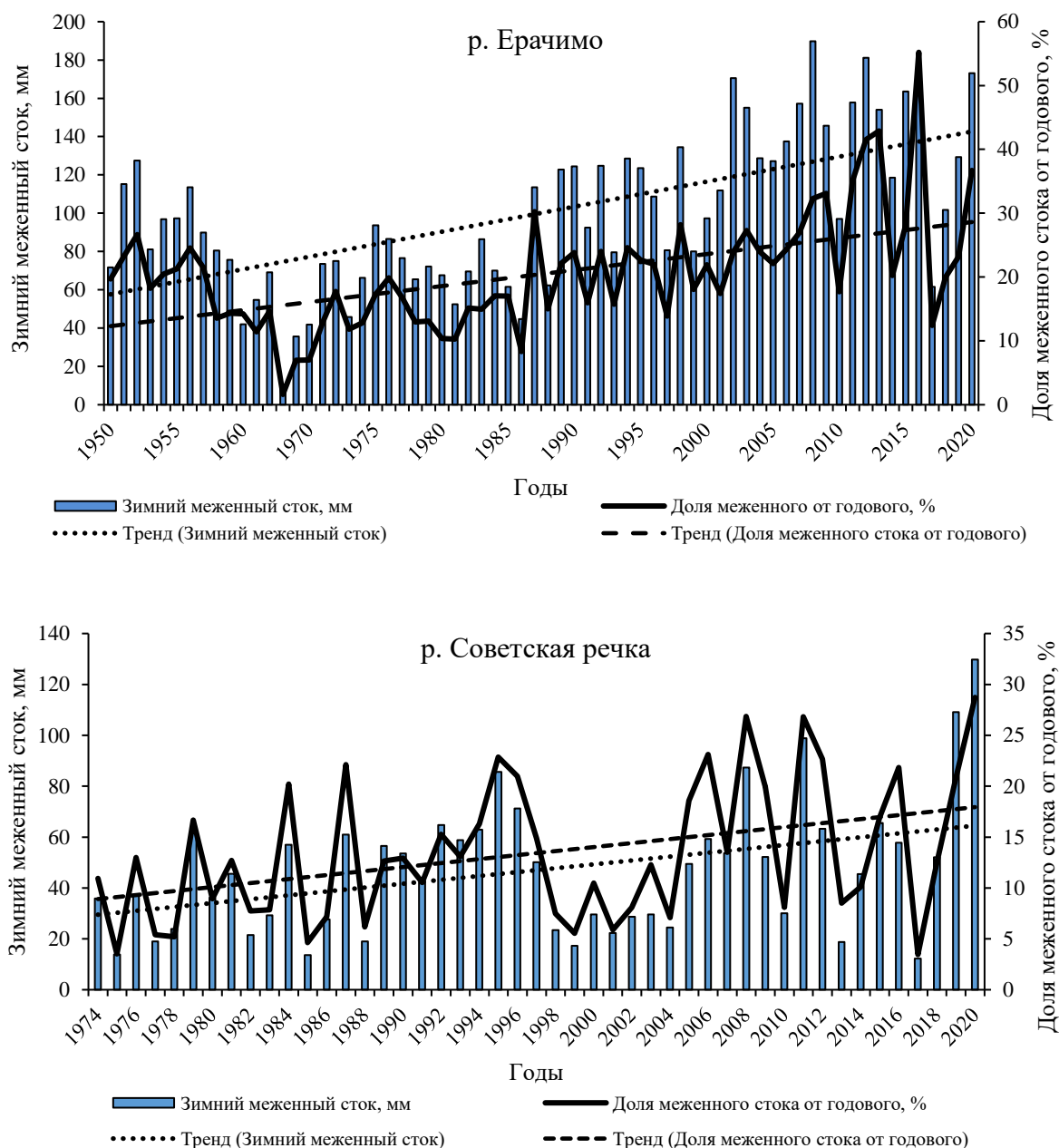


Рис. 2 Динамика зимнего меженного стока рек Ерачимо и Советская речка.

Выводы

Анализ динамики среднегодовой температуры воздуха за период с 1952–2020 гг. показал наличие статистически достоверных трендов температуры воздуха с коэффициентами от 0,39 до 0,45 °C/10 лет, что свидетельствует о устойчивом потеплении на территории севера Средней Сибири. Линейные тренды годовых сумм осадков за период с 1966-2020 гг. на шести метеостанциях из восьми, оказались положительными, рост годовой суммы осадков происходит со скоростью 2,3-32,6 мм/10 лет.

Основная особенность современных изменений речного стока Средней Сибири – увеличение в последние десятилетия годового и зимнего стока. Согласно полученным результатам тренд зимнего меженного стока более выражен по сравнению с годовым стоком, это, показывает, что более значимым фактором в формировании стока рек севера Средней Сибири становится оттаивание многолетнемерзлых пород, тем самым

подтверждая роль динамики климатических условий в изменении водных ресурсов исследуемого региона.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке базового проекта Института леса СО РАН «Научные основы сохранения ресурсного и экологического потенциала лесов Сибири в условиях кумулятивных антропогенных и природных рисков», №. FWES-2021-0010, Рег. НИОКТР № 121030900181-4.

Acknowledgments

This work was funded by “*Scientific Approach to Maintaining Wood Resources and Ecological Services of Siberian Forests Under Cumulative Human-caused and Natural Stresses*” Base Project №. FWES-2021-0010, Reg. NIOKTR №121030900181-4 of the Institute of Forest, Siberian Br., Russian Academy of Sciences.

Список литературы

1. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Шаповалова К.О., Ершова А.А. Анализ индикаторов изменения климата. Часть 1. Восточная Сибирь // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 12. С. 31–42.
2. Болгов М.В., Коробкина Е.А., Филиппова И.А., Трубецкова М.Д. Пространственно-временная структура полей речного стока в бассейне Дона в условиях изменения климата // *Метеорология и гидрология*. 2022. № 5. С. 54–63.
3. Буренина Т.А., Прысов Д.А., Мусохранова А.В. Влияние климатических изменений на гидрологический режим северных рек Красноярского края // *Геогр. и природ. ресурсы*. 2021. № 3. С. 113–121.
4. Ипполитов И.И., Логинов С.В., Харюткина Е.В., Морару Е.И. Изменчивость климата азиатской территории России в 1975-2012 годах // *Геогр. и природ. ресурсы*. 2014. № 4. С. 13–21.
5. Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Комаров А.И., Кусков А.И. Современные природно-климатические изменения в Сибири: ход среднегодовых температур и давления // *Геогр. и природ. ресурсы*. 2004. № 3. С. 90–96.
6. Кабанов М.В., Лыкосов В.Н. Мониторинг и моделирование природно-климатических изменений в Сибири // *Оптика атмосферы и океаны*. 2006. Т. 19. № 9. С. 753–764.
7. Погода и климат – прогнозы погоды, новости погоды, климатические данные. 2020. (<http://pogodaiklimat.ru/>) (дата обращения 11.09.2022).
8. Прысов Д.А., Буренина Т.А., Мусохранова А.В., Кошкарлов А.Д. Трансформация стока рек криолитозоны Средней Сибири при различных сценариях изменения лесистости и климата // *Сиб. лесн. журн*. 2021. № 1. С. 30–44.
9. Dzhmalov R.G., Safronova T.I., Frolova N.L., Kireeva M.B. Climate-induced changes in groundwater runoff in Don Basin // *Water Resources*. 2010. Т. 37. № 5. P. 733–742.
10. Onuchin A., Korets M., Shvidenko A., Burenina T., Musokhranova A. Modeling air temperature changes in Northern Asia // *Glob. Planet. Chang*. 2014. Vol. 122. P. 14–22.
11. Onuchin A., Burenina T., Shvidenko A., Prysov D., Musokhranova A. Zonal aspects of the influence of forest cover change on runoff in northern river basins of Central Siberia // *Forest Ecosystems*. 2021. Vol. 8. № 1. P 1–13.

Содержание хлорофилла *a* в вегетационный сезон в Можайском водохранилище в 2012-2022 гг.

Е.Д. Птицына*, О.Н. Ерина

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
ptitsynaeva@yandex.ru*

Аннотация. По данным полевых исследований, выполненных в вегетационный сезон в 2012-2022 гг. на Можайском водохранилище, при помощи кластеризации были выделены районы водохранилищ, различающиеся по условиям развития цветения, определены типы и интенсивность цветения в межгодовом разрезе. Показано, что в Можайском водохранилище за 2012-2022 гг. развитие фитопланктона приводило к интенсивно-умеренному цветению со «вспышками» опасного цветения. В течение исследуемого периода концентрации Хл *a* изменялась от 0,3 до 103,5 мкг/л. По результатам кластерного анализа были выделены районы по степени интенсивности цветения, которые имеют различные гидродинамические условия.

Ключевые слова: хлорофилл *a*, Можайское водохранилище, цветение, кластерный анализ.

Chlorophyll *a* content a during the vegetable season in the Mozhaisk reservoir in 2012-2022

E.D. Ptitsyna*, O.N. Erina

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
ptitsynaeva@yandex.ru*

Abstract. According to the data of field observations carried out during the vegetable season in 2012-2022 at the Mozhaisk reservoir, using clustering, reservoir areas were identified that differ in the conditions of algal blooming, the types and intensity of blooming were determined in the interannual section the development of phytoplankton led to intense moderate blooming with “outbreaks” of harmful algal bloom/ During the study period, the concentration of chlorophyll *a* varied from 0,3 to 103,5 mkg/l. According to the results of cluster analysis, areas were identified according to the degree of blooming intensity, which have different hydrodynamic conditions.

Keywords: chlorophyll *a*, Mozhaysk reservoir, algal bloom, cluster analysis

Введение

Цветение воды – это природный процесс, свойственный эвтрофным водоемам, характеризующимся высокими значениями первичной продукции органического вещества за счет размножения клеток фитопланктона. При этом на протяжении последних полутора веков наблюдается ускорение процесса эвтрофирования водных объектов в результате значительного роста антропогенного воздействия.

При оценке развития фитопланктона в водоемах во многих исследованиях используют концентрацию хлорофилла *a* – основного фотосинтетического пигмента зеленых растений. Этот показатель является важной экологической характеристикой, по которой можно оценить трофический статус водного объекта, а его массовое определение методически является намного более простым. Поэтому массовый сбор материала для оценки сезонной и пространственной изменчивости развития водорослей по содержанию хлорофилла позволяет намного лучше изучить механизмы формирования и временную изменчивость цветения.

В настоящей работе предпринята попытка оценить интенсивность этого процесса в Можайском водохранилище на основе наблюдений за концентрацией хлорофилла *a* в поверхностном слое воды.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является Можайское водохранилище, которое образовано в 1960 г. в верховьях р. Москвы и входит в Москворецкую систему водоснабжения г. Москвы. Водоохранилище относится к морфологически простым долинным водоемам, его протяженность составляет 28 км, площадь его зеркала при нормальном подпорном уровне (НПУ = 183 м БС) равна 30,7 км², а объем – 235,2 млн м³. Глубина водоема увеличивается в сторону плотины, изменяясь от 2 до 22,6 м, средняя глубина – 7,6 м [2]. Можайское водохранилище является слабопроточным, среднегодовой коэффициент водообмена составляет 1,8 год⁻¹, величина среднего годового притока – 318 млн м³, больше половины от которой поступает во время весеннего половодья, и около трети – во время летне-осенних паводков [1].

Исследования характеристик фитопланктона и содержания хлорофилла в Можайском водохранилище до 2010-х гг. носили периодический характер. С 2012 года по настоящее время на Можайском водохранилище проводится регулярный отбор проб для определения концентраций хлорофилла *a*. Собранная база данных позволяет детально рассмотреть межгодовую и сезонную динамику, а также провести пространственный анализ.

В качестве информационной основы работы были использованы данные многолетних наблюдений Красновидовской учебно-научной базы географического факультета МГУ на Можайском водохранилище за период с 2012 по 2022 гг. Собранная база данных включает 525 определений содержания хлорофилла *a* в поверхностном слое воды в период с мая по сентябрь. В Можайском водохранилище измерения проводились по регулярной сетке станций, расположенных равномерно по всей длине водохранилища (Рис. 1.). В 2014 и 2015 гг. проводились дополнительные подробные съемки, включавшие от 30 до 60 станций.

Для анализа баз данных были использованы программный пакет для кластерного анализа STATISTICA и программа для работы с электронными таблицами Microsoft Excel. Кластеризация станций была проведена с целью выделения районов цветения в разные годы на основе концентрации хлорофилла в поверхностном слое воды.

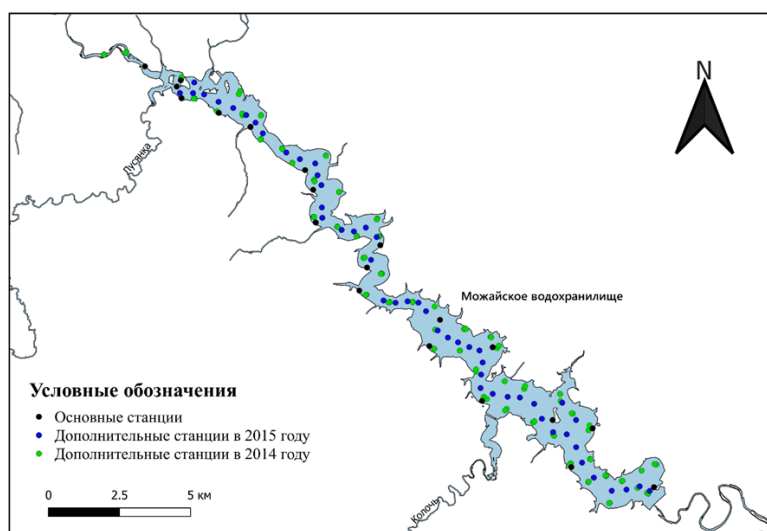


Рис. 1 Расположение станций мониторинга на Можайском водохранилище.

Для выявления вспышек цветения и определения их интенсивности нами был изучен ряд научных публикаций и правовых актов [3,4,5,6,7], где приводятся следующие пограничные значения концентрации хлорофилла *a* в воде, которые и были нами приняты в качестве индикаторов цветения: при концентрации хлорофилла, превышающей 20 мкг/л, в водоеме идентифицируется явление цветения; при концентрации, превышающей 40 мкг/л, данное явление характеризуется как интенсивное, и наконец при концентрации хлорофилла *a*, превышающей 100 мкг/л, мы классифицировали данное явление как опасное (НАВ – harmful algal bloom).

Результаты и обсуждение

Оценка интенсивности цветения. В Можайском водохранилище прослеживаются значительные межгодовые различия среднего за вегетационный период содержания хлорофилла *a* (Хл *a*) в поверхностном слое, среднее изменяется от 11,7 мкг/л до 33,5 мкг/л. В 2017 году максимальные концентрации не превышали 30 мкг/л, в 2012-2014 гг. максимум концентрации Хл *a* находился в диапазоне 40-50 мкг/л. В 2016, 2018, 2020-2022 годах максимальные концентрации Хл *a* изменялись в пределах 60-80 мкг/л. Наибольшие максимальные значения 83,4 мкг/л и 103,6 мкг/л были отмечены в 2015 и 2019 году соответственно, возможно, это связано с тем, что в эти годы летняя межень была устойчивой без дождевых паводков, приток в водохранилище за лето был низкий, что также сопровождалось низкими уровнями воды. В период с 2012 по 2022 год Можайское водохранилище характеризовалось преимущественно умеренной интенсивностью цветения с отдельными очагами интенсивного и даже опасного по своей интенсивности развития фитопланктона (Рис. 2). В 2014 и 2017 годах по средним концентрациям Хл *a* цветение отсутствовало, но по максимальным концентрациям цветение воды характеризовалось как интенсивное и умеренное соответственно. В 2014 году цветение началось только со второй половины июля, в августе на некоторых станциях отмечалось интенсивное цветение. В 2017 году было отмечено цветение только на некоторых станциях, поэтому среднее значение Хл *a* занижено. Согласно максимальным значениям концентрации хлорофилла *a* цветение в многолетнем разрезе в Можайском водохранилище преимущественно характеризовалось как интенсивное, в 2017 году цветение было умеренным, в 2019 году – опасное, максимальные концентрации были отмечены на IV станции, которая находится в Красновидовском плесе, где были сформированы наиболее благоприятные условия для активности и размножения фитопланктона.

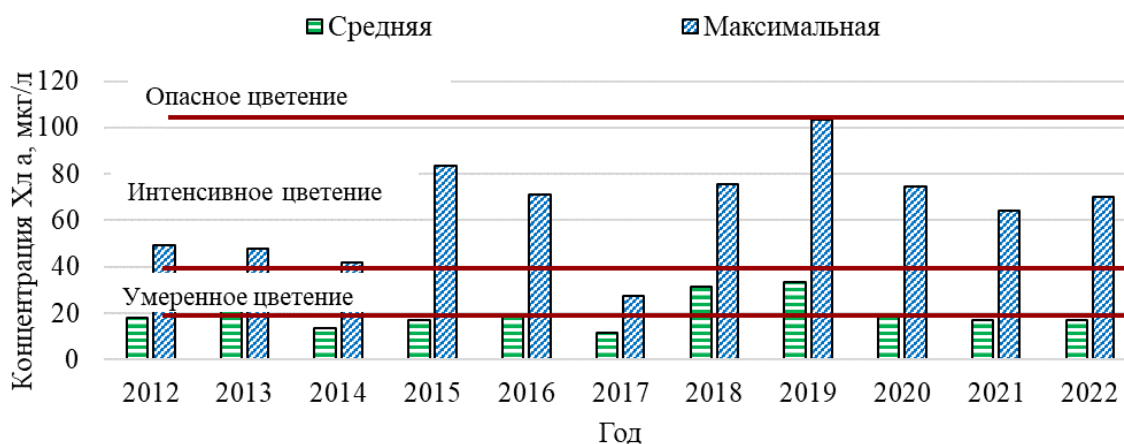


Рис. 2 Интенсивность цветения в Можайском водохранилище по средним и максимальным значениям концентрации хлорофилла *a*.

Пространственная дифференциация интенсивности цветения. В Можайском водохранилище для этого использовались данные наблюдений за содержанием хлорофилла *a* на 5 основных станциях I, II, III, IV и V, максимально охваченных результатами мониторинга. По результатам видно, что во все рассматриваемые годы выделяется 2 основных района водохранилища по условиям цветения, при этом обладающие дифференциацией в пространстве (Рис. 3.).

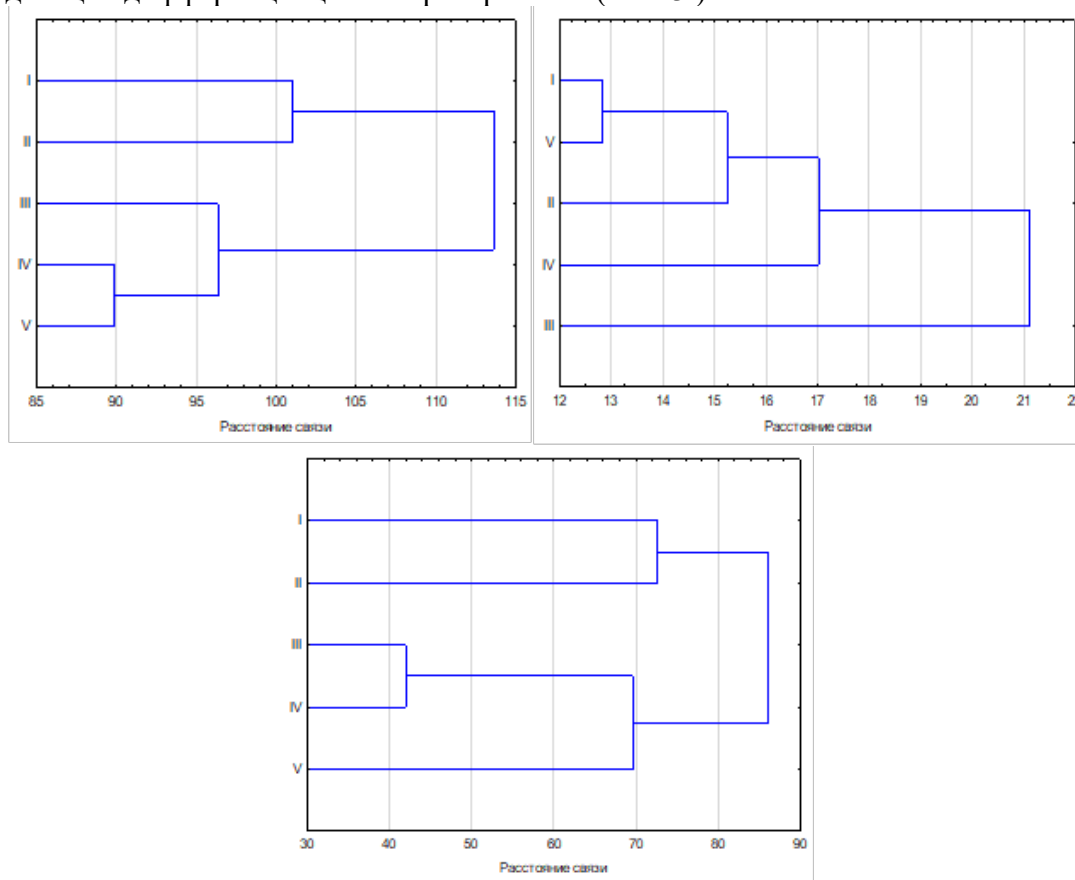


Рис. 3 Кластерный анализ содержания хлорофилла *a* в Можайском водохранилище по данным по станциям а) в среднем за вегетационный период, б) в мае и в) августе в 2012-2022 гг.

Первый район охватывает станции I и II: здесь часто выделяется зона распространения речной водной массы и гидрологического фронта, иными словами, зоны смешения. В среднем содержание хлорофилла *a* в многолетнем разрезе для этого района составило 21,6 мкг/л. Ввиду небольшой глубины, более быстрого прогрева водной толщи и поступления биогенных элементов с речным стоком именно здесь зачастую начинается развитие цветения. Второй район – это район формирования и распространения основной водной массы водохранилища, где формируется озерная по своей структуре экосистема. В среднем за период концентрация хлорофилла здесь составляет 20,5 мкг/л, именно здесь отмечаются и максимальные концентрации хлорофилла *a*.

В августе выделяются такие же 2 района (зона смешения и зона основной водной массы водохранилища), как и при кластеризации данных за весь вегетационный период. В мае I и V станции наиболее схожи по характеру фотосинтетической активности фитопланктона, к этому времени в верховьях речная масса сформирована межленным летним стоком, ядро половодья, обогащенное биогенными элементами, продвинулось ко II и III станциям. На станции V в мае все преобладает трансформированная зимняя водная масса водохранилища, которая к этому моменту содержит мало биогенных элементов.

Выводы

Согласно результатам проведенного исследования, межгодовая изменчивость концентраций хлорофилла *a* в Можайском водохранилище достаточно велика. При этом наихудшие экологические условия в водоеме с точки зрения интенсивности процессов цветения формируются при наиболее низком уровне воды и преобладании антициклонических условий. В пространственном разрезе максимальные концентрации Хл *a* отмечены в районе IV станции в Красновидовском плесе, в котором формируются наиболее благоприятные условия для активного развития фитопланктона.

Список литературы

1. Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз)/ Ред. К.К. Эдельштейн, М.: Изд-во Перо, 2015, 286 с.
2. Комплексные исследования водохранилищ. Вып. 3. Можайское водохранилище. / Под ред. В.Д. Быкова, К. К. Эдельштейна. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979 г., 467 с.
3. Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов / Петрозаводск: изд-во КНЦ РАН. 2007, 394 с.
4. Ahn, Y.-H., Shanmugam, P., Ryu, J.-H., & Jeong, J.-C. Satellite detection of harmful algal bloom occurrences in Korean waters. *Harmful Algae*, 5(2), 2006, P. 213–231.
5. Gitelson, A. A., Gurlin, D., Moses, W. J., & Barrow, T. A bio-optical algorithm for the remote estimation of the chlorophyll-a concentration in case 2 waters. // *Environmental Research Letters*, 4(4), 2009.
6. Hilborn E. D. et al. Algal bloom-associated disease outbreaks among users of freshwater lakes—United States, 2009–2010 // *MMWR. Morbidity and mortality weekly report*, 2014, Vol. 63 №. 1, 11 p.
7. Søndergaard, M., Larsen, S. E., Jørgensen, T. B., & Jeppesen, E. Using chlorophyll *a* and cyanobacteria in the ecological classification of lakes // *Ecological Indicators*, 11(5), P. 1403–1412, 2011.

Оценка характеристик затопления в бассейне реки Томи при изменениях климатических факторов

А.Д. Разаренова*, И.Н. Крыленко

*Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия
Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
svd010100@mail.ru*

Аннотация. С использованием комплекса моделей гидрометеорологического цикла произведена оценка характеристик затопления на участке в районе г. Томск при трансформации входных метеорологических параметров методом «delta-change». В результате адаптации модели формирования стока для бассейна Томи было получено хорошее соответствие расчётных гидрографов фактическим. Выявлено, что рост температур уменьшает объём половодья, сдвигает его в более ранние сроки и меняет конфигурацию гидрографа, а с увеличением осадков происходит увеличение объёма стока. Трансформированные гидрографы стока использовались в качестве входных данных для гидродинамической модели. В итоге численных экспериментов была получена и проанализирована связь изменения характеристик затопления (уровней и площадей) с основными метеорологическими параметрами (температурой и осадками). Отмечено, что рост осадков ведёт к увеличению рассматриваемых характеристик затопления, а с увеличением температуры в среднем происходит смещение наступления максимальных уровней в более ранние сроки, уменьшение отметок водной поверхности и площадей затопления. Также на примере отдельных лет рассмотрена трансформация гидрографа двуимодального половодья 2004 г. и влияние заторного вклада в половодье 2010 г.

Ключевые слова: наводнения в Томске, изменение климата, ECOMAG, DC-метод, комплекс моделей гидрометеорологического цикла, STREAM_2D.

Flooding characteristics assessment under climate change in the Tom River basin

A.D. Razarenova*, I.N. Krylenko

*Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
svd010100@mail.ru*

Abstract. Using a model complex of the hydrometeorological cycle, an assessment was made of the changes in the flow and flooding characteristics of the Tom River with an increase in temperature and precipitation based on numerical experiments using the DC-method. In the issue of adapting the runoff formation model for the Tom basin a good result was achieved for the gauges on the Tom River. Was revealed that the increase in temperatures reduces floods, shifts it to earlier periods and changes the hydrograph configuration. With an increase in precipitation the runoff increases. Using transformed daily water discharges obtained as a result of a numerical experiment with ECOMAG as boundary conditions for the SREAM_2D hydrodynamic model, the addiction between changes in flooding characteristics and the meteorological parameters was composed. An increase in precipitation leads to an increase in the flooding characteristics. With an increase in temperature, on average, there is a shift of

maximum levels to earlier periods, a decrease in water levels and flood areas. Using 2004 as an example a two-modality flood transformation was studied. Moreover 2010 ice jam contribution was studied.

Keywords: floods in Tomsk, climate change, ECOMAG, DC-method, model complex of the hydrometeorological cycle, STREAM_2D.

Введение

В настоящее время широко изучается вопрос влияния изменения климата на человека. Тенденция к потеплению помимо прямого может оказывать и косвенное воздействие на людей и их хозяйственную деятельность. За увеличением температуры воздуха следует увеличение частоты опасных природных явлений, изменение режимов экосистем, ливни, засухи и пр. Одной из задач гидрологии является оценка возможного отклика водных объектов на климатические изменения. В представленной работе для анализа влияния климатических факторов формирования стока в бассейне Томи и воссоздания подобных гипотетических ситуаций была поставлена задача адаптировать модель формирования стока ECOMAG (автор Ю.Г. Мотовилов, ИВП РАН) и далее использовать её в комплексе с двумерной гидродинамической моделью STREAM_2D (В.В. Беликов и др.).

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является река Томь с водосборной площадью 61000 км², которая располагается преимущественно в Кузнецкой котловине. На территории бассейна располагаются города Томск, Кемерово, Новокузнецк и прочие, которые регулярно подвергаются наводнениям, в том числе в результате заторов на реке. Территориальное распределение метеорологических характеристик определяется особенностями рельефа бассейна Томи. На территории бассейна годовые суммы осадков могут изменяться от 450 мм на севере и до 1500 мм на юго-востоке, среднемноголетние температуры в бассейне колеблются от -1°C до 2,5°C. Преобладающими типами почв в бассейне являются дерново-подзолистые и бурозёмы кислые, основные ландшафты – широколиственные леса и лесостепи. Питание реки для замыкающего створа р. Томь – г. Томск смешанное (снеговое составляет 40%). Большая часть дождевого и грунтового стока формируется в верхнем течении Томи (в горном и предгорном районах). Средний расход для замыкающего створа р. Томи за период 1977–2007 гг. составил 1020 м³/с, средний максимальный – 7390 м³/с, максимальный – 11600 м³/с 14 мая 1977 года.

В работе используется комплекс моделей гидрометеорологического цикла, состоящий из модели формирования стока ECOMAG на первом этапе и гидродинамической модели STREAM_2D на втором этапе.

Гидрологический блок ИМК ECOMAG описывает основные процессы гидрологического цикла суши (инфильтрацию, испарение, термический и водный режим почв, формирование снежного покрова и снеготаяние, формирование поверхностного, внутрпочвенного, грунтового и речного стока) [1, 2]. Для адаптации модели в бассейне Томи использовались цифровая модель рельефа GLOBE с разрешением 1 км, карты гидрографической сети с пунктами гидрологического и метеорологического мониторинга, почвенная и ландшафтная карты, а также ряды многолетних метеорологических и гидрологических наблюдений за период с 1979 по 2014 гг.

После схематизации бассейна, калибровка модели производилась для постов р. Томь – г. Томск и р. Томь – г. Новокузнецк с водосборными площадями 57000 км² и 29800 км² соответственно на основе данных о расходах воды за 1989–1998 гг. При оценке качества результатов моделирования использовались критерий эффективности модели Нэша-Сатклифа (NSE) [3] и критерий соответствия объёмов стока BIAS.

При проведении численного эксперимента по оценке чувствительности модели формирования стока к увеличению температур воздуха и осадков был использован метод линейной трансформации метеорологических рядов наблюдений (метод «delta-change», DC-метод) [4]. Для замыкающего поста р. Томь – г. Томск производилась оценка относительного изменения объёма стока, максимальных среднемноголетних расходов и трансформация смоделированных гидрографов за 20-летний период (1995–2014 гг.) при изменении метеорологических входов.

Для оценки изменений характеристик затопления полученные с помощью ИМК ECOMAG на основе метода «delta-change» многолетние трансформированные гидрографы для поста р. Томь – г. Томск использовались в качестве входных граничных условий для двумерного гидродинамического моделирования характеристик затопления с использованием программного комплекса STREAM_2D. Гидродинамическое моделирование производилось на основе модели участка р. Томи в районе г. Томск (от пр. Синий Утёс до пос. Белобородово), адаптированной ранее для данного участка коллективом авторов географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова [5].

В основе программного комплекса STREAM_2D лежит реализация численных методов решения системы уравнений Сен-Венана в приближении модели «мелкой воды», в которой основным допущением является малость вертикального масштаба по отношению к горизонтальному [6]. В такой системе изменение составляющих по вертикали считается пренебрежимо малым и вертикальные характеристики осредняются по глубине потока. Решение производится на нерегулярной треугольно-четырёхугольной сетке. Для исследуемого участка р. Томи в районе г. Томск использовалась четырёхугольная сетка для основных протоков, территории вдоль дамб и дорожных насыпей, для остальной территории – треугольная.

Результаты и выводы

Адаптация модели формирования стока ECOMAG для бассейна Томи была проведена успешно. В результате калибровки критерии эффективности для постов в Томске и Новокузнецке составили NSE 0,81 и 0,82, BIAS 6% и 4% соответственно. По итогам верификации модели было получено хорошее качество моделирования для постов на р. Томи в Томске (Рис.1), Новокузнецке и Кемерово, критерий NSE более 0,80, BIAS не превышает 7% [7].

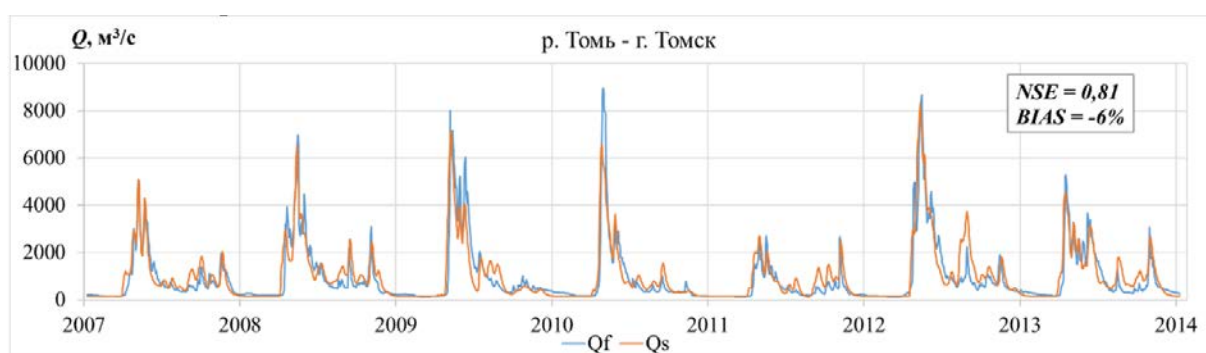


Рис. 1 Гидрографы фактического (Q_f) и расчётного (Q_s) стока за период верификации модели 2007–2013 гг. для поста р. Томь – г. Томск.

В результате численного эксперимента с моделью формирования стока выявлено, что увеличение температуры воздуха сдвигает половодье на более ранние сроки, продлевает паводочный период, немного увеличивает меженный объём стока и уменьшает годовой объём стока, а увеличение осадков значительно увеличивает сток в течение всего года. При увеличении осадков на каждые 10% при неизменной темпер

атуре отмечается увеличение максимального расхода на 7–9% (Табл.). При одновременном росте температур и осадков на 20–30% изменения максимального расхода имеют преимущественно положительный знак, а при росте температур на 0-1°C превышают величину 15%. Увеличение температуры на 4°C без влияния роста осадков ведёт к уменьшению среднего за период максимального расхода воды более чем на 30% и к его сдвигу на 11 дней в более ранние сроки.

Табл. Относительное изменение средних максимальных за 1995–2014 гг. расходов воды при изменении климатических характеристик, %

$\Delta P, \%$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$				
	0	+1	+2	+3	+4
0	0,0	-2,6	-13,1	-23,2	-34,2
10	9,0	7,3	-0,9	-10,3	-19,2
20	16,1	15,3	8,7	-0,2	-7,5
30	21,7	22,0	16,5	7,9	2,1

В результате численных экспериментов с гидродинамической моделью были получены ряды характеристик затопления (площадей, глубин, скоростей течения) для каждого из расчетных гидрографов стока с учетом различных сочетаний изменений температуры воздуха ΔT и осадков ΔP . На их основе были проведены оценки изменений средних и максимальных за период характеристик затопления при изменениях метеорологических входов и построены соответствующие номограммы, показывающие относительные изменения средних и средних максимальных уровней воды и площадей затопления пойм при изменениях температуры воздуха и осадков на водосборе (Рис. 2). При росте температур воздуха уменьшаются максимальные расходы воды половодья и, соответственно, происходит уменьшение площадей и уровней затопления. Так, по результатам моделирования, при росте температур воздуха на каждые 2°C и осадков на 30% происходит снижение площади затопления на 25% и уменьшение отметок водной поверхности на величину до 0,5 м. Увеличение осадков ведёт к росту уровней воды и соответствующему изменению площадей затопления пойм. При росте осадков на 30% при условии неизменной температуры воздуха возможен рост площадей затопления на 100% и отметок водной поверхности на 1,5 м.

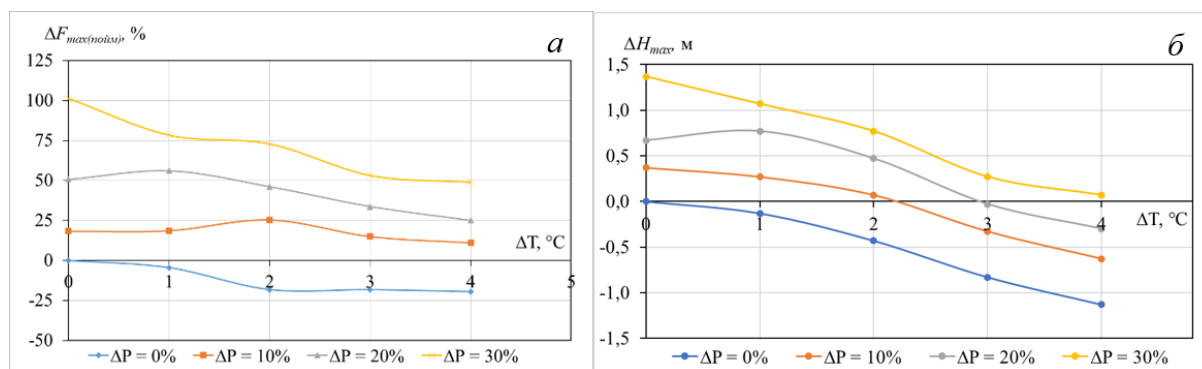


Рис. 2 Относительное изменение средних за 1995–2014 гг. максимальных площадей затопления (а) и средних максимальных отметок водной поверхности (б) при увеличении температуры воздуха и осадков в бассейне р. Томи.

С увеличением температуры происходит смещение наступления максимальных уровней на более ранние сроки (примерно на 1 месяц с ростом на 4°C). В условии двумодальности половодья, что бывает характерно для изучаемой территории, при увеличении температур воздуха первый пик половодья растёт, второй – уменьшается. Ярким примером трансформации гидрографа при двумодальном половодье явилось половодье 2004 г. (Рис. 3). Так, в рамках проводимого эксперимента без изменения метеорологических характеристик максимальная расчётная отметка уровня воды на г.п. Томск – гидроствор (контрольная точка б) в этот год наблюдалась 19 мая при расходе 7381 м³/с и составила 76,6 м БС при практически незатопленной пойме (Рис. 3а), при этом максимальная отметка водной поверхности при увеличении осадков на 30% и температуры на 4°C по г.п. Томск – гидроствор составила 79,5 м БС и наблюдалась на месяц ранее 18 апреля 2004 года при расходе воды 13853 м³/с, что обусловило рост площади затопления пойм более чем на 200% (Рис. 3б).

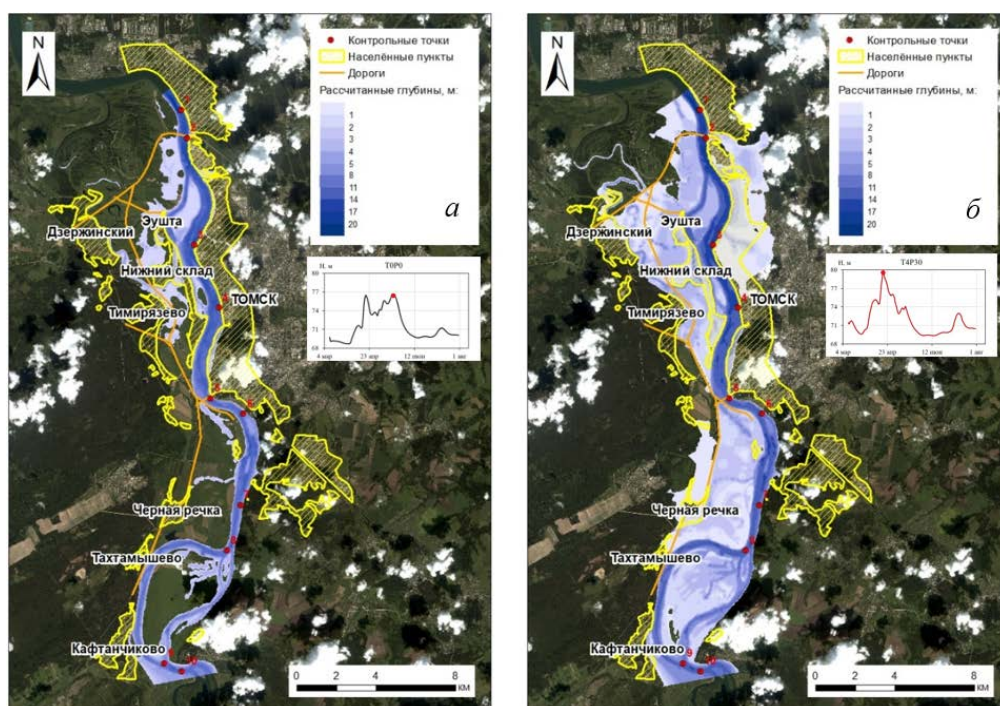


Рис. 3 Рассчитанные по модели STREAM_2D максимальные глубины и площади затопления р. Томи в районе г. Томск в 2004 г.: а - в современных условиях (19.05.2004 при расходе 7381 м³/с), б – при увеличении температуры на 4°C и осадков на 30% (18.04.2004 при расходе 13853 м³/с) (на врезках приведены гидрографы половодья).

Для проведения численного эксперимента на основе затора 2010 года использован фактический расход 9120 м³/с и относительные изменения максимальных расходов 2010 года, полученные в результате модельного эксперимента по DC-методу при увеличении температуры на 1-4 °С и осадков на 10-30%. При моделировании были заданы участки повышенной шероховатости в местах заторов [5]. В качестве граничного условия в нижнем створе использована наблюдавшаяся отметка водной поверхности 76,2 м БС. В результате отмечена бóльшая амплитуда колебаний уровня с затором в отличие от расчёта без затора. При совместном влиянии ледового затора и росте осадков на 30% происходит увеличение максимальных уровней воды на величину 0,8 м, что ведёт к увеличению площадей затопления на 26%. Влияние изменений климата на наводнения заторного генезиса требует дальнейших исследований.

Финансирование

Сбор и анализ исходных данных для адаптации моделей для бассейна и долины р. Томи выполнен в рамках ГЗ кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ раздел I.10 (ЦИТИС 121051400038-1). Оценка характеристик затопления в рамках темы № FMWZ-2022-0001 Государственного задания ИВП РАН. Оценка влияния изменений климата на речной сток в рамках проекта РНФ 23-77-01097.

Список литературы

1. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов / Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. – Москва: РАН, 2018. – 300 с.
2. Антохина, Е.Н., Жук В.А. Применение ИМК ЕСОМАГ для моделирования стока воды с различных по площади водосборов. Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, 4 (2011), с. 17–32
3. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Эффективность моделирования и прогнозирования речного стока / Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. №1 (375). С. 176–189
4. Кучмент Л.С., Мотовилов Ю.Г., Назаров Н.А. Чувствительность гидрологических систем / Москва: Наука, 1990. 143 с.
5. Фролова Н.Л., Агафонов С.А., Беликов В.В., Крыленко И.Н., Головлев П.П. Затонные наводнения в районе г. Томска: генетический анализ и моделирование / Ледовые и термические процессы на водных объектах России: научные труды IV Всероссийской конференции (2013), КЮГ Москва, с. 180–186.
6. Беликов В.В., Алексюк А.И. Модели мелкой воды в задачах речной гидродинамики. – Москва: РАН, 2020. – 346 с.
7. Разаренова А.Д., Крыленко И.Н. Моделирование водного режима реки Томи / Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS-2022. с. 308-310.

Математическое моделирование прорывных паводков, образующихся при прорывах моренных озёр

В.А. Распутина*, Г.В. Пряхина

*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия
lerasputina88@gmail.com*

Аннотация. Прорывы моренных и приледниковых озёр являются опасными гидрологическими явлениями и несут за собой катастрофические последствия. Зачастую единственным возможным методом исследования процесса прорыва является математическое моделирование. На основе представленной методики расчёта характеристик прорывных паводков, которая включает в себя два триггерных механизма разрушения моренной плотины и неоднородный состав морены, было проведено математическое моделирование реального прорыва озера Маашей (Северо-Чуйский хребет, Центральный Алтай, Россия) и потенциального прорыва озера Гачи-Коль (горный массив Таван-Богдо-Ола, Юго-Восточный Алтай, Россия).

Ключевые слова: прорывы озёр, прорывные паводки, математическое моделирование.

Mathematical modelling of outburst floods formed during of moraine-dammed lakes outbursts

V.A. Rasputina*, G.V. Prykhina

*St. Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia
lerasputina88@gmail.com*

Abstract. Outbursts of moraine-dammed lakes and periglacial lakes are dangerous hydrological phenomena and lead to catastrophic consequences. Often the only possible method for studying the outburst process is mathematical modelling. Based on the presented methodology for calculating the characteristics of outburst floods, which includes two trigger mechanisms for the moraine dam destruction and the heterogeneous composition of the moraine, mathematical modelling was carried out of a real outburst of Lake Maashey (North-Chuya Ridge, Central Altai, Russia) and a potential outburst of Lake Gachi-Kol (Tavan-Bogdo-Ola mountain ridge, South-Eastern Altai, Russia).

Keywords: lakes outbursts, outburst floods, mathematical modelling.

Введение

В современных условиях нестационарного климата сокращается площадь оледенения горных массивов, что оказывает существенное влияние на динамику озёрно-ледниковых комплексов: увеличиваются размеры существующих озёр и формируются новые водоёмы на территориях, высвобождающихся ото льда. Быстрое увеличение объема озёра может привести к ослаблению запрудной плотины и последующему прорыву водоёма. В результате прорывов озёр формируются катастрофические прорывные паводки и сопряжённые с ними селевые потоки, наносящие масштабный ущерб территориям, расположенным ниже по течению [5]. В этой связи изучение процессов формирования прорывных паводков не просто

представляет собой научную задачу, но является основой для прогнозов таких явлений с целью предупреждения и защиты населения и территорий.

По причине внезапности и быстротечности процесса прорыва организация наблюдений за ним практически невозможна. Поэтому для изучения процесса прорывного паводка и получения таких характеристик, как максимальный расход воды, скорость потока и продолжительность прорыва, применяются методы математического моделирования. В настоящей статье представлена методика расчёта характеристик прорывных паводков, образующихся при прорывах моренных озёр, с учётом двух триггерных механизмов прорыва и неоднородного состава моренной плотины.

Материалы и методы

Настоящая методика основывается на следующих представлениях о формировании прорывного паводка. Длительный высокий уровень воды может стать причиной фильтрации воды через тело моренной перемычки. Просачивающаяся через тело плотины вода приводит к ослаблению сил сцепления материала, из которого она сложена. Моренная плотина имеет неоднородную структуру, которая влияет на размыв и на максимальный расход воды. Просачивание воды через слой грунта приводит к выносу частиц этим потоком, формируя фильтрационный канал и инициируя начало прорыва плотины. Причем в начальный момент времени скорости потока воды имеют небольшие величины, при которых вымываться могут не все частицы грунта, а только те, чьё критическое сдвиговое напряжение меньше сдвигового напряжения воды. И какая доля этих выносящихся водой частиц содержится в моренной перемычке, на эту долю относительно единицы и происходит расширение и углубление канала. Формирование канала происходит в центральной части дамбы, и принимается, что канал имеет круглую форму. На начальный момент времени диаметр канала имеет малое значение. По мере разрушения происходит увеличение размеров образовавшегося канала, и, как следствие, увеличение расходов воды. При увеличении скоростей потока и соответственно увеличении скорости эрозии происходит постепенное расширение канала до момента пока диаметр канала не достигнет критического значения, равного 1/5 от напора воды, так как образованная арка не может выдержать верхний свод грунта [2]. При достижении этого критического значения будет происходить обрушение части дамбы, находящейся выше канала, и дальнейший вынос обвалившегося грунта потоком воды. После чего расчет осуществляется как для перелива.

Последующее разрушение моренной перемычки осуществляется путем перелива воды с момента, когда произошло обрушение грунта. Поток воды концентрируется в месте формирования прорана, и вода из озера начинает течь через образовавшийся открытый канал. Разрушение плотины и развитие прорана происходит сверху вниз неравномерно по причине неравномерного распределения скоростей потока по глубине.

Приращение диаметра фильтрационного канала рассчитывается согласно [7]:

$$\Delta l(t) = E(t) = K[\tau(t) - \tau_c] \quad (1)$$

где $\Delta l(t)$ – приращение канала, соответствующее скорости эрозии $E(t)$, K – коэффициент эрозии, определяется соотношением, приведённым в [8], $\tau(t)$ – напряжение сдвига, инициируемое водным потоком, τ_c – критическое сдвиговое напряжение, которые рассчитываются по формулам, приведённым в [8]. Сдвиговое напряжение $\tau(t)$ зависит от скорости потока воды и определяется как:

$$\tau(t) = \gamma_w R(t) S(t), \quad (2)$$

где γ_w – удельный вес воды, R – гидравлический радиус; $S(t)$ – энергетический уклон, выражение для которого имеет следующий вид $S(t) = \bar{v}^2 n^2 [R(t)]^{-4/3}$, в котором \bar{v} –

средняя скорость потока воды, рассчитываемая по формуле $v_f(t) = \sqrt{\frac{2g(z_w(t) - z_{pip})}{h_f(t)}}$ (g – ускорение свободного падения, $z_w(t)$ – отметка поверхности воды потока, z_{pip} – отметка центра канала, $h_f(t)$ – потери напора по длине); n – коэффициент Стиклера, зависящий от крупности частиц грунта, характеризуется значениями в интервале от 0.01 до 0.05 и определяется соотношением $n = \left(\frac{0.15}{\sqrt{g}}\right) k^{1/6}$ (k – крупность частиц грунта).

Для определения критического сдвигового напряжения воспользуемся формулой, предложенной [6]:

$$\tau_{кр} = 6.8(\xi)^{1.68} \kappa^{-1.73} \zeta^{-0.97} \quad (3)$$

ξ – индекс пластичности грунта, % (характеристика, отражающая способность грунта удерживать воду, для супесей изменяется в пределах 1-7%, для суглинков 7-17%, для глин больше 17%), из которого сложена плотина, ζ – пористость грунта. Для учёта неоднородности структуры моренной перемычки при расчете прорыва необходимо сначала определить сколько всего фракций содержится в составе морены, и какая доля каждой фракции содержится в моренной перемычке (задать это содержание в долях). Путём ввода для каждой фракции своих характеристик грунта (удельного веса γ_s , индекса пластичности ξ , коэффициента шероховатости n_s и коэффициента Стиклера n , пористости ζ и содержания глины N) определяются сдвиговые напряжения τ , критические сдвиговые напряжения τ_c , коэффициенты эрозии K , (количество фракций может быть от 1 до N).

Расход воды через фильтрационный канал рассчитывается по соотношению:

$$Q_f(t) = \omega_f(t) v_f(t), \quad (4)$$

где $\omega_f(t)$ – площадь фильтрационного канала.

После обрушения грунта над фильтрационным каналом поток воды концентрируется в месте формирования прорана. Разрушение перемычки и развитие прорана происходит сверху вниз неравномерно по причине неравномерного распределения скоростей потока по глубине.

Приращение линейных размеров прорана зависит от скорости эрозии и рассчитывается по формуле (1). Ввиду того, что в турбулентном потоке наиболее значительный градиент скорости имеет место в придонном слое [1], скорость эрозии рассчитываем для средней (5) и донной (6) скоростей потока.

$$\bar{v} = \sqrt{2g[z_w(t) - z_B(t)]}, \quad (5)$$

где $z_w(t)$ является функцией, описывающей зависимость отметки воды водоёма от его объёма $F(V(t))$, $z_B(t)$ – отметка дна прорана;

$$v_B = \bar{v} \sqrt{1 - \frac{z}{R(t)} \left(0.57 + \frac{3.3}{C(t)}\right)}, \quad (6)$$

в котором z – глубина погружения точки, $C(t)$ – коэффициент Шези, $R(t)$ – гидравлический радиус потока. Приращение линейных размеров прорана, которые вызваны донной эрозией $\Delta l_B(t)$, меньше, чем у его боковых частей $\Delta l(t)$, так как придонная скорость ниже среднего значения скорости, которое используется для расчёта $\Delta l(t)$, поэтому форма прорана аппроксимируется трапецией.

Расчёт расхода воды через проран Q_B при переливе осуществляется по уравнению водослива с широким порогом (9), так как течение воды через проран близко к течению воды через водослив с широким порогом. Подобный подход широко используется при расчетах расходов воды при прорыве грунтовых плотин, например в [6]:

$$Q_B = \mu \omega(t) \sqrt{2g[z_w(t) - z_B(t)]} \quad (9)$$

где $\omega(t)$ – площадь поперечного сечения прорана, определяется как $\omega(t) = \frac{D_T(t)+D_B(t)}{2} [z_w(t) - z_B(t)]$ ($D_T(t)$ – ширина верхней части прорана, $z_B(t)$ – ширина прорана по дну), μ – коэффициент расхода. Подробное математическое описание расчёта характеристик прорывного паводка при переливе воды приведено в [4].

В качестве объектов исследования, для которых выполнялось математическое моделирование прорывных паводков, были выбраны моренные озёра высокогорий Алтая: прорывавшееся озеро Маашей и приледниковое озеро Гачи-Коль (Рис. 1). Обследование водоёмов и их моренных перемычек, определение морфометрических характеристик озёр и образовавшегося прорана (для случая прорыва озера Маашей) и наблюдения за уровнем режимом были выполнены в рамках проведения комплексных географических экспедиций Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета в 2021 и 2022 гг.

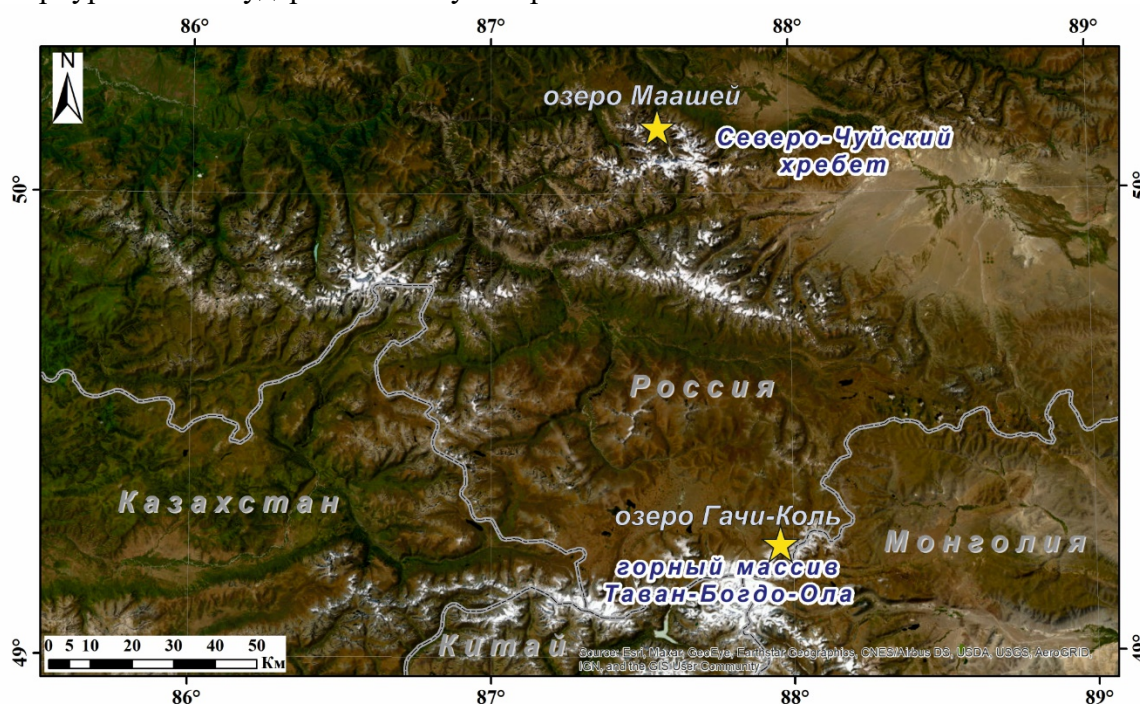


Рис. 1 Схема расположения объектов исследования.

Озеро Маашей было расположено на территории Северо-Чуйского хребта на высоте 1984 м. н.у.м. и образовалось при перекрытии стока реки Маашей каменным глетчером с западной части долины и обвалом рахлообломочного материала с её восточной части. Анализ спутниковых снимков Landsat за разные годы показал ежегодное увеличение площади озера к концу периода абляции, что обусловлено большим притоком воды в результате повышенного таяния ледника в условиях происходящего потепления климата. При увеличении объёма воды в озере происходило повышение давления воды на запрудную плотину, которое могло её ослабить. Прорыв озера произошёл 15 июля 2012 г. Воздействие внешнего триггера в виде продолжительных интенсивных осадков (суммарно за 13-15 июля 2012 г. выпало 67 мм осадков, а в день, когда произошёл прорыв, 34 мм) привело к подъёму уровня воды в озере и обводнению подпруживающей перемычки, её ослаблению и размыву. При проведении полевых работ была выдвинута гипотеза о том, что прорыв озера был инициирован интенсивным оттоком воды через фильтрационный канал с последующим обрушением плотины, и последующим переливом через гребень.

Вторым объектом исследования является приледниковое озеро Гачи-Коль, расположенное на северном склоне горного массива Таван-Богдо-Ола на высоте

3240 м. н.у.м. Озеро характеризуется сложным уровенным режимом: при достижении критического уровня воды происходит перелив через гребень плотины, а также был зарегистрирован отток воды из озера по фильтрационным каналам в теле моренной перемычки. В настоящий момент времени озеро находится на этапе заполнения своей чаши (трансгрессивная стадия развития) и с течением времени увеличивается в размерах, что также было подтверждено анализом спутниковых снимков за разные годы [3]. При дальнейшем увеличении озера поверхностный сток через гребень плотины может либо увеличиться, либо привести к её размыву и последующему прорыву. Вторым механизмом прорыва может являться размыв фильтрационных каналов в теле плотины, что приведёт к тому, что часть моренной перемычки, которая находится над каналом, может потерять устойчивость и просесть, и вода из озера начнёт переливаться через образовавшийся проран.

Результаты и обсуждение

На основе предложенной методики расчёта характеристик прорывного паводка были смоделированы реальный прорыв озера Маашей и потенциальный прорыв приледникового озера Гачи-Коль. Для того чтобы оценить будущий прогностический сценарий развития событий, математическое моделирование прорывного паводка для озера Гачи-Коль проводилось для двух возможных механизмов разрушения моренной плотины. В качестве начальных условий для моделирования задавались: объём водоёма, предшествующий прорыву, размеры начального фильтрационного канала (для случая прорыва озера в результате интенсивной фильтрации) или начального размера прорана (для случая перелива), характеристики моренного материала плотины (удельный вес материала, процент содержания глины, индекс пластичности). По результатам проведённого моделирования получены основные характеристики прорывных паводков: гидрографы (Рис. 2), время прохождения паводков, скорости потока через проран и размеры проранов.

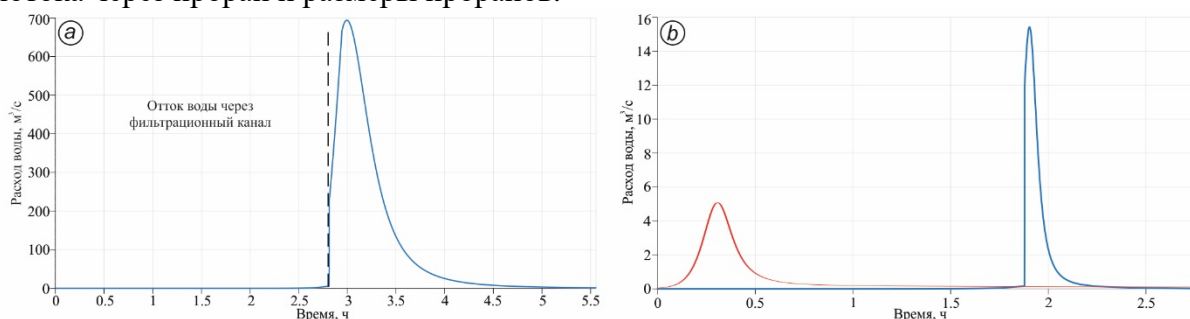


Рис. 2 Смоделированные гидрографы прорыва озера Маашей (а) и прорыва озера Гачи-Коль (б) (красная линия – прорыв в результате перелива, синяя линия – прорыв в результате размыва фильтрационного канала).

Согласно полученным результатам при прорыве озера Маашей (рис. 2а) максимальный расход воды составил 694 м³/с. Средние скорости течения потока варьировались от 0.2 м/с в начале прорыва и достигали 5-6 м/с на пике прорывного паводка. При прорыве произошёл полный спуск озера Маашей. В результате прорыва образовался проран на всю высоту подпрудной плотины (10 м) площадью 476 м² (наблюдённая 415 м²). Качество моделирования оценивалось по результатам сравнения расчётных по методике значений прорана с его измеренными значениями, так как размеры прорана являются единственной проверочной информацией. Расхождение между реальной шириной прорана и расчётной составила 15%, что показывает адекватность алгоритма методики и возможность её использования для дальнейшего моделирования прорывных паводков.

Результаты математического моделирования прорыва озера Гачи-Коль (Рис. 2б) показали, что максимальный расход прорыва при развитии фильтрационного канала может достигнуть $15.4 \text{ м}^3/\text{с}$. Средняя скорость оттока воды по фильтрационному каналу изменяется от 0.05 до 0.1 м/с , при переливе скорость потока может достигнуть 2.7 м/с . Площадь образовавшегося прорана может составить 14.9 м^2 . Величина максимального расхода воды при прорыве озера в результате перелива по отношению к величине максимального расхода прорыва, формирующегося в результате образования фильтрационного канала, меньше в 3 раза. Это обусловлено тем, что при формировании прорана в случае развития фильтрационного канала происходит резкое обрушение грунта, которое ведёт к резкому увеличению как площади поперечного сечения потока воды, так и резкому увеличению скоростей потока. Средние скорости потока изменялись от 0.4 до 1.9 м/с . При потенциальном прорыве озера в результате перелива воды может сформироваться проран площадью 17.6 м^2 .

Заключение

Преимущество представленной методики расчёта характеристик прорывного паводка заключается в учёте неоднородного состава моренной перемычки и двух триггерных механизмов прорыва водоёма (перелив воды через гребень плотины и образование фильтрационного канала в её теле). На основе методики расчёта было проведено математическое моделирование прорывов моренных озёр Алтая: реального прорыва озера Маашей и потенциального прорыва озера Гачи-Коль. В результате моделирования были получены: гидрографы прорывов, скорости прорывного паводка, период прохождения прорывных паводков и размеры образовавшихся проранов. Качество моделирования оценивалось по результатам сравнения смоделированных значений прорана с его измеренными значениями, так как размеры прорана являются единственной проверочной информацией. Расхождение при сравнении расчётных данных с измеренными значениями не превышала 15% , что говорит о адекватности алгоритма расчёта и возможности его дальнейшего использования.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-27-00171 «Моделирование прорывов водоёмов, подпруженных дамбами естественного происхождения».

Acknowledgments

This research was funded by the Russian Science Foundation, grant number 23-27-00171 «Modelling of outbursts of reservoirs dammed by natural dams».

Список литературы

1. Быков В.Д., Васильев А.В. Гидрометрия. Издание четвёртое, переработанное и дополненное. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 444 с.
2. Протодяконов М.М. Давление горных пород и рудничное крепление. ГИЗ, 1931. 65 с.
3. Распутина В.А., Пряхина Г.В., Ганюшкин Д.А., Банцев Д.В., Панютин Н.А. Особенности уровня режима приледниковых моренно-подпрудных озёр в стадии роста (на примере озёр горного массива Таван-Богдо-Ола, Юго-Восточный Алтай) // Лёд и снег. 2022. Т.62. № 3. С. 441-454.
4. Распутина В.А., Пряхина Г.В., Попов С.В. Опыт моделирования гидрографа прорывного паводка при разрушении грунтовых плотин в результате перелива // Успехи современного естествознания. 2021. № 12. С. 194-204.
5. Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А., Беккиев М.Ю., Висхаджиева К.С., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Кидяева В.М., Крыленко В.В., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Савернюк Е.А., Смирнов А.М. Прорыв озера Башкара

(Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года // Криосфера Земли. 2018. Том 22, № 2. С. 70–80.

6. Chang D.S., Zhang L.M. Simulation of the erosion process of landslide dams due to overtopping considering variations in soil erodibility along depth // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2010. Vol. 10. P. 933–946.

7. Chen S., Zhong Q., Shen G. Numerical modeling of earthen dam breach due to piping failure // Water Science and Engineering. 2019 Vol. 12. No. 3. P. 169–178.

8. Temple D.M., Hanson G.J. Headcut development in vegetated earth spillways // Appl. Eng. Agric. 1994. Vol. 10 (5). P. 677-682.

Влияние городской инфраструктуры левобережья г. Томска на речную гидравлику р. Томь по результатам моделирования

Р.В. Романовский

*ООО "Сибирьгидротехпроект", г. Томск, Россия
keny146@gmail.com*

Аннотация. В статье представлены некоторые нетривиальные гидравлические эффекты в русле и пойме р. Томь, в левобережной части г. Томска, полученные по результатам комплекса работ по компьютерному моделированию речной гидравлики. Необходимость проведения работ вызвана изменением плана по застройке одамбованной ранее территории, а именно строительства жилого района с населением более 100 тысяч жителей, что, в свою очередь, ведет к изменению класса защитного гидротехнического сооружения, а также, перспективными планами гражданского многоэтажного строительства в районе Северного моста на территориях, прилегающих к реке Томь в Зоркальцевском сельском поселении Томского района Томской области.

Произведено численное моделирование речной гидравлики (зоны затопления, распределение скоростного поля потока и расчетных глубин) при прохождении весеннего половодья 0.1 % обеспеченности при условии повышения проектных отметок существующей дамбы вокруг поселка Элеонор и строительства новой левобережной дамбы от с. Черная Речка до поселка Элеонор.

Получены нетривиальные гидравлические эффекты, вызванные комплексом факторов, таких как существующая городская и транспортная инфраструктура левобережной части г. Томска, а также дополнительным влиянием проектируемой дамбы.

Эти эффекты были проанализированы в настоящей статье, определены вызывающие их факторы, сделаны выводы о том, что такие тонкие эффекты могут быть выявлены только при применении метода имитационного моделирования и недоступны стандартным методам, используемым в рамках инженерных изысканий.

Ключевые слова: численное моделирование, компьютерное моделирование зоны затопления, двумерная гидравлическая модель, имитационная модель, моделирующая система HEC-RAS.

Influence of urban infrastructure of the Tomsk city on the Tom River left bank hydraulics according to the modeling results

R.V. Romanovskiy

*LLC Sibirgidrotekhproekt, Tomsk, Russia
keny146@gmail.com*

Abstract. The paper presents some non-trivial hydraulic effects in the bed and floodplain of the Tom river, in a part of the Tomsk left bank obtained from a set of works on computer modeling of river hydraulics. The reason for these works is due to changes in the plan for development of the previously dammed area, namely the construction of a residential area with a population of more than 100 thousand people. This, in turn, leads to changing the

class of protective hydraulic structure, and also promising plans for civilian high-rise construction in the area near the North Bridge on the territories adjacent to the Tom River in the Zorkaltsevsky rural settlement of Tomsk district of Tomsk Oblast.

Numerical modeling of river hydraulics (flood zones, distribution of flow velocity field and estimated depths) during spring flooding for the main and verification water discharge of 0.1 % probability was carried out under the conditions of increasing the design levels of the existing dam around Eleonor settlement and construction of a new left bank dam from Chernaya Rechka village to Eleonor settlement.

Non-trivial hydraulic effects caused by a complex of factors, such as the existing urban and transportation infrastructure of the part of Tomsk left bank, and additional influence of the designed dam were obtained.

In the paper, these effects have been analyzed, the factors causing them have been identified, and it has been concluded that such subtle effects can only be detected by applying simulation modeling and are not accessible by standard methods used within engineering surveys.

Keywords: numerical modeling, computer modeling of flood zone, two-dimensional hydraulic model, simulation model, HEC-RAS modeling system.

Введение

Строительство в поймах рек жилых районов, помимо дискуссионности самого вопроса как такового, является достаточно сложной проблемой с технической точки зрения, однако, современные технологии строительства позволяют реализовать даже такие проекты. Но для того, чтобы технически правильно и обоснованно принять проектные решения по строительству зданий и сооружений, их инженерной защите, в условиях расположения в потенциальной зоне затопления, необходимо достаточно точно представлять себе то, с какими проблемами, с точки зрения инженерной гидрологии, придется столкнуться. Инженерно-гидрометеорологические изыскания, обычно выполняемые до начала выбора площадки и последующего проектирования и строительства, как правило, выполняют свою функцию, но бывают ситуации, когда стандартные методы, используемые при такого рода изысканиях, могут дать неверный ответ или не дать его вовсе.

В подобного рода ситуациях [1], на осложненных участках русел и пойм, прибегают к помощи численного моделирования речной гидравлики, которое учитывает более сложную физику движения жидкости, естественный и антропогенный рельеф.

В статье приведены примеры таких нетривиальных эффектов, которые получены при реализации двухмерного (2D) моделирования расчетной зоны затопления, скоростного поля потока и глубин на участке р. Томь в г. Томске. Благодаря своевременному выявлению неблагоприятных эффектов, при возможной реализации уже предложенных проектных решений, удалось не допустить их принятия и, впоследствии, предложить более адекватные ситуации решения.

Материалы и методы исследования

Численное моделирование речной гидравлики с момента выхода воды на пойму и до момента развития максимальной зоны затопления на участке р. Томь выполнялось при помощи моделирующей системы HEC-RAS версии 6.4.1 [2]. Представленная модель разрабатывалась для сценария прохождения максимального расхода воды 0.1 % (18100 м³/с) в ситуации существующей застройки левой поймы р. Томь, существующей дамбы поселка Элеонор (предполагаемой к подъему отметки до 80.50 м БС) и предложенного заказчиком проектного решения по защите всей левобережной части г. Томска дамбой от с. Черная Речка до п. Элеонор. Предполагалось, что

предложенный вариант противопаводковой дамбы полностью защитит левобережные территории от затопления.

Топографической основой модели стала цифровая модель рельефа (ЦМР), созданная на основе крупномасштабных топографических планов и русловых съемок.

Калибровка модели [3; 4] выполнялась путем принятия на стартовом этапе табличных коэффициентов шероховатости [5] с их последующей корректировкой до достижения максимального соответствия выходных данных модели с данными инструментальных измерений на заранее выбранных контрольных точках. Граничные условия заданы по расчетному расходу воды и измеренному уклону водной поверхности (0.0084 ‰), измеренному в период прохождения реального половодья 2023 года.

Результаты

По результатам моделирования влияния предложенного проекта левобережной дамбы на речную гидравлику р. Томь на расчетном участке было выявлено два нетривиальных эффекта, которые не ожидались проектировщиками. Ожидалось, что предложенная левобережная дамба надежно защитит от затопления территорию, планируемую к застройке и, в нижнем створе у п. Элеонор, в районе устья протоки Бурундук, русло р. Томь свободно пропустит расчетный расход. В качестве первого нетривиального эффекта (Рис. 1) выявлено, что русло р. Томь, ограниченное существующей и проектируемой дамбами, не способно в полной мере пропустить расчетный расход воды и паводковый поток в нижнем створе (правая или северная сторона Рис. 1) устремился через протоку Бурундук, обратным током по ее руслу, на пойму р. Томь, затопляя территорию, которую изначально требовалось защитить, встречаясь с потоком из верхнего створа (левая или южная сторона Рис. 1), движущимся в обход проектируемой левобережной дамбы. На верхней части рисунка показано начало выхода воды на пойму, на нижней – максимальная зона затопления.

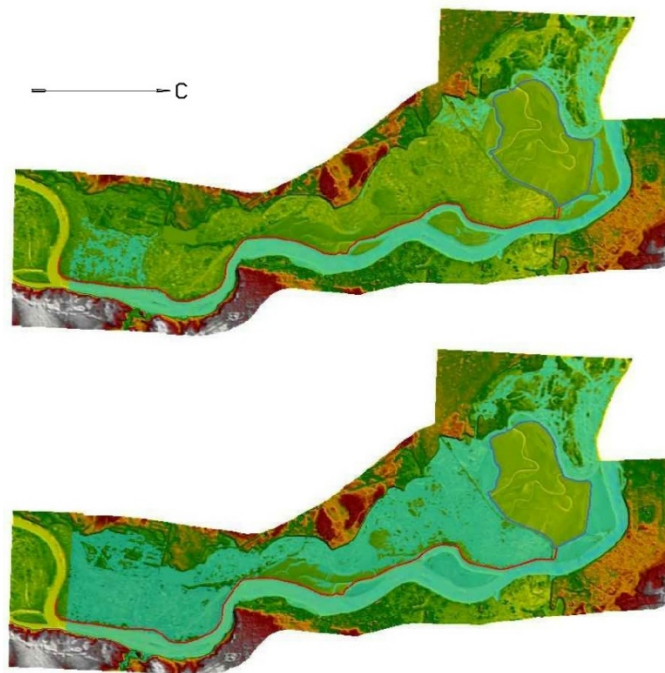


Рис. 1 Процесс выхода паводкового потока на пойму р. Томь на левом берегу г. Томска. Красным цветом обозначена – проектируемая дамба, синим – существующая.

В качестве второго нетривиального эффекта выявлено, что в результате сочетания воздействий существующей транспортной инфраструктуры, проектируемой и существующей дамбы у п. Элеонор в створе мостового перехода "Северный мост" возникла ситуация, когда максимальный уровень воды, при расчетном расходе, сформировался за пределами проектируемой левобережной дамбы, в то время как в русле он был значительно ниже. Скоростное поле вело себя следующим образом – наблюдались околонулевые скорости в пойменной части, где поток находился в подпоре от существующей автодороги, дамбы п. Элеонор и проектируемой левобережной дамбы, высокие скорости течения устанавливались в русле реки, где проходила основная часть расхода воды (Рис. 2).

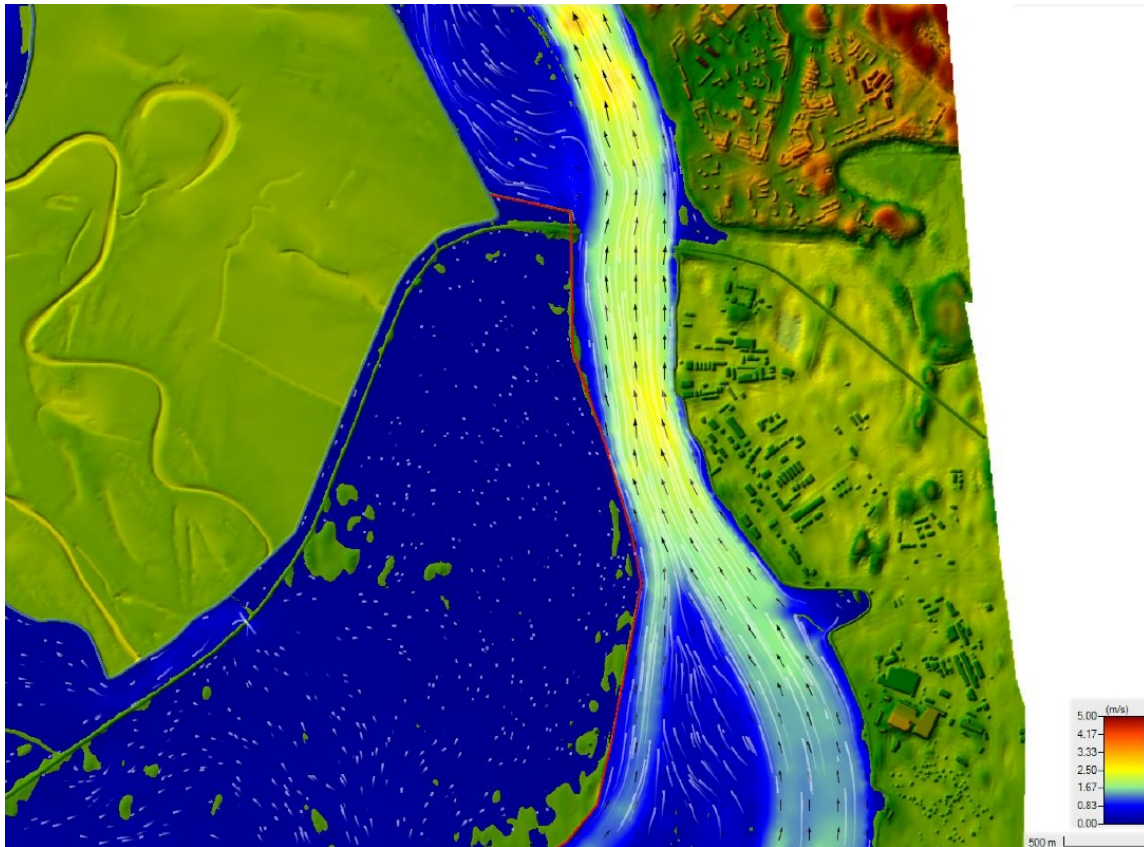


Рис. 2 Расчетная зона затопления и скоростное поле р. Томь на участке в створе Северного моста, красной линией показана ось проектируемой левобережной дамбы.

Данный эффект вызван тем, что совокупность существующей и проектируемой инфраструктуры в виде проектируемой левобережной дамбы и существующей автодороги образовали своего рода "ловушку" для прохождения пойменного расхода воды, образовался подпор с переливом через существующую автодорогу. Отсюда, превышение пойменного уровня воды над русловым, околонулевые скорости в зоне подпора и повышенные до значений 2.45 м/с скорости в русловой части потока.

На рисунке 3 показан поперечный профиль р. Томь в створе Северного моста, иллюстрирующий возникновение подпорного эффекта в результате воздействия комплекса существующей и проектируемой линейной инфраструктуры левобережной части г. Томска. Разница в уровне воды между руслом и поймой достигает 1.03 метра, что не типично для ситуации, когда пойма не перегружена инфраструктурными объектами.

На пойменную часть рек ложится значительная доля нагрузки по пропуску максимальных расходов воды в период половодья и паводков и, на некоторых реках, пойменные расходы воды превышают русловые, поэтому, при планировке городских территорий важно, чтобы обеспечивалась достаточная пропускная способность пойм. В рассмотренном случае, это условие не выполняется.

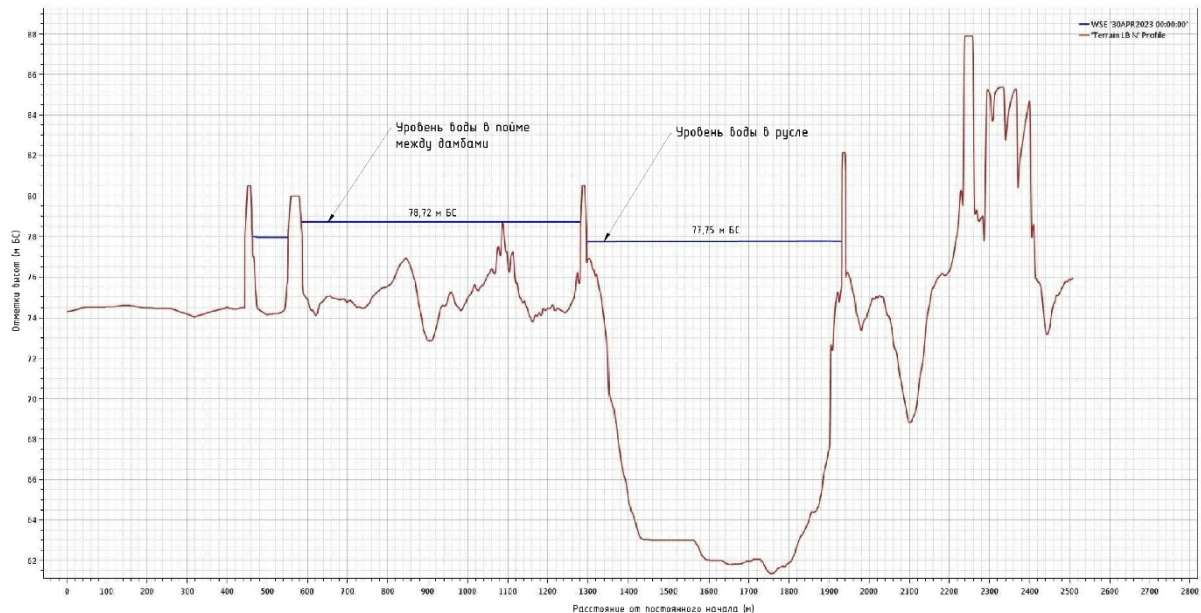


Рис. 3 Поперечный профиль р. Томь в створе Северного моста с иллюстрацией разницы уровней в русловой и пойменной части реки.

Обсуждение

Рассмотренные в настоящей статье эффекты были получены исключительно по результатам моделирования. При создании модели проводилась ее калибровка на основании натурных наблюдений за уровнями, уклоном и расходами воды. В силу того, что показанные эффекты выявляются в модели при обеспеченности 0.1 % и ниже, то свидетельств наблюдения этих эффектов на рассматриваемом участке р.Томь в натуре нет.

Выводы

На примере показанных нетривиальных эффектов, выявленных в результате численного моделирования речной гидравлики, очевидно, что данный метод расчета является необходимым инструментом для принятия обоснованных проектных решений при изысканиях на сложных участках рек, позволяет учесть все те риски, которые не удастся учесть при стандартном объеме работ в рамках инженерно-гидрометеорологических изысканий. В рассматриваемом случае, на основании моделирования, выданы рекомендации по изменению исходных проектных решений.

Благодарности

Автор выражает благодарность Валерию Алексеевичу Земцову, заведующему кафедрой гидрологии суши Национального Исследовательского Томского Государственного Университета, за методическую помощь и товарищескую поддержку при работе над проектом и написании данного доклада.

Acknowledgments

The author gratefully acknowledges Valerii Alekseevich Zemtsov, Head of the Department of Hydrology of National Research Tomsk State University for methodological assistance and friendly support during the process of working on the project and writing this report.

Список литературы

1. Влияние противопаводковых дамб в пойме на форму зоны затопления, поле скоростей и глубин потока на примере численной модели участка реки Кондома / Р.В.Романовский // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2020.- Т.331. - № 5.- С.166–180
2. US Army Corps of Engineers. HEC-RAS River analysis system // 2D Modeling user's manual. Version 5.0. – 2016. – 171 p.
3. Анализ чувствительности двумерной гидродинамической модели к изменению коэффициента шероховатости / А.А. Сазонов, И.Н. Крыленко // Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии. – 2018. – С.933-938.
4. Оценка чувствительности характеристик затопления к изменениям природных и антропогенных факторов на основе двумерной гидродинамической модели / И.Н. Крыленко, П.П. Головлев, Е.Д. Корнилова, А.А. Сазонов, Е.А. Фингерт // Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии. – 2018. – С.898-902.
5. Arcement G., Schneider V. Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains. U.S. Geological survey water supply paper 2339. – U.S.: Government printing office, 1989. – 38 p.
6. Levee effects upon flood levels: An empirical assessment / Heine R.A. // Hydrological Processes. – 2012. – V.26.- P.3225-3240.

Изменения крупнейших приледниковых озер Шпицбергена на рубеже XX и XXI вв.

К.В. Ромашова^{1*}, Р.А. Чернов²

¹ Научно-исследовательский институт Арктики и Антарктики, г. Санкт-Петербург

² Институт географии РАН, г. Москва
hydrology2@aari.ru

Аннотация. На основе материалов Норвежского полярного института в 2008-2012 гг. на архипелаге Шпицберген выявлено 35 крупных приледниковых озер площадью зеркала более 1 км². Их суммарная площадь составляет 127,5±0,6 км² или около трети всего озерного фонда архипелага. За 30 лет (1991-2022 гг.) увеличение площади крупных приледниковых озер на западе составило 30,2 км² или 113%, на востоке архипелага увеличение площади озер составило 13,7 км² или 22%. Суммарное изменение объемов некоторых озер составило порядка 1,2 км³.

Ключевые слова: приледниковые озера, подпрудные озера, площадь озер, ледяные берега, Шпицберген.

Changes in the major glacial lakes of Spitzbergen (Svalbard) at the turn of the XX and XXI centuries

K.V. Romashova^{1*}, R.A. Chernov²

¹ Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

² Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
hydrology2@aari.ru

Abstract. Based on the materials of the Norwegian Polar Institute in 2008-2012, 35 large periglacial lakes with a surface area of more than 1 km² were identified in Spitzbergen (Svalbard). Their total area is 127,5±0,6 km², or about a third of the entire lake fund of the archipelago. Over 30 years (1991-2022), the increase in the area of large periglacial lakes in the west was 30,2 km² or 113%, in the east of the archipelago the increase in the area of lakes was 13,7 km² or 22%. The total change in the volumes of some lakes was about 1.2 km³.

Keywords: periglacial lakes, dammed lakes, area of lakes, ice shores, Spitzbergen (Svalbard).

Введение

В последние десятилетия отмечено увеличение количества ледниковых озер в Гренландии, Исландии, в Скандинавии, их площадь за последние 30 лет увеличилась на 130-150% [1]. Такие изменения количества, площади и объема ледниковых озер в горных районах мира объясняются глобальным потеплением. Информация о состоянии ледниковых озер Шпицбергена и их изменениях до сих пор не учитывалась в глобальных оценках из-за отсутствия сведений.

Современное потепление климата Шпицбергена привело к сокращению его оледенения и расширению территорий, ранее занятых ледниками. Вместе с тем на этих территориях образовывались многочисленные озера. Их контакт с ледниками или мертвыми льдами непосредственно влияет на таяние льда [2], а потери ледников при таянии в озерах могут вносить заметный вклад в их баланс массы [3]. Мы рассматриваем

крупные приледниковые озера, так как они в значительной степени определяют потери льда на таяние при контакте с ледниками, а их пространственные изменения являются главным агентом масштабных изменений озер на архипелаге.

Оледенение архипелага Шпицберген покрывает около 60% площади его суши, 1668 ледников имеют площадь около 33700 км² [4, 5]. Наши оценки показывают, что количество озер на архипелаге существенно превышает количество ледников. Несмотря на климатические различия и масштабы сокращения оледенения в западных и восточных районах архипелага, крупные приледниковые озера встречаются повсеместно [6]. Тем не менее, обнаруживаются различия в динамике формирования крупных озер на западе и востоке архипелага. Целью исследования является процесс изменения крупных озер, так как их размеры определяют озерный ресурс территории. На примере отдельного водосбора было показано, что крупные озера содержат до 98% объема озерной воды и до 91% площади озер [7]. Поэтому масштабы их пространственных изменений являются определяющими для статистических оценок всей совокупности озер.

Материалы и методы исследования

Основу исследования составляют данные картографического сервиса Норвежского полярного института (НПИ), которые отображают состояние объектов в 2008-2012 году с пространственным разрешением 0,4 м/пикс. Определение высоты объектов (в том числе высоты уреза воды в озерах) сервис дает с точностью 1 м. НПИ предоставляет доступ к связанному с сервисом набору векторизованных данных, в том числе с оцифрованными контурами озер [8]. Нами использованы береговая линия озер в программе QGIS для определения суммарной площади озер различного генезиса в 2008-2012 гг. Сведения о приледниковых озерах архипелага приведены из материалов инвентаризации приледниковых озер Шпицбергена [6].

Для описания состояния крупных приледниковых озер в другие периоды использованы данные дистанционного зондирования архипелага Шпицберген. Для 2022 г. использованы спутниковые снимки Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м/пикс. Для периода 2000-2002 гг. использованы снимки Landsat 7 с пространственным разрешением 15 м/пикс (панхроматический канал), для периода 1990–1992 гг. – Landsat 5 с пространственным разрешением 30 м/пикс. Спутниковые изображения за все исследуемые периоды выбирались за июль-август, как наиболее теплые месяцы и имеющие наименьшее покрытие снежного покрова. Частота пролета спутников и облачность, закрывающая часть озер не позволили ограничиться изображениями одного года в периоды 1990–1992 гг. и 2000–2002 гг. Наиболее ранние оценки состояния крупных озер на архипелаге были получены на основе аэрофотоснимков НПИ 1936-1938 гг.

Результаты и выводы

Всего по состоянию на 2008-2012 гг. на архипелаге насчитывается около 3800 озер различного генезиса, размерами более 0,01 км². Их суммарная площадь составляет 395 км². По нашим оценкам суммарная площадь приледниковых озер равна 186 км² и составляет 47% всей площади озер архипелага. Их формирование в настоящее время происходит на территориях, освободившихся от ледников, большинство из них имеют ледяные берега. Нами фиксировано 35 крупных приледниковых озер, площадь которых свыше 1 км². В совокупности их общая площадь составляла 127,5 км². По-видимому, крупные приледниковые озера находятся в активной стадии формирования, так как основные изменения их площади происходят за счет разрушения ледяных берегов. По материалам аэрофотосъемки 2008-2012 гг. мы определили, что 33 из 35 крупных приледниковых озер имеют ледяные берега, их суммарная протяженность составляет 78,1 км.

Нами отмечался факт существования крупных приледниковых озер в 1936-1938 гг. Результаты сравнения выявили различия между западными и восточными территориями. Отмечено, что почти все крупные приледниковые озера, расположенные на западе архипелага, появились после 1936 года. На востоке большинство приледниковых озер существовали ранее 1936 года. Исключение составляет территория о. Эдж, где расположено несколько крупных приледниковых озер, как новых, так и старше 1936 года (Рис.).

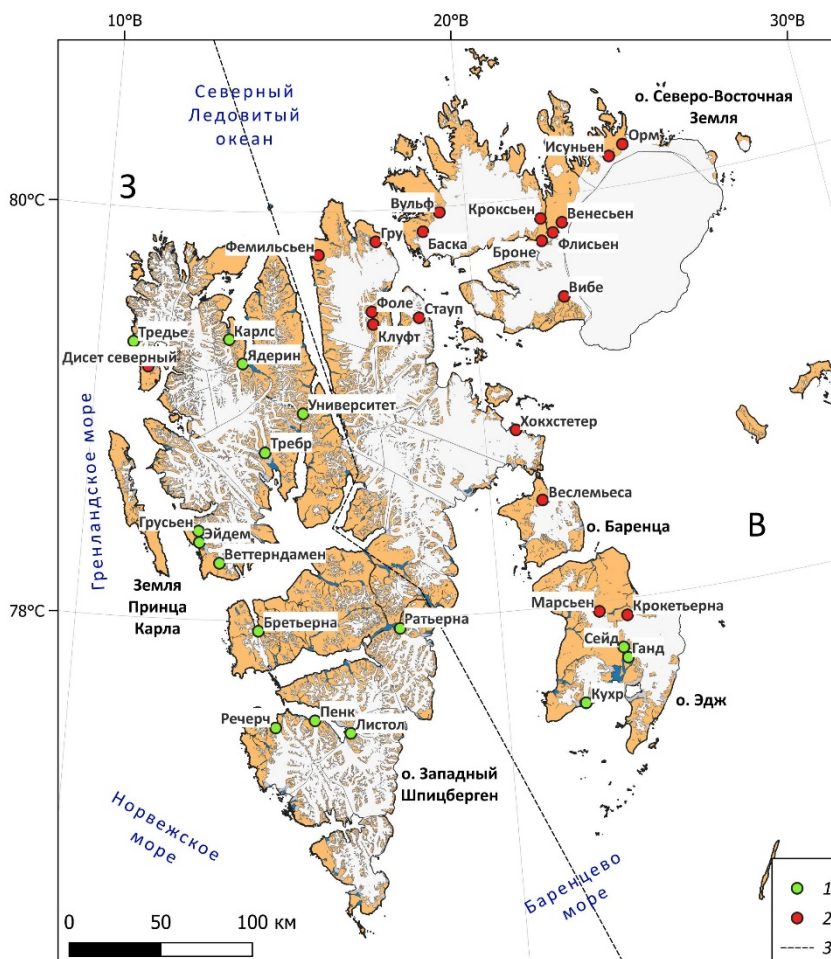


Рис. Карта-схема расположения крупных приледниковых озер архипелага Шпицберген. 1 – новые приледниковые озера (после 1936 г.), 2 – приледниковые озера, которые существовали до 1936 года, 3 – граница западной и восточной частей Шпицбергена [9].

Общая площадь крупных приледниковых озер составляет $127,5 \pm 0,6 \text{ км}^2$, их средняя площадь равна $3,64 \pm 0,02 \text{ км}^2$. Оценки погрешности площади озер, рассчитанные ГИС методами, оказались значительно меньше величины годовых изменений их площади, что позволяет оценить их временную динамику. Из 35 крупных приледниковых озер архипелага в его западной части расположено 14 озер. За исключением озера Дисет Северный, они образовались после 1936 года. Два озера не существовали ранее 1991 года. Приледниковые озера на западе архипелага обнаруживают значительную динамику изменений площади на рубеже XX и XXI вв. Мы сравнили пространственные изменения площади озер с 1991 по 2022 г. для трех периодов 1991-2002, 2002-2012 и 2012-2022 гг. (Табл.). Изменения площади озер запада чрезвычайно масштабны и для 8 объектов площадькратно увеличилась. Суммарно за 30

лет площадь озер в западной части архипелага выросла более чем в два раза на 113%. Преимущественно укрупнение озер происходило до 2012 года, а впоследствии их суммарная площадь даже несколько уменьшилась. Основной вклад дали самые большие по площади морено-подпрудные озера Требр, Ядерин, Эдем и Ваттердамен за счет разрушения фронтов ледников, спускающихся в озера. В период 2012-2022 гг. изменения были неоднозначные, 6 озер уменьшилось в размерах в большей степени, чем произошло укрупнение остальных озер. Сокращение площади озер произошло в связи с размывом подпруживающих морен.

Табл. Изменение площади крупных приледниковых озер архипелага Шпицберген с 1991 по 2022 гг.

Климатическая зона		Запад	Восток	Весь архипелаг
Площадь озер, км ²	1991-1992 гг.	21,87±2,3	63,12±6,64	84,90±8,94
	2000-2002 гг.	31,52±0,47	65,84±0,98	97,36±1,45
	2008-2012 гг.	53,74±0,10	73,72±0,18	127,5±0,6
	2022 г.	52,05±1,50	76,86±2,22	128,9±3,7
Изменение площади за период, км ²	1991-2002	9,65	2,72	12,37
	2002-2012	22,22	7,88	30,10
	2012-2022	-1,69	3,15	1,46
	1990-2022	30,18	13,74	43,92

На востоке архипелага насчитывается 21 крупное приледниковое озеро. За последние 30 лет изменения их площади оказались менее масштабны по сравнению с озерами, расположенными в западной части архипелага. Изменения их площади за весь период составили 13,7 км² или около 22%. Основное приращение площади, также как и на западе, произошло в период с 1991 по 2010 гг. Преимущественно это был вклад двух морено-подпрудных озер Ганд и Крокет на о. Эдж, которые, разрушая ледяные берега ледников, увеличили площадь своих акваторий.

В целом в обеих группах наблюдается увеличение площади озер в период с 1991-2002 гг. и 2002-2012 гг. Наибольшие изменения площади озер характерны для самых больших озер. Общее увеличение площади озер за 1991-2022 гг. составило 43,9 км² или 52%.

Процесс укрупнения озер, сформированных ранее 1936 года, идет крайне медленно, что, по-видимому, связано с суровостью климата на востоке и северо-востоке архипелага. Вероятно, пространственные изменения береговой линии озер на востоке также определены их ледовым режимом, так как в летний период озера лишь на 1-1,5 месяца освобождаются от ледяных полей.

На основе материалов сервиса НПИ в 2008-2012 гг. нами были обнаружены следы береговых террас у 6 крупных озер. Эти террасы имели равные высоты по периметру озера, что указывает на их формирование соответствующим уровнем воды в озере. Вероятно, существование этих террас не превышает несколько десятков лет, так как процессы разрушения склонов постепенно их стирают.

Морено-подпрудные озера Требр и Пенк понизили уровень в связи с размывом морены и образованием канала стока озера в речную долину. Ледниково-подпрудные озера Стауп и Фоул образовали маргинальные каналы стока вдоль края ледника. Озеро Клүфт, подпруженное ледником, не имеет постоянного стока и вероятно является прорывным. Возможно, это единственное озеро среди всех крупных озер архипелага, для которого свойственны масштабные спуски по внутренним каналам ледника.

Исходя из величины изменения отметки уреза воды и площади озера, нами были получены изменения объемов воды в озерах. Приблизительное изменение объема воды в озере вычислено как произведение его площади по состоянию на 2008-2012 гг. и величины падения уровня воды. Возможное расширение площади озера за счет берегового склона в данном случае не учитывалось. Тем не менее, потери объема в последние десятилетия оказались соизмеримы с общим объемом воды в приледниковых озерах и составили 1,2 км³. Ранее на основе инвентаризации приледниковых озер по нашим предварительным оценкам общий объем составил около 2 км³ [6].

Заключение

На основе картографического сервиса Норвежского Полярного института (НПИ) на Шпицбергене выявлено 35 крупных приледниковых озер (размером водного зеркала более 1 км²). Все они имеют ледяные берега, т.е. процесс их формирования продолжается. Их суммарная площадь составляет 127,6±0,3 км², что составляет треть площади всего озерного фонда архипелага. Материалы аэрофотосъемки НПИ показали, что крупные приледниковые озера на западе архипелага образованы при подпруживании конечной мореной ледников или самими ледниками.

Сравнение современного положения озер с историческими данными выявили, что на западе архипелага большинство крупных приледниковых озер образовалось на освобожденных от ледников территориях после 1936 года. Напротив, на востоке архипелага все крупные озера уже существовали до 1936 г. На западе архипелага процесс увеличения размеров озер идет активнее, чем на востоке. В период 1991-2012 гг. укрупнение озер шло интенсивно, но в следующем десятилетии процесс замедлился. За 30 лет увеличение площади крупных приледниковых озер на западе составило 30,2 км² или 113%, на востоке архипелага увеличение площади озер составило 13,7 км² или 22%.

На примере крупных приледниковых озер мы отмечаем общую тенденцию увеличения их площади за счет разрушения ледяных берегов. В ближайшем будущем вполне очевидно процесс формирования крупных озер будет продолжаться, так как большинство из них имеет протяженные ледяные берега. При этом динамика процесса зависит от условий подпруживания отдельных крупных объектов и событий прорывов озер.

Благодарности

Дистанционные исследование и анализ данных крупных приледниковых озер Шпицбергена выполнены при поддержке гранта РФФ № 23-27-00312 «Формирование приледниковых озёр архипелага Шпицберген в условиях изменения климата».

Acknowledgments

Remote survey and data analysis of the largest periglacial lakes of Svalbard was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 23-27-00312. "Formation of periglacial lakes of the Svalbard under the conditions of climate change".

Список литературы

1. Shugar D.H., Burr A., Haritashya U.K., Kargel J.S., Watson C.S., Kennedy M.C., Bevington A.R., Betts R.A., Harrison S., Strattman K. Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990 // *Nature Climate Change*. 2020. V. 10 (10). P. 939–945.
2. Chernos M., Koppes M. N., Moore R. D. Ablation from calving and surface melt at lake-terminating Bridge Glacier, British Columbia, 1984–2013 // *Cryosphere*. 2016. V.10. P. 87–102.
3. Zang G., Rounce D., Bolch T., Chen W. Underestimated mass loss from lake-terminating glaciers in the greater Himalaya // *Nature Geoscience*. 2023. V. 16(4). P. 1–6. DOI: 10.1038/s41561-023-01150-1

4. Hagen J. O., Liestol O., Roland E., Jørgensen T. Glacier atlas of Svalbard and Jan Mayen. Norwegian Polar Institute. 1993. Oslo.
5. Nuth C., Kohler J., König M., Deschwanden A., Hagen J. O., Kaab A., Moholdt G., Pettersson R.
6. Чернов Р.А., Ромашова К.В. Современное состояние приледниковых озер архипелага Шпицберген // Криосфера Земли. 2022. Т. 26. №1. С.36–45.
7. Ромашова К.В., Чернов Р.А. О формировании новых приледниковых озёр в бассейне залива Грэнфьорд (Шпицберген) в 1938–2010 гг. // Лёд и Снег. 2022. №62(2). С.193–202. <https://doi.org/10.31857/S2076673422020125>
8. Электронный ресурс: <https://toposvalbard.npolar.no/> (Картографические материалы Норвежского полярного института. Дата обращения 09.01.2023).
9. Hanssen-Bauer I.; Førland E.J.; Hisdal H.; Mayer S.; Sandø A.B., Sorteberg, A. (eds). Climate in Svalbard 2100 – a knowledge base for climate adaptation. Norway, Norwegian Centre of Climate Services (NCCS) for Norwegian Environment Agency (Miljødirektoratet). 2019. 208pp. (NCCS report 1/2019). DOI: <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-888>

Современное гидролого-экологическое состояние озер залива Гренфьорд

К.В. Ромашова*, И.И. Василевич, В.А. Брызгало, М.В. Третьяков

*Научно-исследовательский институт Арктики и Антарктики, г. Санкт-Петербург
hydrology2@aari.ru*

Аннотация. На основе материалов экспедиционных исследований научно-исследовательского института Арктики и Антарктики озер водосбора залива Гренфьорд: Бретьерна, Стемме и Конгресс за 2018-2022 гг. дана оценка их современного гидролого-гидрохимического состояния. Показана внутригодовая и межгодовая изменчивости компонентного состава озер, которые зависят в основном от вклада доминирующих источников питания. Изменчивость минерализации по акватории озер как поверхностная, так и по глубине малоразличима.

Ключевые слова: химический состав озера, полярные озера, Шпицберген, Арктика, мониторинг.

The modern hydro-ecological statement of Gronfjord bay lakes

K.V. Romashova*, I.I. Vasilevich, V.A. Bryzgalov, M.V. Tretyakov

*Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia
hydrology2@aari.ru*

Abstract. Based on Arctic and Antarctic Research Institute expedition research materials of the Gronfjord bay catchment lakes: Bretjorna, Stemme and Congress for 2018-2022, an assessment of their current hydrological and hydrochemical state is given. The intra-annual and inter-annual variability of the component composition of lakes is shown, which depend mainly on the contribution of the dominant food sources. The variability of mineralization in the water area of lakes, both on the surface and in depth, is indistinguishable.

Keywords: lake chemical composition, Arctic lakes, Spitzbergen (Svalbard), Arctic, monitoring.

Введение

На архипелаге Шпицберген общая площадь озер составляет около 400 км². Большинство имеет карстовое и термокарстовое происхождение и расположены в прибрежных районах за пределами современных морен. По современным оценкам около половины площади всего озерного фонда архипелага составляют приледниковые озера [1], формирование которых связано с деградацией ледников после Малого ледникового периода. Остальная часть относится к термокарстовым, наледниковым и лагунным озерам.

Химический состав озерных вод зависит от вклада питающих источников. Питание озер Шпицбергена главным образом ледниковое и снеговое, что определяет невысокую минерализацию воды и ее пригодность для питья. Минерализация снижается в весенне-летний период при поступлении талых вод и возрастает осенью и зимой в результате притока грунтовых вод.

Целью исследования является обобщение и анализ наблюдений за изменчивостью гидрохимических параметров водной среды озер водосбора залива Гренфьорд. Оценка их современного состояния.

Материалы и методы исследования

В работе используются материалы экспедиционных наблюдений научно-исследовательского института Арктики и Антарктики (ААНИИ) за гидрохимическим режимом озер, расположенных на водосборе залива Гренфьорд: Бретьерна, Конгресс и Стемме (Рис. 1).

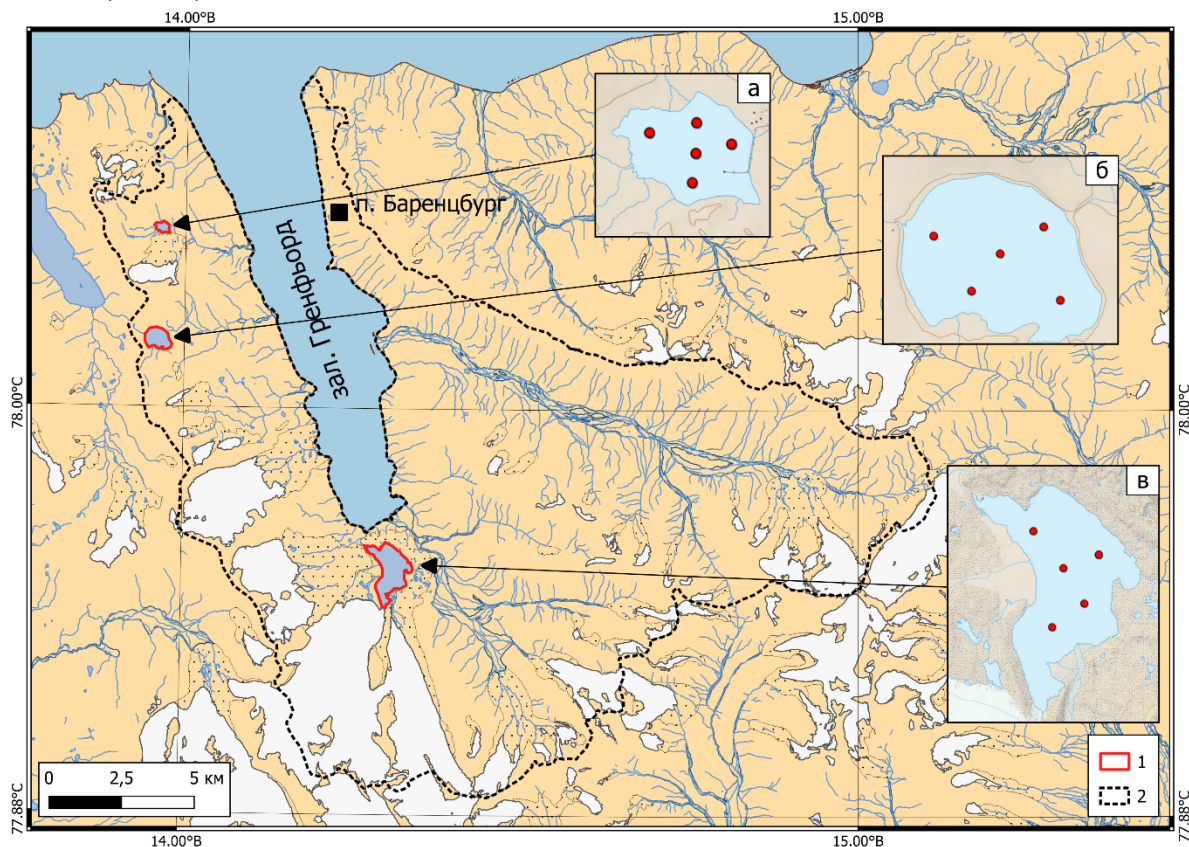


Рис. 1 Озера водосбора залива Гренфьорд. а – Стемме, б – Конгресс, в – Бретьерна. 1 – контур озера; 2 – граница водосбора залива Гренфьорд.

Исследуемые озера различны по морфометрическим характеристикам и типу питания. В Табл. 1 представлена краткая их характеристика.

Табл. 1 Краткая характеристика озер водосбора залива Гренфьорд.

Характеристика	Бретьерна	Конгресс	Стемме
Площадь водного зеркала, км ²	1 610 000	5 190	149 000
Длина, м	1930	976	600
Длина береговой линии, м	9 108	3 035	1 720
Максимальная глубина, м	28	50	13,9
Средняя глубина, м	13,8	-	4,6
Объем, м ³	22 350 000	-	683 500
Питание	Ледниковое/снеговое	Снеговое/грунтовое	Ледниковое/снеговое

Озеро Бретьерна имеет активное ледниковое питание в летне-осенний период водой, насыщенной наносами, смываемыми с моренного комплекса двух крупных ледников, потерявших около 50 % площади за период 1936-2017 гг. [2] и продолжающих деградацию в настоящее время. Оз. Стемме имеет ледниковое происхождение, однако, сток с близлежащего ледника Веринг в настоящее время в большей своей массе идет в обход озера и попадает сразу в р. Васстак, вытекающей из оз. Стемме. Питание озера происходит за счет таяния небольших снежников в северной части водосбора, талого снега в весенний период и дождевых осадков в летний период [3]. Водосбор озера Конгресс свободен от ледников. В работах [4, 5] отмечено наличие как подземных, так и поверхностных высокоминерализованных сероводородных источников.

Обобщение материалов гидролого-гидрохимических исследований выполнялось за период 2018-2022 гг. Ежегодно, за исключением 2020 года, в пяти точках каждого озера (рис. 1) производился пробоотбор озерной воды по глубине с дискретностью 10 метров для определения водородного показателя (рН), удельной электропроводности (УЭП) и содержания: общего углерода (ТС), неорганического углерода (IC), общего азота (TN), органического углерода (TOC), катионов (Na, NH₄, K, Mg, Ca) и анионов (F, Cl, Br, NO₂, NO₃, PO₄, SO₄, HCO₃), кремния общего Si (SiO₂).

Пробы отбирались при помощи батометра Паталаса дважды на сезон: весной со льда (апрель) и летом с помощью плавсредств после схода основной массы снежного покрова (июль-август). Определение показателей рН и УЭП выполнены с использованием стационарных рН-метра и кондуктометра Mettler Toledo в лабораторных условиях [6]. Химические анализы выполнялись по методикам [7-8].

Результаты и выводы

Результаты режимных наблюдений по пространственной и внутрисистемной изменчивости компонентного состава водной среды озер залива Гренфьорд позволили впервые оценить особенности формирования их гидрохимического режима.

Анализируя результаты проведенных экспедиционных наблюдений за 2018-2022 гг., можно заключить, что преобладающая роль в компонентном составе водной среды принадлежит в озере (Табл. 2):

- Конгресс при УЭП 510-1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ сульфатам > кальцию > гидрокарбонатам > магнию > хлоридам;
- Стемме при УЭП 105-190 $\mu\text{S}/\text{cm}$ гидрокарбонатам > сульфатам > кальцию > хлоридам;
- Бретьерна при УЭП 350-490 $\mu\text{S}/\text{cm}$ сульфатам/гидрокарбонатам > кальцию > магнию;

Согласно классификации О.А.Алекина водную среду можно отнести в озере:

- Конгресс к классу сульфатных, группы кальция второго типа;
- Стемме к классу гидрокарбонатных, группы кальция второго типа;
- Бретьерна к классу сульфатно-гидрокарбонатно-кальциево-магниевых.

Высокая минерализация озера Конгресс связана с отсутствием на водосборе озера ледников, распресняющих воды, и наличием подземных источников. Подобные результаты по определению химического состава вод озера Конгресс были получены ранее в работе [5].

Биогенные соединения в водной среде озер в основном представлены нитратами и соединением кремния, максимальные концентрации которых за исследуемый период достигали по:

- нитратам 1,50-2,07 мг/л в озерах Бретьерна и Стемме;
- соединениям кремния 0,91-1,15 мг/л в озерах Стемме и Конгресс.

Табл. 2 Межсистемная изменчивость компонентного состава водной среды озер 2018-2022 гг.

Ингредиент	Диапазон колебания концентраций / среднее значение, мг/л		
	Конгресс	Стемме	Бретьерна
Физико-химические показатели			
рН	6,61-7,98	6,53-7,79	6,10-7,36
УЭП, $\mu\text{S}/\text{cm}$	510-1100	105-190	350-490
Главные ионы			
Кальций Ca^{2+}	61,3-180 / 129	6,68-26,3 / 12,2	13,3-37,7 / 21,1
Магний Mg^{2+}	11,3-39,9 / 22,4	0,56-2,99 / 1,37	1,96-15,1 / 5,98
Натрий Na^+	1,78-9,94 / 3,72	1,26-5,69 / 2,76	1,96-7,48 / 3,75
Калий K^+	0,125-3,12 / 0,501	0,170-1,00 / 0,509	0,417-1,66 / 0,787
Сульфаты SO_4^{2-}	189-442 / 333	3,41-37,4 / 11,7	17,2-99,4 / 45,0
Хлориды Cl^-	3,55-15,6 / 6,04	2,55-8,66 / 4,11	1,47-11,5 / 3,99
Гидрокарбонаты HCO_3^-	31,7-83,3 / 61,2	20,8-48,1 / 30,6	9,73-56,1 / 41,6
Биогенные соединения			
Азот аммонийный	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Нитриты	< 0,05-0,551 / 0,271	< 0,05-0,189 / 0,125	< 0,5-0,310 / 0,152
Нитраты	< 0,079-0,592 / 0,344	0,063-2,07 / 0,619	< 0,079-1,50 / 0,354
Азот общий	0,042-0,816 / 0,106	0,055-0,435 / 0,175	0,050-0,751 / 0,155
Фосфаты	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Кремний	0,810-1,15 / 0,961	0,696-0,905 / 0,763	0,330-0,469 / 0,397
Углерод и микроэлементы			
Углерод общий	0,738-21,4 / 11,9	0,785-11,4 / 6,66	0,957-13,5 / 7,59
Углерод неорганический	0,133-15,8 / 9,87	0,120-8,39 / 4,97	0,133-10,4 / 6,18
Углерод органический	0,222-10,7 / 1,60	0,225-4,14 / 1,18	0,121-5,10 / 1,36
Фториды	< 0,01-0,311 / 0,216	< 0,01-0,033 / 0,019	0,028-0,104 / 0,050
Бромиды	< 0,08	< 0,08	< 0,08

Аммонийные, нитратные, фосфатные ионы и бромиды содержатся в концентрациях ниже предела обнаружения.

Некоторое повешение концентрации нитритов в водах оз. Стемме летом обусловлено активностью фитопланктона и связано со способностью водорослей (диатомовых и зеленых) восстанавливать нитраты до нитритов.

Основную долю углеродосодержащих соединений (4,44-15,8 мг/л) составляют неорганические углеродосодержащие вещества (3,95-15,8 мг/л), максимальная концентрация фторидов периодически достигала 0,25 мг/л в оз. Конгресс (Табл. 2).

Межгодовая изменчивость концентраций преобладающих веществ невысокая и зависит прежде всего от водности озер и особенностей их водосборов. Наиболее сильно это проявляется в межсезонном масштабе, когда летом с увеличением стока талых и дождевых вод в озера ощутимо снижаются концентрации главных ионов. Какие-либо значимые тенденции межгодовой изменчивости отсутствуют.

Внутригодовая изменчивость тесно связана с преобладающим источником питания озера. На Рис. 2 видно уменьшение концентраций доминирующих веществ во всех трех исследуемых озерах в летний период.

Изменения концентраций по вертикали озер малоразличимы и носят хаотичный характер.

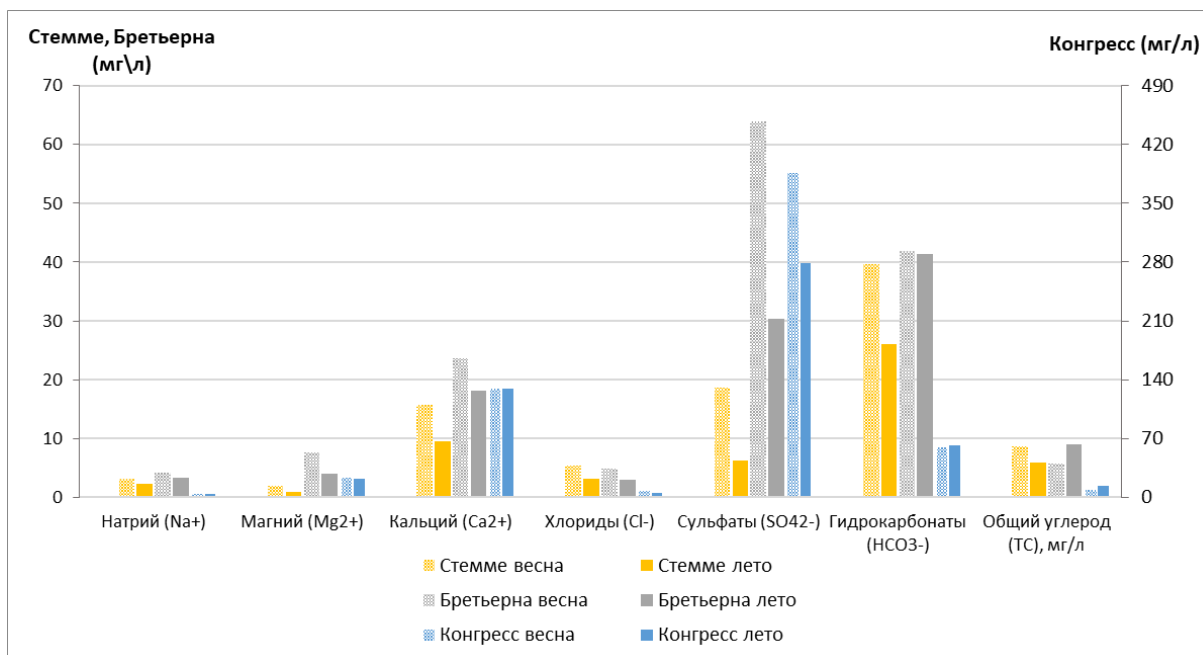


Рис. 2 Усредненные концентрации доминирующих веществ весенних и летних отборов проб воды озер водосбора залива Гренфьорд (2018-2022 гг.).

Выводы

Очевидно прослеживается изменчивость компонентного состава водной среды всех трех озер залива Гренфьорд, связанная с различиями их водосборных бассейнов и источников питания.

Межгодовая изменчивость незначительна. Наибольший интерес вызывают весенние показатели, так как условия отбора проб в это время носят однотипный характер в отличие от летних исследований. Время проведения работ в летний период колеблется в зависимости от сроков вскрытия озер и погодных условий – июль-август. Отбор проб мог производиться в период неполного схода снежного покрова, также значительное влияние на гидрохимический состав вод озер могли оказывать выпадавшие в период проведения работ или за несколько суток до них дождевые осадки.

Внутригодовая изменчивость концентраций определяемых веществ проявляется в их разбавлении талыми и дождевыми водами в период максимальной водности исследуемых озер. На период отбора проб, производимого в июле-августе, воды озер перемешаны по вертикали, изменчивость концентраций с глубиной отсутствует.

Анализ полученной информации по пространственной зональности компонентного состава водной среды исследуемых озер по доминирующим соединениям показывает отсутствие существенных изменений концентраций исследуемых показателей по акватории озер.

Список литературы

1. Ромашова К.В., Чернов Р.А. Методика инвентаризации приледниковых озер архипелага Шпицберген // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. 69(2). С. 157-170. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-157-170>

2. Пресноводные ресурсы Западного Шпицбергена в современных условиях (многолетние исследования ААНИИ): монография / М.В. Третьяков, В.А. Брызгалов, Е.В. Румянцева, К.В. Ромашова. СПб: ГНЦ РФ ААНИИ. 2021. 200 с. ISBN 978–5–98364–105–

3. Чернов Р.А., Муравьев А.Я. Современные изменения площади ледников западной части Земли Норденшельда (архипелаг Шпицберген) // Лёд и Снег. 2018. 58(4). С. 462-472. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-4-462-472>
4. Guilizzoni, P., Marchetto, A., Lami, A., Brauer, A., Vigliotti, L., Musazzi, S., Langone, L., Manca, M., Lucchini, F., Calanchi, N., Dinelli, E., Mordenti, A. Records of environmental and climatic changes during the late Holocene from Svalbard: palaeolimnology of Kongressvatnet. // J. Paleolimnol. 2006. 36. P. 325–351. <https://doi.org/10.1007/s10933-006-9002-0>.
5. Vaillencourt D. et al. Alkenone-based decadal scale temperature reconstruction of the late Holocene from Kongressvatnet, Svalbard // AGU Fall Meeting Abstracts. 2009. T. 2009. C. PP41C-1533.
6. РД 52.24.495-2005 «Водородный показатель и удельная электрическая проводимость вод. Методика выполнения измерений электротермическим методом».
7. М-02-1805-09 «Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов в пробах природной, питьевой и сточной воды методом ионной хроматографии».
8. М-02-2405-13 «Методика измерений массовой концентрации общего углерода, общего неорганического, нелетучего (не удаляемого продувкой), органического углерода и общего азота в питьевых, природных (в том числе подземных), сточных и технологических водах с помощью анализатора ТОС (Shimadzu).

Статус и границы устьевых областей арктических рек

Е.В. Румянцева*, О.В. Муждаба, М.В. Третьяков

*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург
elenaruma@mail.ru*

Аннотация. Актуальность определения статуса поверхностных водных объектов в устьевых областях рек, впадающих в моря, определяется современными задачами водопользования, в том числе установления и обоснования границ между морскими и речными водами. Соответственно географические знания об особенностях устьев рек приобретают и юридическое значение. Проанализированы нормативные и законодательные документы в части водных объектов, относящихся к переходной зоне «река-море». В законодательных актах водные объекты устьевых областей рек трактуются как отдельные водоемы, водотоки и части моря, а не как целостные системы районов трансформации речных пресных и морских соленых вод. В различных организациях возникают вопросы о статусе и местоположении границ водных объектов в устьевых областях рек, особенно тех, которые расположены на населенных территориях и местах активной хозяйственной деятельности Арктической зоны. Даны предложения по корректировке законодательных и нормативных документов в части устьевых областей рек как самостоятельных водных объектов и уточнению их районирования.

Ключевые слова: устье, река, море, эстуарий, районирование, Арктика.

Status and boundaries of the Arctic rivers estuarine area

E.V. Rumiantseva*, O.V. Muzhdaba, M.V. Tretiakov

*Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia
elenaruma@mail.ru*

Abstract. The significance of determining the status of surface water bodies, specifically concerning river estuarine areas that flow into seas, is based on the current tasks of water use, including the definition and justification of boundaries between sea and river waters. Accordingly, geographical knowledge about the features of estuaries also becomes of legal importance. Regulatory and legislative acts concerning water bodies belonging to the transition zone "river-sea" have been analyzed. Legislative acts consider water bodies of estuaries as separate water bodies and parts of the sea, but not as integral systems of transformation of river fresh and sea salt waters. In different organizations, questions arise about the status and boundaries of water bodies in river estuarine area, especially those located in populated territories and places of active economic activity in the Arctic. The proposals for clarification of legislative and regulatory acts regarding estuarine areas as independent water bodies and clarification of their zoning have been also formulated.

Keywords: mouth, river, sea, estuary, zoning, Arctic.

Вопросы определения статуса (вида) поверхностного водного объекта применительно к устьевым областям рек, впадающих в моря, установления границы между морскими и речными водами и соответствующей им береговой линии становятся особенно актуальными при определении водоохранных зон и прибрежной защитной полосы моря, выдачи лицензий на пользование недрами на суше или шельфе территориальных морей, для задач хозяйственно-бытового и рыбохозяйственного водопользования. Соответственно географические критерии и показатели на стыке гидрологии и океанологии приобретают и юридическое значение.

Отметим, что хозяйственная деятельность в устьевых областях рек зачастую гораздо более интенсивная, чем на их водосборах, и тем более чем в открытом море. Устьевые области рек являются местами схождения морских и речных водных путей, для Арктики характерно, что на их водосборах, побережьях и акваториях располагаются крупные месторождения полезных ископаемых, и, соответственно, предприятия по их добыче и переработке, что приводит к интенсивному использованию водных ресурсов. Одновременная поддержка традиционных видов хозяйствования коренных малочисленных народов Севера и Сибири делает еще более актуальным необходимость сохранения и защиты уникальных водных объектов с их водными и биологическими ресурсами и обеспечения экологической и гидрометеорологической безопасности, а также учет сложных устьевых процессов при решении задач управления водными ресурсами [12; 13].

Значительный вклад в изучение устьевых областей крупных сибирских рек внесли ученые ААНИИ. Именно экспедиции Арктического института в 30-х годах XX века положили начало регулярным наблюдениям на замыкающих створах Енисея, Пясины, Хатанги, Анабара, Оленька, Лены, Яны, Индигирки и Колымы, были определены границы влияния морских процессов на речной режим. Позже устьевые экспедиции ААНИИ, ГОИН, МГУ, ДВНИИГМИ исследовали гидрологические и гидроморфологические особенности устьевых участков рек, пределы распространения речных вод в моря, что позволило провести районирование многих устьевых областей.

Анализ нормативных и законодательных актов, затрагивающих понятия устьевых областей рек, выявил некоторые проблемы и дал возможность предложить пути их решения.

По отношению к водным объектам в районе впадения реки в море применяется множество наименований и терминов, показывающих сложность и многозначность этих объектов. Например, устье реки, дельта, эстуарий, устьевой участок, устьевое взморье, низовье, морское устье, залив, губа, лиман, лагуна. К настоящему времени из существующих определений наиболее проработанной в научном плане можно считать терминологию, предложенную Михайловым В.Н. и Гориным С.Л.

Устьевая область реки – особый географический объект, охватывающий район впадения реки в море, сформировавшийся, существующий и развивающийся благодаря устьевым процессам: динамическому взаимодействию, смешению и внутримассовой трансформации водных масс реки и приемного водоема, отложению и переотложению речных и морских наносов. Устьевая область реки – это гидрологический, морфологический, седиментологический, геохимический и биологический барьер между рекой и морем. Устьевая область реки может включать в себя до четырех частей: устьевой участок реки, эстуарий, дельту, а также устьевое взморье, в пределах которого существенно влияние речного стока [6].

Однако в современных законодательных и нормативных документах термин «устьевая область реки» рассматривается неоднозначно или полностью игнорируется. В ранее действовавшем ГОСТ 17.1.1.02–77 «Классификация водных объектов» [2] отмечено, что устьевая область реки, впадающей в море, классифицируется как

самостоятельный водный объект. Современный ГОСТ Р 59054–2020 «Классификация водных объектов» [4] упускает это примечание, таким образом теперь система устьевой области реки трактуется не как целостный природный объект, а распадается на отдельные составные части и рассматривается как водоемы и водотоки внутри нее. Согласно РД 52.08.21–84 «Учет вод замкнутых и полузамкнутых морей и морских устьев рек» [10] устьевые области рек являются особыми географическими объектами, формирующимися в переходной между рекой и морем зоне, в пределах устьевой области реки речной режим постоянно сменяется морским режимом. При этом происходит сложное взаимодействие и смешение вод с различными физико-химическими свойствами – речных пресных и морских соленых. Кроме того, недействующий ГОСТ 18457–73 «Океанология. Устьевые области рек, впадающих в море» [3] представляет перечень терминов и определений, позволяющих характеризовать устьевые области и их составные части.

В Водном кодексе РФ [1] устьевые области рек, впадающие в моря (заливы, губы, заливы, лиманы), не выделены в самостоятельный тип, а поверхностные водные объекты устьевых областей рассматриваются в категориях водотоков, водоемов и частей моря. При этом в Государственном водном реестре во многих случаях речные и морские границы установлены достаточно спорно, основаны на формальном подходе, зачастую не аргументированы и не прошли экспертизу в научном сообществе. Именно это является причиной многочисленных расхождений в толковании и правоприменении законодательных норм между ведомствами, хозяйствующими субъектами, водопользователями. Значительные трудности возникают при определении водоохранных зон водных объектов в устьевых областях рек, поскольку их границы не определены в Водном кодексе, а ширина водоохранных зон реки и моря может отличаться более чем вдвое [1].

В устьевых областях больших рек, впадающих в арктические моря, благодаря определяющему влиянию пресного речного стока, переходные зоны «река-море» и их морские границы смещены в сторону моря на сотни километров, захватывая акватории внутренних морских вод, а в некоторых случаях и территориального моря [5]. Это не учтено не только в Водном кодексе, но и в Федеральном законе о внутренних морских водах [14]. Указанный пробел в законодательстве приводит к тому, что различные ведомства определяют границу между рекой и морем по собственному усмотрению обычно выгодную с финансовой или управленческой точки зрения. Впоследствии это приводит к нарушению природоохранного законодательства в части уникальных и самостоятельных поверхностных водных объектов – устьевых областей рек, при применении к ним подходов и принципов лицензирования добычи углеводородов, принятых для шельфа. Поэтому необходимо законодательно разграничить внутренние речные воды и внутренние морские воды по всей береговой линии Российской Арктики.

В различных организациях возникают вопросы о статусе и местоположении границ водных объектов в устьевых областях рек, особенно тех, которые расположены на населенных территориях и местах активной хозяйственной деятельности Арктической зоны.

Приведем пример определения границы устья Оби разными ведомствами. В справочнике Гидрологической изученности [11], используемом в Водном кадастре Росгидромета, за устье реки Оби по левому берегу принято место впадения в Обскую губу у мыса Ям-Сале и линия устьевого створа подходит к мысу Жертв. Согласно водохозяйственному районированию Росводресурсов опорная точка № 518 «Река Обь в месте впадения в Обскую губу Карского моря» ложится в протоку Надымская Обь, при этом другие географические ориентиры в описании отсутствуют [7]. Граница устья Оби, используемая в Росрыболовстве [8], определяется по линии м. Ям-Сале – м. Сандиба, как

граница между внутренними речными водами и внутренними морскими водами, т.е. в устье Оби входит и устье реки Надым. Также следует упомянуть, что в Перечне внутренних водных путей РФ Росморречфлота [9], применяемом в судоходстве, верхняя граница Обской губы отмечена у входного буя Надымского бара. Таким образом, четыре ведомства определяют местоположение устья Оби по-разному.

Также ставится вопрос об определении статуса Надымской Оби как водного объекта и отнесении его к реке или морю для уточнения границы береговой линии и дальнейшего определения ширины водоохранной зоны. В соответствии с Гидрологической изученностью [11] Надымская Обь принята за главное (основное) русло реки Оби. Отметим, что Надымская Обь и Хаманельская Обь – это главные водотоки дельты Оби, их следовало бы классифицировать как дельтовые рукава реки Оби. Однако в научной и справочной литературе и особенно в лоциях для Хаманельской Оби и Надымской губы имеет место устоявшееся историческое название – протока.

Для устьевых областей рек, впадающих в Чукотское и Берингово моря типичной составляющей является лиман или лагуна – части устьевого взморья, отделенные от моря косой или зоной мелководья и представляющие собой слабопроточные водоемы с пресной или осолоненной водой. Нередко на географических картах такие водные объекты именуется озерами. Но в Водном кодексе [1] лиманы отнесены к морю, и следовательно, к ним должны применяться правила водопользования как к морским водам, а не речным, например, при выдаче разрешений на рыболовство.

В субъектах Арктической зоны РФ, в местах впадения рек в моря, стоят задачи определения и обоснования местоположения границ устьев. Например, в Архангельской области для корректного определения границ Мезенского округа ставятся задачи определения границы устьев рек Кулой и Мезень, впадающих в Мезенскую губу Белого моря. В Мурманской области возникают вопросы при определении устьевых границ рек Туломы и Колы, впадающих в Кольский залив, и устьевых областей малых рек Кольского полуострова (рек Западная Лица и Ура) и применению к ним норм морского или водного права. Для установления береговой линии, водоохранной зоны и прибрежной защитной полосы моря Лаптевых важны вопросы определения границ устьевых областей рек Хатанга, Анабар, Оленек, Лена, Яна.

По сути подобные задачи требуют однозначного ответа на вопрос – где заканчивается река и начинается море. Сложность происходящих в устьевых областях рек гидрологических процессов не предполагает простого ответа на этот вопрос. Видимо поэтому в законах он просто замалчивается. Вариантом выхода из сложившейся ситуации может быть выделение устьевой области реки с ее границами и определение устьевой области как самостоятельного и особого водного объекта со своими правилами регулирования.

Таким образом вопросы определения статуса и границ устьевых областей рек в законодательных и нормативных документах актуальны и стоят достаточно остро. Обязательно совершенствование законодательной базы в части определения статуса водных объектов и границ в устьевых областях рек. Например, необходимы корректировки в Водный кодекс по включению устьевых областей рек в перечень водных объектов и установлению их границ, а также актуальны изменения в определении водоохранных зон и прибрежных защитных полос водных объектов. Кроме того, предлагается разработка отдельного нормативного документа, например, ГОСТ по определениям и районированию устьевых областей рек.

Вопрос выделения устьевых областей в самостоятельный особый водный объект должен решаться при участии Росгидромета, в научных коллективах которого накоплен обширный материал по особенностям гидрологических процессов в устьевых областях. В связи с антропогенным воздействием и климатическими изменениями для уточнения

гидрологических характеристик устьевых областей Арктики, а также изучения слабоизученных устьевых областей рек необходима организация комплексных арктических устьевых гидрологических экспедиций.

Список литературы

1. Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 № 74-ФЗ (в ред. от 28.04.2023).
2. ГОСТ 17.1.1.02–77. Охрана природы. Гидросфера. Классификация водных объектов. М., 1977. 13 с.
3. ГОСТ 18457–73. Океанология. Устьевые области рек, впадающих в море. Термины и определения. М., 1973. 7 с.
4. ГОСТ Р 59054–2020. Охрана окружающей среды. Поверхностные и подземные воды. Классификация водных объектов. М.: Стандартинформ, 2020. 20 с.
5. Иванов В.В., Третьяков М.В. Состояние и проблемы совершенствования государственного мониторинга устьевых областей рек Арктической зоны Российской Федерации // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2017. № 1 (94). С. 26–30.
6. Михайлов В.Н., Горин С.Л. Новые определения, районирование и типизация устьевых областей рек и их частей – эстуариев // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 3. С. 243–257.
7. Приказ МПР РФ от 11.10.2007 № 265 «Об утверждении границ бассейновых округов».
8. Распоряжение Правительства РФ от 15.03.2010 № 327-р «Об определении зон ответственности ФСБ РФ и Росрыболовства по осуществлению полномочий в области охраны водных биологических ресурсов и государственного контроля в этой сфере в районах добычи (вылова) водных биологических ресурсов, в отношении которых границы внутренних вод РФ и внутренних морских вод РФ не определены».
9. Распоряжение Правительства РФ от 19.12.2002 № 1800-р «Об утверждении перечня внутренних водных путей Российской Федерации» (в ред. от 10.06.2023).
10. РД 52.08.21–84. Руководящий нормативный документ. Охрана природы. Гидросфера. Методические указания. Правила ведения учета поверхностных вод. Учет вод замкнутых и полужамкнутых морей и морских устьев рек. Л., 1984. 15 с.
11. Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Том 15. Алтай и Западная Сибирь. Выпуск 3. Нижний Иртыш и Нижняя Обь. Л.: Гидрометеоздат, 1964. 432 с.
12. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 26.10.2020 № 645.
13. Федеральный закон РФ от 19.07.1998 г. № 113-ФЗ «О гидрометеорологической службе» (в ред. от 11.06.2021).
14. Федеральный закон РФ от 31.07.1998 № 155-ФЗ «О внутренних морских водах, территориальном море и прилежащей зоне Российской Федерации» (в ред. от 05.12.2022).

Динамика подземного стока рек бассейна Северной Двины

А.А. Сазонов^{1,2*}, В.Ю. Григорьев^{1,2}, О.М. Пахомова¹, Н.Л. Фролова¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

²Институт водных проблем РАН, г. Москва

sazonov.lesha@gmail.com

Аннотация. Работа посвящена изучению динамики подземного стока рек бассейна Северной Двины – бассейна, находящегося в условиях избыточного увлажнения, с относительно ненарушенными условиями формирования речного стока. На основе статистического анализа временных рядов минимального месячного стока за зимний и летний периоды и результатов автоматизированного расчленения гидрографа методом GrWat, являющегося аналогом расчленения гидрографа по методу Б.И. Куделина в автоматическом режиме получены представления о современной динамике подземного стока рек бассейна Северной Двины. Выявлены основные факторы формирования минимального месячного зимнего и летне-осеннего стока. Среди них температура воздуха и осадки за различные месяцы, отражающие особенности формирования подземного стока в разные периоды года.

Ключевые слова: Северная Двина, минимальный сток, GrWat, изменение климата.

Dynamics of groundwater flow in the rivers of the Northern Dvina basin

A.A. Sazonov^{1,2*}, V.Yu. Grigoriev^{1,2}, O.M. Pakhomova¹, N.L. Frolova¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences

sazonov.lesha@gmail.com

Abstract. This work is devoted to the study of groundwater flow dynamics in the Northern Dvina basin, a basin with relatively undisturbed conditions of river runoff formation under conditions of excessive moisture. On the basis of statistical analysis of time series of minimum monthly runoff for winter and summer periods and the results of automated dissection of the hydrograph by the GrWat method, which is an analog of the hydrograph dissection by the method of B.I.Kudelin in automatic mode, we obtained ideas about the current dynamics of groundwater flow in the rivers of the Northern Dvina basin. The main factors of formation of the minimum monthly winter and summer-autumn runoff were revealed. Among them are air temperature and precipitation for different months, reflecting the peculiarities of groundwater flow formation in different periods of the year.

Keywords: Northern Dvina, minimal runoff, GrWat, climate change.

Введение

Изучение речного стока и его динамики невозможно без детального анализа одной из его важнейших составляющих – подземной. Актуальность изучения взаимосвязи поверхностных и подземных вод увеличивается в связи с наблюдающимися климатическими изменениями, по-разному проявляющимися в различных регионах нашей страны. Сложность мониторинга подземных вод приводит к необходимости поиска косвенных характеристик на

основе данных о речном стоке для оценки изменчивости подземной составляющей. В работе проведено сравнение величины подземного стока, полученного с помощью расчленения гидрографа методом Б.И. Куделина на основе алгоритма GrWat [1] и значениями среднего межennaleго (зимнего и летнего) и минимального зимнего и летне-осеннего стока.

Лучшее соответствие характерно для средних рек для межennaleго и минимального зимнего стока, коэффициенты корреляции равны 0,8-0,82. Для всего бассейна Северной Двины эти значения соответственно уменьшаются до 0,67 и 0,66. Плохая связь с минимальными месячными расходами за летне-осеннюю межень может быть объяснена за счет повышенной доли дождевого питания.

Целью данной работы является изучение динамики подземного стока рек бассейна Северной Двины – бассейна, находящегося в условиях избыточного увлажнения, с относительно ненарушенными условиями формирования речного стока. Для достижения цели был поставлен ряд задач: 1) генетическое расчленение гидрографов стока для выделения подземной составляющей; 2) анализ различных характеристик минимального и межennaleго стока; 2) статистический анализ временных рядов; 3) оценка влияния климатических факторов на подземный сток путем построения регрессионных зависимостей для различных периодов времени.

Материалы и методы исследования

Для удобства анализа результатов помимо всего бассейна реки Северная Двина были рассмотрены его составные части – бассейны 15 основных притоков реки Северная Двина. Данные притоки включают в себя как малые реки, с площадью водосбора до 2 тыс. км² (р. Иосер), так и средние реки, площадь водосбора которых приближается к 50 тыс. км² (рр. Пинега, Вага и Сухона).

Всего для дальнейшего анализа было выбрано 22 гидрологических поста, расположенных в пределах бассейна р. Северная Двина. Архивные ряды наблюдений за минимальными расходами были продлены до 2020 г. с помощью портала АИС ГМВО. Основное требование при выборе данных станций наблюдений – минимальное количество пропусков и продолжительный период наблюдений.

Помимо гидрологической информации была собрана метеорологическая информация, включающая в себя данные о сумме осадков за день и за месяц, температуру воздуха. Используемые в данной работе данные были получены с помощью портала Мирового центра данных (ВНИИГМИ МЦД). Для определения даты нарушения стационарности рядов нами был использован целый ряд подходов: непараметрический Pettitt's test [2], широко используемый для решения этой задачи в гидрологических исследованиях и основанный на сравнении рангов членов ряда до и после некоторого года. Оценка года перелома основывалась в том числе и на анализе временных графиков - суммарных (интегральных) кривых связи от времени или разностно-интегральных кривых (РИК). Для бассейна р. Северная Двина в качестве переломного года был выбран 1978 г., однако дата перелома варьирует в пределах 5-6 лет. Это говорит о том, что при наблюдающейся в целом синхронности многолетних колебаний имеет место определенный разброс дат, связанный как с особенностями самих водосборов, так и с не полной синхронностью климатических изменений. В соответствии с выбранным годом перелома, был проведен анализ однородности рядов по величине среднего (m) и среднеквадратического отклонения (σ). Для проверки однородности по среднему использовался параметрический t -критерий Стьюдента и непараметрический U -критерий Манна-Уитни. При этом t -критерий предполагает сравнение средних, а U -критерий сумм рангов. Для оценки однородности рядов по величине σ был рассмотрен F -критерий Фишера, наиболее широко используемый в отечественной гидрологии. Оценка значимости тренда за

1946–2019 гг. производилась с помощью непараметрического теста Манна-Кендалла [3], а расчет параметров линейной регрессии - с помощью метода наименьших квадратов.

Комплексный анализ основных характеристик годового, сезонного и экстремального стока проводился на основе автоматизированного алгоритма расчленения гидрографа – GrWat, являющегося аналогом расчленения гидрографа по методу Б.И. Куделина в автоматическом режиме [1]. Данная программа позволяет на основе значений суточных расходов воды, температуры воздуха и осадков проводить графоаналитическое расчленение гидрографа.

Визуализация полученных результатов была выполнена с помощью языка Python и программного комплекса ArcGis.

Результаты и выводы

Увеличение среднего межлетнего стока (за XI-III, VII-X), в значительной степени отражающего динамику подземного стока, по сравнению с базовым периодом (1946-1977 гг.) характерно практически для всех анализируемых створов и составляет в среднем 13%, а для некоторых водосборов эта величина равна 20% (рр. Сухона, Юг, Кодима), 33 (р. Пушма) и 44% (р. Луза). Изменение дисперсии носит разнонаправленный характер.

Минимальный месячный зимний сток в среднем увеличился для рек бассейна Северной Двины на 21% и только для 4 постов изменения статистически не значимы. Изменения минимального месячного зимнего стока по сравнению с базовым периодом (1946-1977 гг.) достигают 35-45% и более для верховьев Северной Двины (бассейн Сухоны и Юга), оставаясь весьма существенными и для остальной части бассейна. Исключение составляет р. Вымь, где эта тенденция не проявилась совсем. В распределении изменения минимального зимнего стока прослеживается пространственная закономерность: весь бассейн можно разделить на три области: юго-западную часть, где изменения наиболее значительны, юго-восточную и северную часть бассейна, где увеличение стока в основном не превышает 20%.

В область значительного изменения стока попали такие реки, как Сухона, Вага, верховье реки Юг, на них увеличение минимального зимнего стока достигает до 42%. Тест Манна-Кендалла показывает значимость возрастающих трендов зимних расходов воды практически на всех реках, а сам рост составляет в среднем до 4%, а для отдельных рек 5-10%.

Увеличение минимального летне-осеннего стока рек бассейна Северной Двины выражено не столь ярко. Только для 8% постов возрастание стока статистически значимо (при уровне значимости 5%) и составляет в среднем около 12%. Наибольшие изменения характерны для рек Луза (29%), Кодима (50%), Вага (36%) и в целом для замыкающего створа р. Северная Двина – с. Усть-Пинега (19%). Как и ранее, оценка производилась по сравнению с базовым периодом 1946-1977 гг. Для ряда постов отмечено небольшое статистически незначимое уменьшение минимального стока в период летне-осенней межени. Какой-либо закономерности в распределении этих постов не наблюдается.

Влияние осадков на величину минимального стока. Согласно современным представлениям о формировании зимнего межлетнего стока он определяется стоком грунтовых вод за предшествующий осенний период, которые в свою очередь определяются суммой выпавших осадков. Для установления связи между суммой осадков и величиной минимального зимнего стока были рассмотрены различные варианты обобщения суммы осадков:

- жидкие осадки за теплый период;
- суммарные осадки за сентябрь и октябрь;
- суммарные осадки за октябрь и ноябрь;
- суммарные осадки за сентябрь, октябрь и ноябрь;
- среднемесячные суммы осадков

Жидкие осадки за теплый период. В качестве первого варианта предиктора в зависимости минимального зимнего стока от суммы осадков была выбрана сумма жидких

осадков за теплый период, то есть с апреля по октябрь. Анализ данных показал, что в целом подобные связи в пределах бассейна чрезвычайно слабые, коэффициент корреляции которых не превышает 0,5. Исключения составляют посты на р. Сухона (д. Рабаньга и д. Каликино), на р. Кичьменга (д. Захарово), на р. Вычегда (д. Малая Кужба) и на р. Иосер (д. Иосер). Согласно полученным результатам, можно отметить, что корреляционная связь существует только со стоком за период до переломного года.

Суммарные осадки за сентябрь и октябрь. Выбор предиктора в виде суммы осадков за сентябрь и октябрь особого результата не дал. По рассматриваемым гидрологическим постам коэффициент корреляции составил менее 0,5. Исключением оказалась р. Вишера (д. Лунь) и р. Вага (д. Филяевская), значение коэффициента корреляции составил 0,63 и 0,58 соответственно.

Суммарные осадки за октябрь и ноябрь. Как и в предыдущем случае, суммирование осадков за октябрь и ноябрь не дало положительного результата. Исключением из общей картины оказался единственный пост – поселок Подосиновец на р. Юг. Коэффициент корреляции для него составил 0,6. Для остальных рассматриваемых постов связь практически отсутствует, коэффициент корреляции варьирует от 0,1 до 0,4.

Суммарные осадки за сентябрь, октябрь и ноябрь. Суммирование осадков за календарный осенний период также не дало результатов, однако, как и в случае суммы осадков за сентябрь и октябрь исключением стал пост, расположенные в д. Лунь на р. Вишера. Коэффициент корреляции составил 0,58. В качестве промежуточного вывода можно отметить, что рассмотрение суммарных осадков за несколько месяцев не дает положительного результата, так как наибольший вклад в корреляционную связь вносят осадки за отдельные месяцы. Это предположение подтверждается на примере р. Вишера (д. Лунь), где при рассмотрении суммарных осадков за сентябрь и октябрь коэффициент корреляции составил 0,63, но при добавлении суммы осадков за ноябрь он снизился до 0,58.

Среднемесячные суммы осадков. На первом этапе обработки данных среднесуточные данные об осадках были осреднены по месяцам. На основе полученных данных были посчитаны коэффициенты корреляции между среднемесячной суммой осадков и величиной минимального зимнего стока. Условным порогом отбора для дальнейшего анализа данных был выбран коэффициент корреляции равный 0,5.

На втором этапе отфильтрованные таким образом коэффициенты корреляции были распределены по отдельным водосборам, входящие в состав бассейна р. Северная Двина. Как и в предыдущих случаях связь между суммой осадков за отдельные месяцы и минимальным зимним стоком наблюдается только для первого расчетного периода (за исключением единичных случаев), то есть до момента переломного года. Однако, связи между осадками за отдельные месяцы и минимальным зимним стоком становятся более явными и на отдельных гидрологических постах коэффициент корреляции достигает 0,70-0,77.

Чтоб обобщить полученные результаты каждый бассейн был проанализирован на распределение коэффициентов корреляции по месяцам, в ходе анализа были выделены месяцы, во время которых связь суммы осадков и минимального стока проявляется наиболее явно. Результаты обобщения были визуализированы в виде карт (Рис. 1-2).

На Рис. 1 видно, что наиболее распространенным предиктором в создании связи с минимальным зимним стоком является сумма осадков за сентябрь. В пространственном распределении таких постов нет четкой закономерности, сумма осадков за сентябрь влияет на зимний сток как в западной части бассейна р. Северной Двины (бассейны рр. Сухона, Вага, Устья), так и в восточной части (рр. Пинега, Вычегда и Вишера). Коэффициент корреляции между минимальным зимним стоком и суммой осадков на отдельных метеостанциях достигает 0,77.

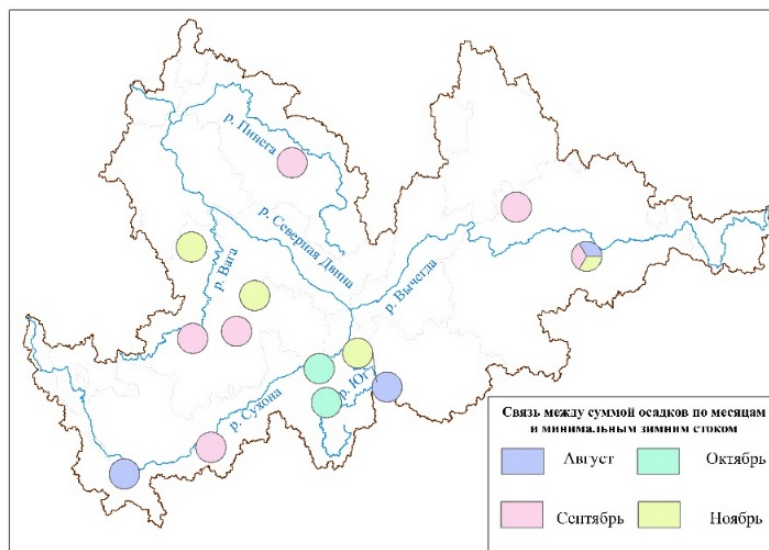


Рис. 1 Карта распределения гидрологических постов по месяцам, наиболее влияющим на формирование минимального зимнего расхода в зависимости от суммы осадков.

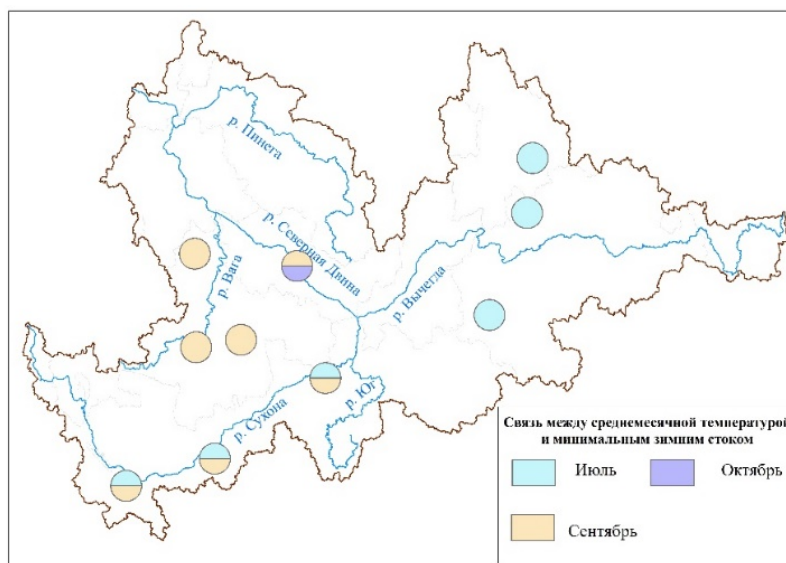


Рис. 2 Карта распределения гидрологических постов по месяцам, наиболее влияющим на формирование минимального зимнего расхода.

Влияние температуры на величину минимального стока. Температура относится к косвенному фактору, влияющему на образование зимнего стока. Она непосредственно не формирует его, но участвует в перераспределении грунтовых вод, которые в свою очередь в зимний период являются главным источником питания реки. Кроме того, температура воздуха влияет на величину испарения в теплый период года.

Для установления связи между температурой воздуха и минимальным зимним стоком были проанализированы следующие предикторы:

- Сумма отрицательных температур за холодный период
- Среднемесячные температуры воздуха.

Сумма отрицательных температур за холодный период. Для каждой метеостанции были рассчитаны суммы отрицательных температур, то есть за период с ноября по март. Как и в случае с осадками полученные корреляционные связи соответствовали периоду до точки

перелома. В целом можно отметить, что коэффициент корреляции в большинстве случаев не превышал 0,4 – 0,45. Наиболее тесная связь между суммой отрицательных температур и зимним стоком была обнаружена на р. Сухона (д. Каликино), для нее коэффициент корреляции составил -0,6.

Среднемесячные температуры воздуха. Руководствуясь общей логикой, были рассмотрены месяцы за период, предшествующий зимней межени. По результатам анализа была построена карта распределения гидрологических постов по месяцам наиболее влияющие на формирование минимального зимнего расхода в зависимости от температуры воздуха. В результате достаточно четко можно выделить два района: южный (верховья бассейна) и западный (бассейны рр. Вага и Сухона).

В качестве основного месяца, влияющего на величину зимнего стока на рр. Сухона, Вага и Устья является сентябрь. Коэффициент корреляционной связи для температуры воздуха за сентябрь и минимальным зимним стоком на данных реках составляет от -0,5 до -0,77. Для южной и юго-западной части, на рр. Сухона, Вишера, Сысола и Иосер наибольшее влияние на зимний сток оказывает температура за июль, самый жаркий месяц, когда испарение с почвы достигает наибольшего значения. Наибольшее значение коэффициента корреляции наблюдается на р. Сухона, он достигает значения 0,77, для рек юго-восточной части бассейна Северной Двины он не превышает 0,55.

Заключение

Обзор существующих методов определения подземной составляющей стока и расчеты по методике Б.И. Куделина для бассейна Северной Двины показали возможность использования минимальных месячных расходов за зимний период, наилучшим образом скоррелированных с величиной подземной составляющей.

На основе статистического анализа временных рядов минимального месячного стока за зимний и летний периоды получены представления о современной динамике подземного стока рек бассейна Северной Двины. Минимальный месячный зимний сток в среднем увеличился для рек бассейна Северной Двины на 21% и только для 4 постов изменения статистически не значимы. Изменения минимального месячного зимнего стока по сравнению с базовым периодом (1946-1977 гг.) достигают 35-45% и более для верховьев Северной Двины (бассейн Сухоны и Юга), оставаясь весьма существенными и для остальной части бассейна.

Выявлены основные факторы формирования минимального месячного зимнего и летне-осеннего стока. Среди них температура воздуха и осадки за различные месяцы, отражающие особенности формирования подземного стока в разные периоды года. Полученные результаты могут быть полезны для последующих сценарных расчетов.

Благодарность.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 21-47-00008.

Acknowledgments

The work was supported by the RSF grant No. 21-47-00008.

Список литературы

1. Рец Е.П., Киреева М.Б., Самсонов Т.Е., Езерова Н.Н., Горбаренко А.В., Фролова Н.Л. Алгоритм автоматизированного расчленения гидрографа по методу Б.И. Куделина GrWat: проблемы и перспективы // Водные ресурсы. 2022. том 49. № 1. С. 27-42 DOI
2. Pettitt A.N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics), 28 (2), 126–135.
3. Kendall, M.G Rank Correlation Methods. 1975. 4th edition, Charles Griffin, London.

Использование модели HBV для оценки максимальных расходов воды

В.С. Салпанова

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва
tinasalpanova@gmail.com*

Аннотация. Использование концептуальной гидрологической модели HBV может быть осуществлено в различных направлениях гидрологии, одним из которых является прогноз максимальных расходов воды. С использованием автоматической калибровки результаты получаются лучше, чем при использовании априорных параметров, основанных на физико-географических особенностях изучаемой территории. В данном исследовании анализируется бассейн реки Тобол. В результате полученных параметров есть возможность предсказать максимальные расходы в изучаемом регионе, однако необходимо делать поправки на завышение или наоборот занижение смоделированных расходов воды.

Ключевые слова: максимальный расход воды, концептуальная гидрологическая модель HBV, калибровка модели, априорные параметры.

Using the HBV model to estimate the maximum water discharges

V.S. Salpanova

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
tinasalpanova@gmail.com*

Abstract. The use of the conceptual hydrological model HBV can be carried out in various areas of hydrology, one of which is the forecast of maximum water discharges. The obtained with the use of automatic calibration results were better than with the use of a priori parameters based on the physical and geographical features of the studied territory. This research analyzes the Tobol River basin. As a result of the obtained parameters, it is possible to predict the maximum costs in the studied region, but it is necessary to make correction for overestimation or, conversely, underestimation of the simulated water discharge.

Keywords: maximum water discharge, conceptual hydrological model HBV, model calibration, a priori parameters.

Введение

Гидрологические прогнозы способствуют получению заблаговременной информации о возможных наводнениях, позволяя минимизировать риски и ущербы. Для прогнозов используют гидрологические модели, одной из которых является модель HBV, на основе анализа которой будет рассматриваться тема оценки максимальных расходов воды.

Главным преимуществом концептуальной модели HBV является ее простота и удобство в использовании без снижения точности прогноза.

Оценка максимальных расходов воды с помощью модели HBV может столкнуться с несколькими проблемами [2]:

1. Недостаток данных: Модель HBV требует большого объема гидрологических данных, таких как дождь, температура и сток. Однако не во всех регионах есть данная информация с необходимой частотой измерений

2. Неоднородность гидрологических условий: Гидрологические условия могут значительно отличаться даже внутри одного бассейна, что приведет к ограниченной применимости для других регионов/бассейнов.

3. Неучтенные факторы: Модель HBV основана на упрощениях. Например, модель не учитывает влияние человеческой деятельности или изменения климата [4]. Кроме того, могут появляться катастрофические паводки, для которых смоделированные параметры не подойдут. В результате чего, смоделированные расходы воды будут намного ниже фактических.

Однако модель HBV и управление рисками остаются важными инструментами для понимания и снижения различных ситуаций, связанных с гидрологическими явлениями. Продолжение исследований и улучшение методологий могут помочь преодолеть некоторые проблемы и повысить эффективность оценки максимальных расходов воды. Целью работы является анализ возможностей модели HBV в сфере оценки максимальных расходов воды с учетом различных подходов.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является сток рек бассейна р. Тобол [1]. Среди рек данного бассейна были выбраны 2 реки: Тавда, Нейва.

В ходе исследования были применены такие методы, как сравнительный анализ, обобщение и математическое моделирование. То есть был проведен систематический обзор и анализ существующих публикаций на тему исследования с целью определить существующие проблемы и знания в области, а также выявить опыт исследования в этой области. Благодаря этим методам можно определить, как модель была использована и насколько эффективно она была применена в ранее проведенных исследованиях. Метод математического моделирования включает в себя:

1. Подготовку данных. В данной работе использовались данные по ежедневным данным осадков, температуры воздуха и расходов воды, предоставленные Гидрометцентром России.

2. Калибровку параметров.

3. Запуск модели.

4. Анализ результатов и оценка их точности и достоверности.

Помимо этого, анализировалось исследование априорных параметров [3]. Наборы откалиброванных параметров для донорных бассейнов впоследствии были перенесены на 0,58 ячейки градусной сетки со схожими климатическими и физико-географическими характеристиками, в результате чего получают карты параметров HBV с глобальным охватом. В различных источниках используются разные характеристики для осреднения по градусной сетке. В данном случае это были: индекс засушливости, среднее годовое количество осадков, среднегодовой потенциал испарения, средняя температура воздуха, доля лесного покрова, фракция снежного покрова, уклон поверхности, содержание глины в почве. С учетом наличия отличающихся параметров в разных версиях модели использовались не только априорные, а совмещенные параметры (откалиброванные в HBV96 и априорные по HBV).

Результаты и обсуждение

На Рис. 1 отчетливо видно, что наиболее правдоподобным результатом остается вариант с автоматической калибровкой ($NSE = 0,879$), однако построенные при применении априорных параметров графики также довольно точно отображают действительность. Замена откалиброванных параметров на априорные будет лучше, если

не менять параметр sf_{max} . В Табл. 1. видно, что в большинстве случаев значения максимальных расходов воды завышаются, однако несмотря на это в среднем практически не превышает 25%. Кроме того, практически всегда происходит завышение пиков, и наоборот, в случаях наличия повторных пиков на спаде половодья значения расходов воды занижаются, например, в 2017 году. Кроме того, при использовании всех возможных априорных параметров пик половодья ежегодно начинается раньше, чем фактический (Табл. 2). В результате этого коэффициент Нэша-Сатклиффа является неудовлетворительным в случае откалиброванных и априорных параметров, который в среднем равен 0,451, а изменяется в зависимости от ансамбля в диапазоне от 0,425 до 0,488 (Табл. 3). Исходя из критерия Нэша-Сатклиффа результат будет хорошим в случае неиспользования критерия sf_{max} ($NSE > 0,8$). В среднем он равен 0,818 и изменяется в диапазоне от 0,797 до 0,824.

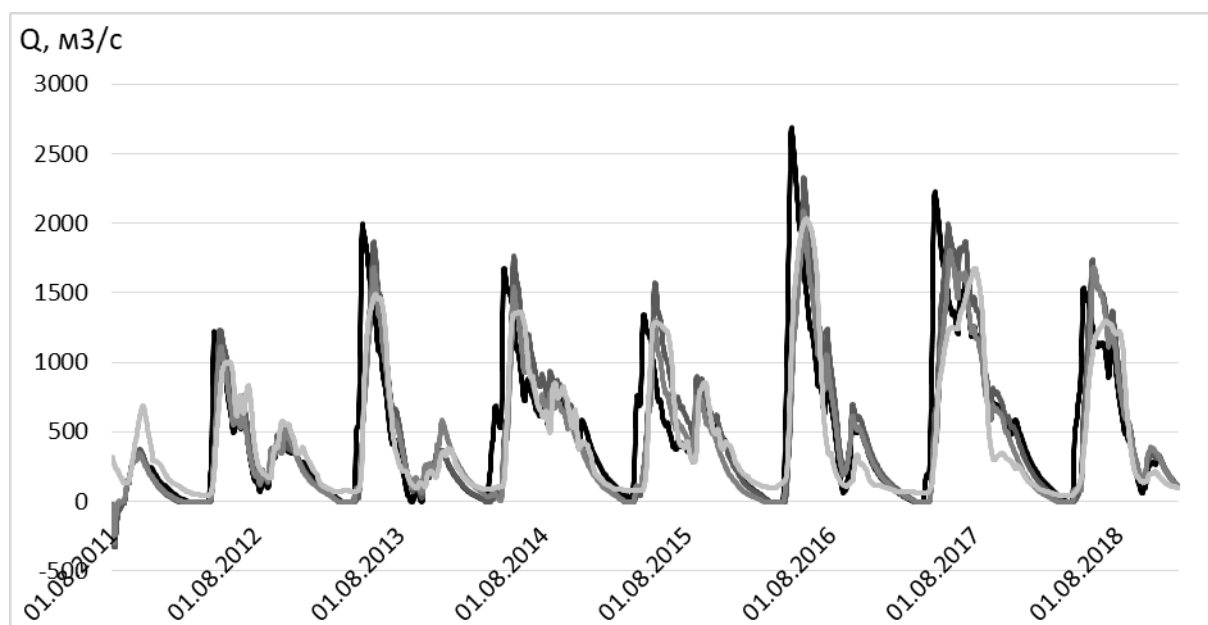


Рис. 1 Гидрографы фактических (светло-серый) и смоделированных расходов воды при использовании только откалиброванных (серый), априорных без параметра sf_{max} и калиброванных (темно-серый) и априорных и калиброванных (черный), р. Тавда – с. Таборы.

Табл. 1 Сравнение максимальных расходов воды при использовании разных подходов.

Дата максимального исходного расхода воды	Исходный расход воды	Смоделированные расходы воды с автоматической калибровкой (а)	% отн. исх. расхода воды (а)	Смоделированные расходы воды с калиброванными и априорными параметрами (б)	% отн. исх. расхода воды (б)	Смоделированные расходы воды с калиброванными и априорными параметрами (без учета sf_{max}) (в)	% отн. исх. расхода воды (в)	Ср. % отн. исх. расхода воды
17.10.2011	685	345	50,3	373	54,4	373	54,4	53,0
23.05.2012	1000	1110	111	1017	102	1235	124	112
30.05.2013	1490	1681	113	1994	134	1863	125	124
26.05.2014	1360	1548	114	1674	123	1768	130	122
09.05.2015	1290	1302	101	1341	104	1575	122	109
27.05.2016	2030	2092	103	2687	132	2330	115	117
30.05.2017	1250	1806	145	2226	178	1997	160	161
30.07.2017	1670	1261	75,5	1263	75,6	1473	88,2	79,8
29.06.2018	1300	1685	130	1531	118	1736	134	127
			105		113		117	

Табл. 2 Сравнение дат максимальных расходов воды при использовании разных подходов.

Дата максимального исходного расхода воды	Дата максимального расхода воды (а), м3/с	Превышение (а), дни	Дата максимального расхода воды (б), м3/с	Превышение (б), дни	Дата максимального расхода воды (в), м3/с	Превышение (в), дни	Ср. превышение, дни
17.10.2011	08.10.2011	-9	09.10.2011	-8	09.10.2011	-8	-8,3
23.05.2012	02.05.2012	-21	02.05.2012	-21	01.05.2012	-22	-21,3
30.05.2013	26.05.2013	-4	27.04.2013	-33	26.05.2013	-4	-13,7
26.05.2014	17.05.2014	-9	22.04.2014	-34	17.05.2014	-9	-17,3
09.05.2015	09.05.2015	0	13.04.2015	-26	11.05.2015	2	-8
27.05.2016	23.05.2016	-4	21.04.2016	-36	23.05.2016	-4	-14,7
30.05.2017	29.05.2017	-1	21.04.2017	-39	25.05.2017	-5	-15
30.07.2017	29.07.2017	-1	29.07.2017	-1	29.07.2017	-1	-1
29.06.2018	30.05.2018	-30	04.05.2018	-56	26.05.2018	-34	-40
		-8,8		-28,2		-9,4	

Табл. 3 Критерий Нэша-Сатклиффа для смоделированных расходов воды для реки Тавда – село Таборы.

	Смоделированные расходы воды с автоматической калибровкой (а)	Смоделированные расходы воды с калиброванными и априорными параметрами (б)	Смоделированные расходы воды с калиброванными и априорными параметрами (без учета c_{\max}) (в)
NSE	0,879	0,451	0,818

Другая ситуация складывается в бассейне Нейвы. Результаты с откалиброванными параметрами являются удовлетворительными, однако хороших результатов (т.е. при $NSE > 0.8$, добиться не удалось, Ттабл. 4). При замене параметров можно отметить, что как при использовании априорного c_{\max} , так и без него, результаты мало отличаются и даже на графике гидрографы выглядят практически одинаково (Рис. 2). В сравнении с р. Тавда смоделированный расход воды в среднем ниже, чем фактический (Табл. 5). Для смоделированных данных с применением априорных параметров процент относительно исходного расхода воды равен 72%. Однако ближе становятся между собой дни наступления пика половодья (Табл. 6). В среднем около 6 дней, а для р. Тавда данное значение даже для только откалиброванных расходов воды 8,8.

Табл. 4 Критерий Нэша-Сатклиффа для смоделированных расходов воды для реки Нейва – поселок Кировское.

	Смоделированные расходы воды с автоматической калибровкой (а)	Смоделированные расходы воды с калиброванными и априорными параметрами (б)	Смоделированные расходы воды с калиброванными и априорными параметрами (без учета c_{\max}) (в)
NSE	0,704	0,603	0,601

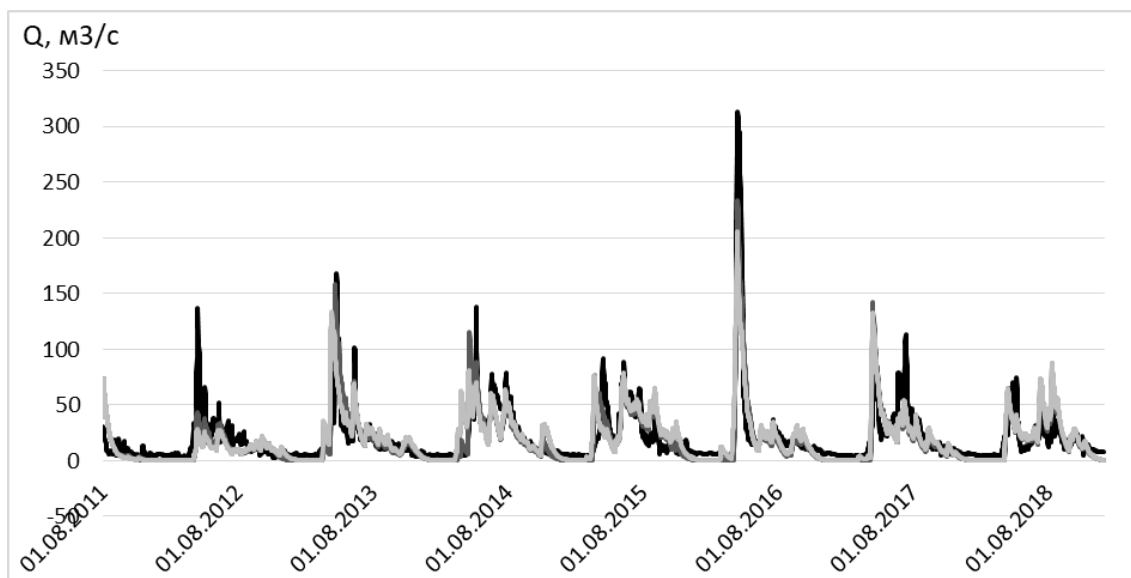


Рис. 2 Гидрографы фактических (светло-серый) и смоделированных расходов воды при использовании только откалиброванных (серый), априорных без параметра σ_{max} и калиброванных (темно-серый) и априорных, и калиброванных (черный), р. Нейва – пос. Кировское.

Табл. 5 Критерий Нэша-Сатклиффа для смоделированных расходов воды для реки Нейва – поселок Кировское.

Дата максимального исходного расхода воды	Исходный расход воды	Смоделированные расходы воды с автоматической калибровкой (а)	%, отн. исх. расхода воды (а)	Смоделированные расходы воды с калиброванными и априорными параметрами (б)	%, отн. исх. расхода воды (б)	Смоделированные расходы воды с калиброванными и априорными параметрами (без учета σ_{max}) (в)	%, отн. исх. расхода воды (в)	Ср. % отн. исх. расхода воды
13.04.2012	137	43	32	28	21	28	21	24
24.04.2013	168	159	94	133	79	134	80	84
11.06.2013	101	72	71	70	69	70	69	70
06.05.2014	138	88	64	70	51	70	51	55
14.04.2015	92,3	60	66	76	83	76	82	77
10.06.2015	88,3	75	85	79	90	79	90	88
13.04.2016	313	234	75	206	66	206	66	69
18.04.2017	105	142	142	133	127	133	127	132
11.07.2017	113	48	43	54	48	54	48	46
27.04.2018	70,4	61	86	65	92	65	92	90
			76		72		72	

Табл. 6 Критерий Нэша-Сатклиффа для смоделированных расходов воды для реки Нейва – поселок Кировское.

Дата максимального исходного расхода воды	Дата максимального расхода воды (а), м³/с	Превышение (а), дни	Дата максимального расхода воды (б), м³/с	Превышение (б), дни	Дата максимального расхода воды (в), м³/с	Превышение (в), дни	Ср. превышение, дни
13.04.2012	12.04.2012	-1	12.04.2012	-1	12.04.2012	-1	-1
24.04.2013	20.04.2013	-4	11.04.2013	-13	11.04.2013	-13	-10
11.06.2013	09.06.2013	-2	09.06.2013	-2	09.06.2013	-2	-2
06.05.2014	05.05.2014	-1	05.05.2014	-1	05.05.2014	-1	-1
14.04.2015	04.04.2015	-10	22.03.2015	-23	21.03.2015	-24	-19
10.06.2015	09.06.2015	-1	09.06.2015	-1	09.06.2015	-1	-1
13.04.2016	13.04.2016	0	11.04.2016	-2	11.04.2016	-2	-1,3
18.04.2017	13.04.2017	-5	13.04.2017	-5	13.04.2017	-5	-5
11.07.2017	07.07.2017	-4	07.07.2017	-4	07.07.2017	-4	-4
27.04.2018	14.04.2018	-13	14.04.2018	-13	14.04.2018	-13	-13
		-4,1		-6,5		-6,6	

Выводы

Таким образом, исходя из всего вышеперечисленного, можно сделать вывод о том, что использование априорных параметров актуально для тех районов, где нет данных о расходах воды за предыдущие годы. Однако их использование снижает качество прогноза максимальных расходов по сравнению с использованием откалиброванных параметров. В целом, на занижение или завышение результатов модели на пиках паводка и половодья влияют пониженные или наоборот повышенные значения параметров модели, отвечающие за осадки и снеготаяние.

Для обеих рек – Тавда и Нейва – замена части параметров на априорные возможна. Однако в случае с р. Тавда желательно использовать откалиброванный параметр cf_{max} , для р. Нейва это не приведет ни к улучшению, ни к ухудшению. Однако для более углубленных исследований максимальных расходов воды необходимо создать аналогичные карты с распределением параметров для оставшихся параметров.

В целом, прогноз максимальных расходов воды является проблематичным, так как зависит от множества факторов, и сильно зависит от прогноза температуры и осадков.

Благодарности

Автор выражает благодарность Гидрометцентру России за предоставленные данные и своему научному руководителю, Наталье Леонидовне Фроловой, за консультации и поддержку.

Acknowledgments

The author expresses gratitude to the Hydrometeorological Center of Russia for the data provided and to his research advisor, Natalia Leonidovna Frolova, for advice and support.

Список литературы

1. Тобол (река) // Планета Земля URL: <https://geosfera.org/aziya/2854-tobol-reka.html>. Дата обращения: 10.10.2022.
2. J. Seibert and S. Bergström.: A retrospective on hydrological catchment modelling based on half a century with the HBV model, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 26, 1371–1388
3. Hylke E. Beck, Albert I. J. M. van Dijk, Ad de Roo, Diego G. Miralles, Tim R. McVicar, Jaap Schellekens, L. Adrian Bruijnzeel. Global-scale regionalization of hydrologic model parameters // *Water Resources Research*, Volume 52, Issue 5 p. 3599-3622 20.04.2016 Доступна online: <https://doi.org/10.1002/2015WR018247>. Дата обращения: 6 June 2023.
4. Wang, Yueyang, Wang, Yanjun, Wang, Yan, Li, Ch., Ju, Q., Jin, J., Deng, X., Sun, Zhenxin, Bao Gaoxia. Applicability of the HBV model to a human-influenced catchment in northern China. *Hydrology Research* (2023) 54 (2): 208–219. doi: <https://doi.org/10.2166/nh.2023.092>. Дата обращения: 14.04.2023.

Разработка физико-статистической модели для прогноза половодья с использованием данных пространственно распределенных моделей атмосферных осадков (на примере реки Чумыш)

С.Ю. Самойлова*, О.В. Ловцкая, А.В. Кудишин

*Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул, Россия
bastet05@list.ru*

Аннотация. Выполнен анализ факторов формирования талого стока р. Чумыш (правый приток р. Обь), разработана физико-статистическая модель (модель множественной линейной регрессии) для прогноза объема и максимальных расходов половодья. В качестве исходной информации использовались два типа метеорологических данных – материалы наблюдений на гидрометеорологических станциях и постах и распределенные модели (ERA-5 ECMWF, PERSIANN-CDR, EWEMBI) за период с 1980 по 2018 гг. Установлено, что наиболее значимыми предикторами для оценки объема и максимальных расходов половодья являются зимние осадки, осадки периода половодья и предзимнее увлажнение бассейна, индикатором которого могут служить атмосферные осадки либо расходы воды в створе пгт Тальменка в предледоставный период

Ключевые слова: река Чумыш, зимние осадки, половодье, слой стока, максимальные расходы.

Development of a physical-statistical model for forecasting the Chumysh River floods using data from spatially distributed precipitation models

S.Yu. Samoilova*, O.V. Lovtskaya, A.V. Kudishin

*Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia
bastet05@list.ru*

Abstract. The analysis of the factors of formation of snowmelt runoff of the river. Chumysh (right tributary of the Ob River). A physical-statistical model (multiple linear regression model) has been developed to predict the volume and maximum flow rates of floods. Two types of meteorological data were used as initial information – observations at hydrometeorological stations and distributed models (ERA-5 ECMWF, PERSIANN-CDR, EWEMBI) for the period from 1980 to 2018. It has been established that the most significant predictors for assessing the volume and maximum flow rates of floods are winter precipitation, precipitation during the flood period, and pre-winter basin moistening, an indicator of which can be atmospheric precipitation or water flow in the alignment of the Talmenka urban settlement in the pre-freeze period.

Keywords: the Chumysh River, winter precipitation, flood, runoff depth, maximum discharge.

Введение

Разработка и совершенствование прогнозов опасных гидрологических явлений, связанных с половодьями и дождевыми паводками, является одной из важнейших задач гидрологии. Традиционно прогнозы объема и максимальных уровней половодья строятся на основе физико-статистических моделей с сосредоточенными параметрами, в которых для характеристики стокоформирующих факторов используется имеющаяся гидрометеорологическая информация. Главным недостатком этого подхода является недоучет неоднородности формирования стока на территории водосбора. Одним из способов учета пространственной изменчивости стокоформирующих факторов, а также восполнения отсутствующей метеорологической информации является использование разного рода распределенных данных (спутниковые наблюдения, реанализы и т.д.) [1; 5]. Целью данной работы являлась разработка физико-статистической модели для долгосрочного прогноза объема и максимальных уровней половодья р. Чумыш с использованием двух разных типов данных – материалов наблюдений на гидрометеорологических станциях и постах, а также распределенных моделей атмосферных осадков высокого пространственного разрешения.

Объект исследования – река Чумыш правый приток I порядка р. Обь. Длина реки – 644 км, площадь бассейна 23900 км². Бассейн расположен в пределах юго-западной части Салаирского кряжа и Предсалаирской равнины, Бийско-Чумышской возвышенности. Абсолютные высоты бассейна не превышают 600 м. Питание преимущественно снеговое (70–80% годового стока). Основной фазой водного режима реки является половодье, во время которого проходит от 49 до 81% годового стока. Половодье начинается в первой декаде апреля и длится около двух месяцев, достигая максимума в апреле-мае. Средний многолетний расход воды – 130,2 м³/с, максимальный расход – 2570 м³/с, минимальный – 11,3 м³/с.

Материалы и методы исследования

Для разработки прогноза объема стока и максимальных расходов половодья р. Чумыш реализована стандартная многофакторная статистическая модель (модель множественной линейной регрессии). В качестве предикторов использовались гидрометеорологические параметры, выбранные исходя из физических представлений о закономерностях формирования стока. Для регионов с длительной зимой основными факторами талого стока являются запасы воды в снежном покрове (либо сумма осадков за зимний период), последующие осадки и характеристики водопоглотительной способности бассейна (увлажнение, промерзание почвогрунтов). С учетом этого, на этапе отбора значимых предикторов построена и проанализирована корреляционная матрица, включающая следующие параметры в различных комбинациях:

1. Максимальные запасы воды в снеге по данным маршрутных снегомерных съемок;
2. Температуры воздуха (с месячным разрешением) с ноября по июнь;
3. Суммы осадков (с месячным разрешением) с ноября по июнь;
4. Среднесуточные и среднемесячные расходы воды по гидропосту р. Чумыш – пгт Тальменка.

Всего корреляционная матрица состояла из 65 предикторов. Набор параметров ограничивался доступностью данных метеонаблюдений. Предиктантами являлись слой стока и максимальный среднесуточный расход половодья, полученные путем анализа комплексных графиков по гидропосту р. Чумыш – пгт Тальменка и ГМС Тогул. Период исследований – с 1980 по 2018 гг., ограничен наличием пространственно распределенных данных.

В качестве источников метео данных использовались:

1. Метеостанции, находящиеся как в границах бассейна, так и в непосредственной близости: Тальменка, Заринск, Тогул, Целинное, Троицкое, Маслянино, Кузедеево и Новокузнецк.

2. Продукты глобальных реанализов ERA-5 ECMWF ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$) [7], EWEMBI ($0,5^\circ \times 0,5^\circ$) [6], а также глобальный массив данных об осадках PERSIANN-CDR ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$) [8]. Также использовались скорректированные данные реанализа ERA-5, полученные в Институте мониторинга климатических и экологических систем (ИМКЭС СО РАН) [9].

Выбор предикторов для построения уравнения осуществлялся путем пошаговой регрессии по мере уменьшения их влияния на сток. При наличии дублирующих факторов выбирался наиболее значимый, остальные исключались. Качество построенных уравнений множественной регрессии оценивалось при помощи стандартного показателя отклонения среднеквадратической погрешности прогнозов к среднеквадратическому отклонению прогнозируемой величины S/σ .

Результаты и обсуждение

Важнейшим фактором половодья является снежный покров. Для характеристики снегозапасов использовались данные снегомерных маршрутов метеостанций Тальменка, Тогул, Маслянино, Кузедеево. Кроме того, в качестве показателя, характеризующего зимнее атмосферное увлажнение бассейна, использованы суммы осадков за зимние месяцы (с ноября по март включительно) как по материалам наблюдений на метеостанциях, так и по данным реанализов.

Другим важнейшим фактором формирования половодья является водопоглотительная способность почвогрунтов, которая зависит от глубинных промерзания и влажности. В условиях отсутствия данных непосредственных наблюдений за этими параметрами возможно использование косвенных характеристик. Так, глубина промерзания зависит от температуры воздуха и толщины снежного покрова как на начальной стадии его формирования (октябрь-ноябрь), так и в течение зимы. Влажность почвогрунтов нередко является более сильным фактором формирования половодья, особенно в условиях глубокого (более 60 см) промерзания грунтов, а также на лесных водосборах [2; 4]. В качестве индекса предзимнего увлажнения бассейнов рек часто применяется паводочный осенний либо осенне-зимний сток [4]. В данной работе были использованы средние месячные и максимальные расходы воды за октябрь и ноябрь в створе р. Чумыш – пгт Тальменка, а также сумма осадков за октябрь и ноябрь по данным метеостанций и реанализов.

Для характеристики третьего важнейшего фактора – метеорологических условий собственно периода половодья – использованы средние температуры и суммы осадков за апрель-июнь. Результаты корреляционного анализа стокоформирующих факторов и параметров половодья представлены в Табл. В таблице указаны только наиболее значимые предикторы и максимальные значения коэффициентов корреляции Пирсона, полученные для группы показателей.

Таким образом, для оценки *слоя стока половодья* значимыми предикторами являются (в порядке убывания значимости):

- 1) осадки периода половодья – сумма осадков за апрель-май по ГМС Тогул, $r=0,59$;
- 2) зимнее атмосферное увлажнение бассейна: сумма зимних осадков (по данным реанализа ERA-5 ECMWF), $r= 0,55$, либо максимальные запасы воды в снежном покрове (по данным снегомерных съемок на ГМС Маслянино), $r=0,46$;
- 3) предзимнее увлажнение бассейна, показателем которого является средний расход воды р. Чумыш за октябрь ($r=0,49$).

Табл. Коэффициенты корреляции r^* связи слоя стока и максимальных расходов половодья (р. Чумыш – пгт Тальменка) с показателями, характеризующими основные факторы формирования стока.

Фактор формирования стока	Показатели	Источник данных	Коэффициенты корреляции r^*	
			Слой стока половодья	Максимальный среднесуточный расход
Атмосферные осадки зимнего периода	сумма осадков зимнего периода (XI-III)	метеостанции	0,53	0,43
	сумма осадков зимнего периода (XI-III)	распределенные модели	0,55	0,50
Снежный покров	максимальные запасы воды в снежном покрове, по материалам снегомерных съемок	метеостанции	0,46	0,45
Атмосферные осадки периода половодья	сумма осадков (IV-V)	метеостанции	0,59	0,34
	сумма осадков (IV-V)	распределенные модели	0,51	0,28
Температурный режим зимнего периода	средняя температура зимнего периода (XI-III)	метеостанции	0,11	-0,06
Температурный режим периода половодья	средняя температура (IV)	метеостанции	0,02	-0,10
	средняя температура (IV-V)		-0,008	-0,18
Температурные условия осени	средняя температура (X)	метеостанции	-0,29	-0,37
Предзимнее увлажнение бассейна	сумма осадков за (X-XI)	распределенные модели	0,35	0,59
	средний расход (X)	гидропост р. Чумыш пгт Тальменка	0,49	0,54

*Примечание: значения коэффициентов корреляции более 0,5 выделены курсивом.

Для оценки *максимальных расходов* наиболее значимыми являются (также в порядке убывания значимости):

1) предзимнее увлажнение бассейна, в качестве индикатора которого выступают сумма осадков за октябрь-ноябрь (по данным реанализа ERA-5 ECMWF) ($r=0,59$), либо средний расход воды р. Чумыш за октябрь ($r=0,54$);

2) зимнее атмосферное увлажнение бассейна, которое характеризует сумма зимних осадков (XI-III) (по данным реанализа ERA-5 ECMWF), ($r=0,5$), либо максимальные запасы воды в снежном покрове (по данным снегомерных съемок ГМС Маслянино), $r=0,45$;

3) температурные условия осени, в значительной степени определяющие промерзание почвогрунтов. Прослеживается отрицательная связь максимальных расходов воды со средней температурой за октябрь (по данным ГМС Тогул), $r= -0,37$;

4) осадки периода половодья (сумма осадков за апрель-май по ГМС Тальменка) ($r=0,34$).

Большинством авторов, например, [1, 3] отмечается значительное влияние на формирование талого стока зимних температур, которые определяют суровость зимы и, соответственно, промерзание грунтов. Для бассейна р. Чумыш связь талого стока и зимних температур, характеризуется коэффициентами корреляции r не более $|0,11|$, что не позволяет использовать данный предиктор для построения уравнения. Очевидно,

более сильное влияние оказывают метеорологические условия на начальной стадии формирования снежного покрова.

Таким образом, уравнение множественной линейной регрессии для прогноза слоя стока половодья имеет вид:

$$Y = 0,29X_{IV-V} + 0,34X_{XI-III} + 0,41Q_X - 22 \quad (1)$$

Для максимальных расходов:

$$Q_{max} = 5,04Q_X + 2,93X_{XI-III} - 17,04T_X + 1,48X_{IV-V} - 91,25 \quad (2)$$

где X_{IV-V} – осадки за апрель-май ГМС Тогул (для уравнения 1) и ГМС Тальменка (для уравнения 2); X_{XI-III} – сумма зимних осадков (XI-III) по данным реанализа ERA-5 ECMWF; T_X – средняя температура воздуха по данным ГМС Тогул; Q_X – средний расход воды р. Чумыш за октябрь. Уравнения характеризуются $R^2 = 0,63$ и $0,54$, R^2 нормированный – $0,60$ и $0,49$ соответственно. Показатель S/σ для прогноза слоя стока половодья составил $0,62$, для максимальных расходов – $0,68$, что характеризует модель как «удовлетворительную». Очевидно, что использование большего набора метеорологических данных с более высоким пространственно-временным разрешением позволит улучшить качество модели.

Выводы

Главным фактором, определяющим объем талого стока р. Чумыш, является количество атмосферных осадков, собственно, за половодье и за предшествующий зимний период; затем – предзимнее увлажнение бассейна, которое определяет его водопоглощающую емкость.

На формирование максимальных расходов р. Чумыш в большей степени влияют увлажнение и промерзание почвогрунтов, которые определяют, с одной стороны, коэффициенты талого стока, с другой – скорость поступления талых вод в речную сеть.

При оценке зимних осадков в бассейне р. Чумыш предпочтительно использовать данные распределенных моделей осадков. Наилучший результат (наиболее высокие коэффициенты корреляции) показали данные модели ERA-5 ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$), как в их исходном варианте, так и с учетом корректировки. Для характеристики весенних осадков лучший результат показали данные репрезентативной метеостанции.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (проект «Изучение механизмов природных и антропогенных изменений количества и качества водных ресурсов Сибири с использованием гидрологических моделей и информационных технологий»).

Acknowledgments

The work was supported by the project “Study of the mechanisms of natural and anthropogenic changes in the quantity and quality of Siberian water resources using hydrological models and information technologies”

Список литературы

1. Варенцова Н.А., Киреева М.Б., Харламов М.А., Варенцов М.И., Фролова Н.Л., Повалишников Е.С. Формирование весеннего стока рек ЕТР: основные факторы и способы их учета. II. Переоценка с учетом современных условий на примере рек бассейна Дона // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 2. С. 117–146.
2. Калюжный, И. Л. Лавров С. А. Гидрофизические процессы на водосборе: Экспериментальные исследования и моделирование. СПб: «Нестор-История», 2012. 616 с.

3. Лавров С. А., Калюжный И. Л. Влияние климатических изменений на сток весеннего половодья и факторы его формирования в бассейне Волги // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 6. С. 42–60.
4. Мухин В. М. Методы прогнозирования притока воды в водохранилища за период весеннего половодья // Труды Гидрометцентра России. Гидрометеорологические прогнозы. 2014. № 351. С. 108–140.
5. Ромасько В.Ю., Бураков Д.А. Космический мониторинг заснеженности территории речных бассейнов // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2017. № 10 (6). С. 704-713.
6. Frieler, K., Lange, S., Piontek, F., et al. Assessing the impacts of 1.5°C global warming – simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP2b) // Geoscientific Model Development. 2017. V. 10. No 12. P. 4321–4345.
7. Hersbach, H, Bell, B, Berrisford, P, et al. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. V. 146. P. 1999–2049.
8. Nguyen P., Shearer E., Tran H., et al. The CHRS Data Portal, an easily accessible public repository for PERSIANN global satellite precipitation data. // Sci Data. 2019. 6:180296.
9. Voropay N.N., Ryazanova A.A., Dyukarev E.A. High-resolution bias-corrected precipitation data over South Siberia, Russia // Atmospheric Researches. 2021. V. 254. 105528.

УДК: 332.3(075.32).

К вопросу об управлении рекреационными ресурсами прибрежных зон рек, озер и водохранилищ

А.Ю. Санин

*Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Росгидромет, г. Москва, Россия
eather86@mail.ru*

Аннотация. В настоящее время особенно актуальным представляется сохранение туристического потенциала прибрежных зон рек, озер и водохранилищ, так как они обладают повышенной привлекательностью для внутреннего туризма, роль которого в России в последнее время заметно растет. Для обеспечения возможностей для дальнейшего развития внутреннего туризма или даже для поддержания туристических потоков на текущих уровнях необходимо сохранение рекреационного потенциала прибрежных территорий внутренних водных объектов. Для избегания его снижения, необходимо выявить основные виды воздействия человека, которые его уменьшают, и минимизировать негативное влияние каждого из них, что и являлась целью указанной работы и что было сделано по ее итогам. Частично минимизация отрицательного влияния достигается за счет соблюдения ограничений по использованию водоохранных зон и прибрежных защитных полос, которые предусматривает Водный Кодекс, однако далеко не всегда эти ограничения выполняются, более того, существует проблема несоответствия выделяемых стандартным образом, без учета индивидуальных особенностей водоемов и их природных зон, границ водоохранных зон и прибрежных защитных полос, и прибрежной зоны водоемов. Другая проблема управления природопользования в прибрежных зонах состоит в том, что далеко не для всех водоемов указанные границы определены. Если для тех из них, которые расположены на слабозаселенных территориях, это не представляется особо актуальным, то для прибрежных зон водоемов, активно используемых человеком, необходимость определения границ водоохранных зон и прибрежных защитных полос не вызывает сомнений. Ограничения, предусмотренные в Водном кодексе по их использованию человеком, полностью не решают проблему истощения их рекреационных ресурсов (как и ряд других, обусловленных антропогенным воздействием), но вносят существенный вклад в ее решение.

Ключевые слова: внутренние водные объекты, внутренний туризм, рекреационный потенциал, Водный кодекс, прибрежная зона.

On the issue of the management of recreational resources of coastal zones of rivers, lakes and reservoirs

A.Y. Sanin

*N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Roshydromet, Moscow, Russia
eather86@mail.ru*

Abstract. Currently, it is particularly relevant to preserve the tourist potential of coastal zones of rivers, lakes and reservoirs, as they have increased attractiveness for domestic tourism, the role of which in Russia in the post-winter period is noticeably growing. In order to provide opportunities for further development of domestic tourism or even to maintain tourist flows at

current levels, it is necessary to preserve the recreational potential of coastal territories of inland water bodies. In order to avoid its decline, it is necessary to identify the main types of human impact that reduce it, and minimize the negative impact of each of them, which was the purpose of this work and what was done following its results. Partially minimizing the negative impact is achieved by observing the restrictions on the use of water protection zones and coastal protection strips, which are provided for by the Water Code, but these restrictions are not always met. Moreover, there is a problem of inconsistency of the boundaries allocated in a standard way, without taking into account the individual characteristics of reservoirs and their natural zones, the boundaries of water protection zones and coastal protection strips, and the coastal zone of reservoirs. Another problem of environmental management in coastal zones is that these boundaries are not defined for all reservoirs. If for those of them that are located in sparsely populated areas, this does not seem particularly relevant, then for the coastal zones of reservoirs actively used by humans, the need to determine the boundaries of water protection zones and coastal protective strips is beyond doubt. The restrictions provided for in the Water Code on their human use do not completely solve the problem of depletion of their recreational resources (as well as a number of others caused by anthropogenic impact), but make a significant contribution to its solution.

Keywords: inland water bodies, inland tourism, recreational potential, Water Code, coastal zone.

Введение

Устойчивое развитие прибрежных зон рек, озер и водохранилищ предполагает обеспечение сохранения и воспроизводства их природных, в том числе рекреационных ресурсов в будущем, для чего необходимо сохранение рекреационного потенциала прибрежных зон водных объектов. В свою очередь, это предполагает ограничение процессов трансформации природных ландшафтов, эстетическая ценность которых наряду с целым рядом других как природных, так и антропогенных (прежде всего, уровнем развития рекреационной, транспортной и иной инфраструктуры) во многом ее определяет [3;4].

Под рекреационным потенциалом понимается вся совокупность природных, культурно-исторических и социально-экономических предпосылок для организации рекреационной деятельности на определенной территории [3]. Важнейший вклад в рекреационный потенциал России вносят внутренние водные объекты и их прибрежные зоны. Им свойственна повышенная привлекательность в сравнении со смежными территориями, как правило, имеется возможность развивать на них множество видов туризма. Можно говорить об «универсальности» отдыха на внутренних водных объектах, он подходит если не всем категориям рекреантов, то их подавляющей части. Подтверждено доминирование в структуре рекреационных занятий околководного отдыха – у 70-90 % опрошенных, а среди видов занятий у отдыхающих вне зависимости от их пола и возраста – пляжно-купального отдыха [1].

Для сохранения рекреационного потенциала представляется необходимым соблюдение ограничений, для которых требуется обоснование, как научное, так и законодательное. Последнее отчасти выполнено в действующем Водном Кодексе РФ [2], который предусматривает ряд ограничений (статья 65 Кодекса) в хозяйственной деятельности в водоохраных зонах и прибрежных защитных полосах водоемов, призванных не только сохранить качество вод водоемов и водотоков и ландшафты их прибрежных зон, но и их рекреационные ресурсы. Водный Кодекс имеет ряд недостатков, однако в целом при соблюдении предусмотренных в нем ограничений обеспечивает защиты рекреационных ресурсов прибрежных зон водных объектов. На практике же контролирующие органы в ряде случаев сталкиваются с нарушением норм

Кодекса [5], многие из которых приводят к снижению рекреационного потенциала прибрежных территорий.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено как на основе анализа имеющейся литературы, в том числе и нормативных документов, так и с опорой на опыт экспедиционных исследований, осуществляемых как автором, так и его коллегами. В частности, в течение многих лет автор принимал участие в мониторинге рек Москвы, аналогичные работы выполнялись как с участием автора, так и его коллегами по другим регионам России. Под руководством автора были организованы и выполнялись в течение нескольких лет работы по исследованию качества вод для Онежского озера. Кроме фондовых и опубликованных материалов, для ряда водоемов и их прибрежных зон были проанализированы космические снимки. Выполненная работа позволила выявить ряд проблем в управлении рекреационными ресурсами прибрежных зон рек, озер и водохранилищ, а также наметить пути их решения.

В работе активно использовались методы аналогов, индукции (распространения опыта, полученного при работе с конкретными водными объектами, на все подобные им объекты) и дедукции (перенос обобщенных выводов и закономерностей на конкретные водные объекты). Разумеется, перечисленные методы должны применяться с осторожностью, так как необходимо учитывать индивидуальные особенности водных объектов.

Результаты и обсуждение

Основные виды воздействия человека на прибрежные зоны рек, озер и водохранилищ перечислены в Табл.

Табл. Основные виды воздействия человека на прибрежные зоны и их последствия для туризма на них.

Вид воздействия	Последствие для туризма
1. Захламление территорий водоохраных зон и засорение русел рек бытовым и строительным мусором.	Снижение эстетической привлекательности ландшафтов, а также водоемов для купания. Поступление загрязняющих веществ в почву и воду.
2. Размещение в пределах водоохраных зон объектов-нарушителей природоохранного законодательства.	Последствия зависят от того, какой именно нарушитель размещен: это может быть и ограничение доступа к берегу, и захламление прибрежной зоны, и загрязнение вод, и другие последствия.
3. Сброс ливневых, производственных и бытовых сточных вод в водные объекты.	Снижение привлекательности водных объектов, приведение их в состояние непригодности для купания.
4. Аэрозольное загрязнение территорий водоохраных зон, примыкающих к крупнейшим автомагистралям, пылью, сажей, нефтепродуктами.	Снижение, часто существенное, качества воздуха, которое, в свою очередь, снижает качество отдыха. Поступление загрязняющих веществ, содержащихся в воздухе, в воду с атмосферными осадками.

5. Ограничение прямого доступа к водным объектам общего пользования в результате сооружения капитальных заборов жилых, производственных и других территорий.	Увеличение «плотности» рекреантов на других участках берега, которые остаются доступными, что приведет к снижению уровня комфорта их отдыха, а также к усилению антропогенного воздействия на туристические ландшафты.
6. Изменение экологических условий на «запечатанных», закрытых для посещения территориях.	Такие территории часто недоступны для экологического мониторинга, однако имеет смысл предполагать для них значительную степень антропогенной трансформации их природных ландшафтов, загрязнение окружающей среды, замусоривание.
7. Уничтожение почвенного и растительного покрова вследствие строительных работ. Распространение рудеральных видов растительности.	Наличие как минимум одного из рудеральных видов- борщевика Сосновского- делает перемещения дискомфортными, остальные снижают эстетическую ценность ландшафтов.
8. Стихийные стоянки автотранспорта около берегов водоемов.	Уплотнение грунтов, воздействие на растительный покров, загрязнение почвы и воды горюче-смазочными материалами.
9. Высокая «плотность» отдыхающих в прибрежной зоне.	Формирование тропиной сети, трансформация природных ландшафтов, снижение эстетической привлекательности ландшафтов и качества отдыха туристов, захламление бытовым мусором.

Выводы

Есть причины, по которым существующие в настоящее время ограничения в Водном Кодексе недостаточны для сохранения рекреационных и иных ресурсов прибрежных зон внутренних водных объектов. Некоторые из них перечислены ниже:

1. В России огромное количество внутренних водных объектов- не менее нескольких миллионов рек, озер, прудов и водохранилищ- границы водоохранных зон и прибрежных защитных полос «на местности» определены для них далеко не всегда. Для слабозаселенных территорий с низкой активностью хозяйственной деятельности это не так актуально, но и для территорий с интенсивной хозяйственной деятельностью это не сделано во многих случаях.

2. Далеко не всегда удается обеспечить соблюдение норм Кодекса касательно предусмотренных ограничений хозяйственной деятельности в водоохранных зонах и прибрежных защитных полосах.

3. Ограничения, предусмотренные Кодексом, одинаковы для всех прибрежных зон водоемов и водотоков и не учитывают их индивидуальные особенности. Границы водоохранных зон, прибрежных защитных полос также выделяются по стандартной методике без учета конкретных ситуаций, часто они определяются некорректно.

Несмотря на все проблемы, соблюдение действующих норм Водного кодекса не только позволяет избежать резкого ухудшения качества вод водоемов и деградации

природных ландшафты их прибрежных зон (для чего эти нормы во многом и разработаны), но и способствует сбережению их рекреационных ресурсов.

Для сохранения туристического потенциала прибрежных зон внутренних водных объектов представляется также актуальной осуществление оценки их рекреационной емкости. Такая оценка представляется особенно актуальной для наиболее популярных у рекреантов в силу одной или нескольких различных причин (уникальность ландшафтов, близость к крупному городу или расположение в его пределах, сложившаяся репутация). Для избежания ее превышения может понадобиться перераспределение потоков отдыхающих в пространстве и времени. В свою очередь, для этого необходимы оценки рекреационного потенциала для смежных участков прибрежных зон и близко расположенных внутренних водных объектов, что позволит выявить среди них те, которые имеют наибольшую привлекательность для отдыхающих, а также развитие новых видов туризма, что кроме перераспределения рекреантов в пространстве позволит осуществить его и во времени, отчасти обеспечит уход от сезонного характера отдыха.

Благодарности

Автор выражает благодарность своим коллегам в Отделе информационного обеспечения морской и водохозяйственной деятельности Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова, Росгидромет, за длительную совместную работу на Онежском озере, в водоохраных зонах рек Москвы и Подмосковья и на других водных объектах, которая позволила прийти к приводимым выше выводам и разработать предлагаемые в статье рекомендации.

Acknowledgments

The author expresses gratitude to his colleagues in the Department of Information Support of Marine and Water Management Activities of the Zubov State Oceanographic Institute, Roshydromet, for long-term joint work on Lake Onega, in the water protection zones of the rivers of Moscow and the Moscow region and other water bodies. It has allowed to come to the conclusions and develop the recommendations proposed in the article.

Список литературы

1. Андреева И.В. Рекреационное водопользование: историография и стратегия изучения // Известия АО РГО. 2017. №3 (46). С. 5-14.
2. Водный кодекс Российской Федерации. М.: Эксмо. 2021. 64 с.
3. Кусков А.В. и др. Рекреационная география. Учебно-методический комплекс. Минск, 2003. 504 с.
4. Ланцова И.В. Геоэкологическая оценка и рациональное использование рекреационного потенциала береговых зон водохранилищ. Авт. дис. на соиск. уч. степ. доктора геогр. наук. Москва, 2009, 25с.
5. Цапина А. М. Эколого-правовые проблемы формирования и функционирования водоохраных зон // Актуальные проблемы российского права. 2021. Т. 16. № 3. С. 177–184. DOI:10.17803/1994-1471.2021.124.3.177-184.

Оценка трендов и силы корреляционной связи количества атмосферных осадков и объема стока рек на Окско-Донской низменной равнине

А.В. Семенова*, М.Е. Буковский

*Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, г. Тамбов, Россия
asv273@mail.ru*

Аннотация. Целью настоящей работы стала оценка динамики количества атмосферных осадков и динамики стока рек Окско-Донской низменной равнины и определения наличия и силы корреляционной связи между этими параметрами. Территория исследования – Тамбовская область. В основу работы положены данные о количестве атмосферных осадков по 7 метеостанциям и данные о расходах воды на 5 гидрологических постах региона. Первичные материалы предоставлены Тамбовским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды за период с 1960 по 2021 гг. В целом, в среднем по области не наблюдается статистически достоверных изменений годовых сумм атмосферных осадков, осреднённых по территории региона, и суммарного объёма стока основных рек. Оценка силы корреляционной связи между двумя указанными параметрами проводилась между статистически обработанными рядами. Были построены кривые сглаживания: от двухлетнего сглаживания до одиннадцатилетнего сглаживания. В результате парного корреляционного анализа полученных кривых сглаживания выявлено, что наибольшая сила корреляционной связи ($r=0,791$) наблюдается между кривыми восьмилетнего сглаживания.

Ключевые слова: равнинные реки, водный режим, атмосферные осадки, объём стока, гидрологический год, корреляционный анализ, кривые сглаживания, Тамбовская область.

Assessment of trends and correlation strength between the amount of atmospheric precipitation and the river runoff volume in the Oka-Don lowland plain

A.V. Semenova*, M.E. Bukovskiy

*Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia
asv273@mail.ru*

Abstract. The aim of this study was to assess the dynamics of the atmospheric precipitation amount and the dynamics of the runoff of rivers in the Oka-Don lowland plain and to determine the existence and strength of the correlation between these parameters. The study area is the Tambov region. The work is based on precipitation data at 7 weather stations and on water discharges data at 5 gauging stations of the region. Primary materials provided by the Tambov Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring for the period from 1960 to 2021. In general, on average, there are no statistically significant changes in the average annual amounts of atmospheric precipitation and the total volume of runoff of the main rivers in the region. An assessment of the correlation strength between the two specified parameters was carried out between the statistically processed series. Smoothing curves were built: from a two-year smoothing to an eleven-year smoothing. As a result of the paired

correlation analysis of the obtained smoothing curves, it was revealed that the highest correlation strength ($r=0.791$) is observed between the eight-year smoothing curves.

Keywords: lowland rivers, water regime, atmospheric precipitation, total annual runoff volume, hydrological year, correlation analysis, smoothing curves, Tambov region.

Введение

Как отмечается во всех докладах и отчетах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) и Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), интенсивность климатических изменений с каждым десятилетием только усиливается [10, 13].

Повышение приземной температуры воздуха влияет на изменения в характере и количестве осадков, перераспределении годового стока рек, что, свою очередь, расширяет площадь территорий, подверженных экстремальным метеорологическим и гидрологическим погодным явлениям.

Тамбовская область расположена в центре Русской равнины, занимая большую часть Окско-Донской низменности и западные отроги Приволжской возвышенности, и входит в Центрально-Черноземный экономический район. Температурный режим на территории Тамбовской области заметно меняется. Анализируя данные за 62-летний период, можно наблюдать увеличение среднегодовой температуры воздуха. Наибольший вклад в рост среднегодовой температуры воздуха принадлежит холодному периоду года, когда отмечается довольно значимое потепление ($0,39^{\circ}\text{C}$ за 10 лет) [3]. Реки, протекающие по территории области, относятся к бассейнам Волги и Дона и также претерпевают значительные трансформации водного режима [2]. Так, за последние 70 лет произошло существенное внутригодовое перераспределение стока. В частности, вдвое увеличился сток за летне-осеннюю и зимнюю межени за счет сокращения стока в период весеннего половодья. [11–12].

Целью данной работы является оценка динамики количества атмосферных осадков и динамики стока рек Окско-Донской низменной равнины и определения наличия и силы корреляционной связи между этими параметрами.

Ряд работ, посвященных той же климатической зоне, уже показывали тесную связь между различными климатическими параметрами и отдельными фазами водного режима рек, в частности половодья [1, 6].

Материалы и методы исследования

В работе использовались первичные материалы, предоставленные Тамбовским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Авторами были оцифрованы, систематизированы и проанализированы рукописные и печатные агрометеорологические журналы по семи метеостанциям и гидрологические ежегодники по пяти гидрологическим постам региона. Анализовались данные гидрологических постов, расположенных вблизи выхода основных рек за границы региона за период с 1960 по 2021 гг. В совокупности было проанализировано более 23000 ежедневных значений количества атмосферных осадков и более 105000 значений расходов воды основных рек области.

По всем изученным гидропостам были рассчитаны объёмы стока за каждый гидрологический год. Далее путём сложения полученных объёмов стока по каждому посту был получен суммарный объём стока с территории, замыкаемой изученными гидрологическими постами. Суммарно это более 84 процентов территории Тамбовской области.

Далее по всем метеостанциям региона были подсчитаны суммы осадков за тот же промежуток времени, и на основе полученных данных рассчитаны средние значения годовой суммы осадков для всей территории области.

При подсчете сумм осадков, учитывалась, введенная с 1966 года поправка «на смачивание». Она позволяла избежать потерь небольшого количества воды, остающейся на стенках дождемерного ведра при выливании осадков в мерный стакан. Данная поправка вводилась авторами при первичной обработке исходных данных, согласно методикам Росгидромета [4–5, 9]. Для нескольких лет (1967/68 и 1974/75 гг.) авторами были восстановлены данные о годовом стоке, согласно методике, представленной в Своде правил 33-101-2003 [8].

Следующим шагом стал анализ полученных рядов данных. Была проанализирована динамика годовых сумм атмосферных осадков, осреднённых по территории региона и суммарного годового стока рек с территории Тамбовской области за период с 1960 по 2021 гг., определены тренды.

Затем был проведён парный корреляционный анализ между значениями годовых сумм атмосферных осадков, осреднённых по территории области и суммарным годовым стоком основных рек региона при помощи коэффициента корреляции Спирмена. После этого анализировалась сила корреляционной связи между статистически обработанными рядами данных указанных параметров. Были построены кривые сглаживания: от двухлетнего сглаживания до одиннадцатилетнего сглаживания и в каждом случае определена сила корреляционной зависимости [7].

Результаты и выводы

Вначале была проанализирована динамика сумм осадков, выпадающих за гидрологический год, осредненных по территории области, и суммарного объёма стока основных рек области за гидрологический год за 62-летний период (Рис. 1-2).

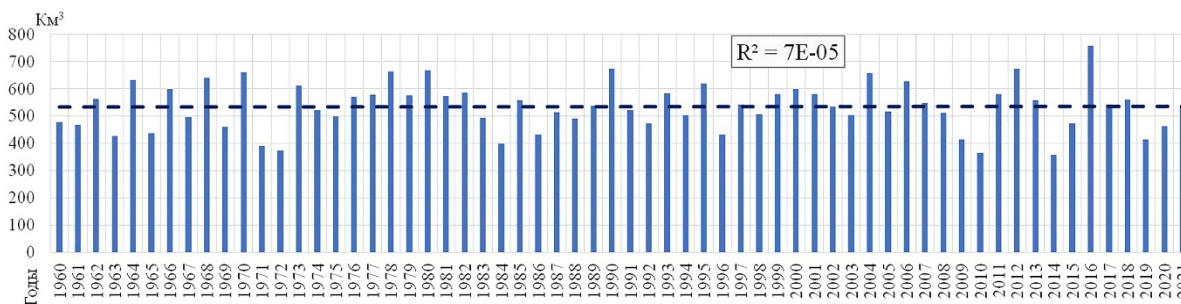


Рис. 1 Динамика сумм осадков, выпадающих за гидрологический год, осредненных по территории области за 1960-2021 гг.

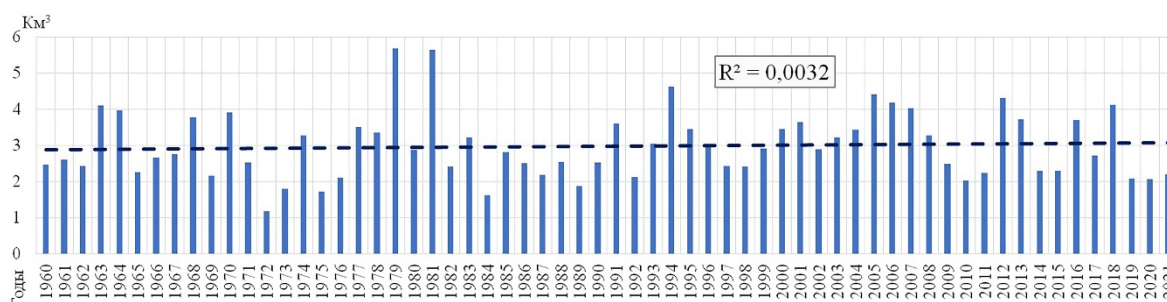


Рис. 2 Динамика суммарного объёма стока основных рек области за гидрологический год за 1960-2021 гг.

Анализируя Рис. 1 и 2, можно отметить малозаметные изменения обоих параметров при ретроспективном рассмотрении. Наибольшая сумма осадков за гидрологический год по области отмечалась в 2016 году с 758,7 мм. Наименьшая сумма

осадков за гидрологический год по области фиксировалась в 2014 году и составляла 356,4 мм. Наибольший суммарный объём стока основных рек области за изученный период составил 5,7 км³ в 1979 году. Наименьший суммарный объём стока основных рек области зафиксирован в 1972 году – 1,2 км³. Линии тренда не показывают каких-либо значительных изменений данных параметров.

Парный корреляционный анализ между значениями годовых сумм атмосферных осадков, осреднённых по территории области и суммарным годовым стоком основных рек региона при помощи коэффициента корреляции Спирмена показал слабую корреляционную связь. Значение коэффициента корреляции – 0,484. Далее был проведен парный корреляционный анализ между различными кривыми сглаживаниями рассматриваемых параметров (Табл.). Хотя в метеорологии и принято рассматривать кривую 11-летнего сглаживания, в данной работе было решено рассмотреть кривые сглаживания от двухлетнего до одиннадцатилетнего. Из Табл. видно, что значения коэффициента корреляции кривых сглаживания от 2-летнего до 6-летнего говорит о корреляционной связи средней силы. А коэффициенты корреляции кривых сглаживания от 7-летнего до 11-летнего демонстрируют сильную корреляционную связь. По результатам анализа было установлено, что наибольшее значение коэффициента корреляции получено при анализе кривых 8-летнего сглаживания (Рис. 3).

Табл. Значения коэффициента корреляции Спирмена между различными кривыми сглаживаниями суммарного объема стока основных рек области и сумм осадков, осредненных по территории области, за гидрологический год за 1960-2021 гг.

Года сглаживания	Коэффициент корреляции (r)
2-летнее сглаживание	0,690
3-летнее сглаживание	0,663
4-летнее сглаживание	0,632
5-летнее сглаживание	0,683
6-летнее сглаживание	0,683
7-летнее сглаживание	0,762
8-летнее сглаживание	0,791
9-летнее сглаживание	0,785
10-летнее сглаживание	0,770
11-летнее сглаживание	0,751

По результатам работы было установлено следующее. Во-первых, при ретроспективном рассмотрении не обнаружено каких-либо статистически значимых трендов изменения значений суммарного объёма стока основных рек региона и сумм атмосферных осадков, осреднённых по территории Тамбовской области. Во-вторых, по результатам парного корреляционного анализа между данными параметрами была показана корреляционная связь слабой силы. В-третьих, проведённый парный корреляционный анализ между различными кривыми сглаживания суммарного объема стока основных рек области и сумм осадков, осредненных по территории региона, за гидрологический год продемонстрировал среднюю (с двухлетнего до шестилетнего) и сильную (с семилетнего до одиннадцатилетнего) корреляционную связь. Наибольший коэффициент корреляции отмечен между кривыми восьмилетнего сглаживания. В целом, результаты говорят о наличии корреляционной связи между стоком рек и объёмом выпадающих атмосферных осадков на территории Тамбовской области, однако, очевидно, и влияние иных климатических и географических факторов, которые не были изучены в данной работе.

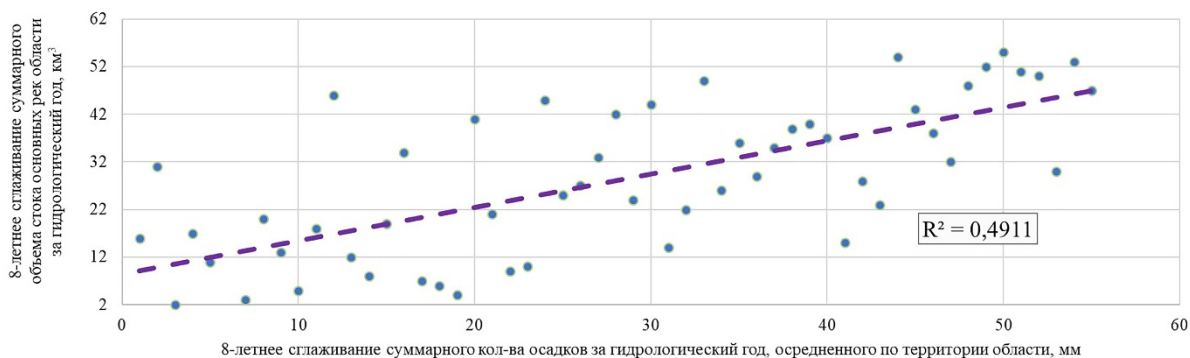


Рис. 3 Парный корреляционный анализ между значениями кривых 8-летнего сглаживания рядов данных суммарного объёма стока основных рек области и годового количества осадков, осреднённых по территории региона за гидрологический год, за 1960-2021 гг.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Тамбовскому центру по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды за предоставленные архивные материалы, которые легли в основу настоящей работы.

Acknowledgments

The authors are grateful to the Tambov Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring for providing archival materials, which formed the work basis.

Список литературы

1. Дмитриева В.А., Сушков А.И., Закусилов В.П. Климатическая обусловленность современных гидроэкологических процессов в речных потоках бассейна Верхнего Дона // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2022. № 2. С. 118-127. DOI 10.17308/geo.2022.2/9318.
2. Дудник Н.И. Природные ресурсы и ландшафты Тамбовской области: Учеб. пособие для студентов и учителей географии. Тамбов: ТГПИ, 1980. 144 с.
3. Дудник С.Н. Буковский М.Е., Галушкина Н.А. Климатические региональные и сезонные изменения на территории Тамбовской области // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2013. № 3(47). С. 141-149.
4. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Метеорологические наблюдения на станциях. Ленинград: Гидрометиздат, 1985. 301 с.
5. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Ленинград: Гидрометеиздат, 1990. Выпуск 28. Калужская, Тульская, Тамбовская, Брянская, Липецкая, Орловская, Курская, Воронежская, Белгородская области, Ч. 1-6. 366 с.
6. Семенова А.В., Буковский М.Е. Зависимость пика весеннего половодья в верховьях реки Цны от климатических факторов // Географический вестник. 2022. № 1(60). С. 87-99. DOI 10.17072/2079-7877-2022-1-87-99.
7. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. Учебник. Специальность «Гидрология» направления подготовки «Гидрометеорология». - СПб.: изд. РГГМУ. 2007. 279 с.
8. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200035578?ysclid=lld136sw8o256434605>. Дата обращения: 15.07.2023 г. Режим доступа: свободный.

9. Справочник по климату СССР. Ленинград: Гидрометеиздат, 1968. Вып. 28. Тамбовская, Брянская, Липецкая, Орловская, Курская, Воронежская и Белгородская области, Ч. 4. Влажность воздуха, атмосферные осадки, снежный покров. 256 с.

10. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова; Росгидромет. Санкт-Петербург: Научные технологии, 2022. 676 с.

11. Чернова М.А., Буковский М.Е., Дудник В.В. Оценка изменения летнего стока рек волжского бассейна на территории Тамбовской области за 65 лет // Климатические изменения и сезонная динамика ландшафтов: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Екатеринбург, 22–24 апреля 2021 года. Екатеринбург: [б.и.], 2021. С. 117-123. DOI 10.26170/KFG-2021-16.

12. Чернова М.А., Дудник С.Н., Буковский М.Е. Изменчивость водного режима рек донского бассейна // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2020. № 3. С. 40-48. DOI 10.17308/geo.2020.3/3022.

13. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.

Система среднесрочного прогнозирования стока рек России

Н.К. Семенова^{1,2}, Ю.А. Симонов¹, А.В. Христофоров¹

¹Гидрометцентр России, Москва

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва
snkone132@mail.ru

Аннотация. В данной работе разработана система среднесрочных прогнозов речного стока. Методология основана на комплексном использовании концептуальной модели формирования стока HBV-96 и статистических методов. В качестве входных данных для гидрологической модели использовались данные системы численного прогнозирования погоды COSMO-Ru с заблаговременностью до 3 суток. Разработанная система была внедрена для более чем 500 гидрологических постов, расположенных по всей России. При разработке системы был сформирован архив необходимых гидрометеорологических данных (уровень воды, расход, температура воздуха и осадки) за период с 2010 по 2019 год, а также вспомогательная информация о характеристиках ландшафта. Результаты верификации методики показали хорошее качество для большинства речных водосборов. Методика прогнозирования была реализована как часть автоматизированной системы прогнозирования характеристик стока рек с компонентом GIS-Web для распространения прогнозных продуктов конечным пользователям через веб-приложение.

Ключевые слова: речной сток, гидрологическая модель, система оперативного прогнозирования.

Medium-range streamflow forecasting system in Russia

N.K. Semenova^{1,2*}, Yu.A. Simonov¹, A.V. Khristoforov¹

¹Hydrometcenter of Russia, Moscow, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
snkone132@mail.ru

Abstract. The system for medium-range streamflow forecasts has been developed. The methodology is based on the integrated use of the conceptual model of HBV-96 runoff formation and statistical methods. Outputs of the COSMO-Ru system are being used as input to hydrological models with a lead time of up to 3 days. The developed system has been implemented for more than 500 hydrological gauges located throughout Russia. An archive of required hydrometeorological data (water level, discharge, air temperature and precipitation) for the period from 2010 to 2019, as well as ancillary information on landscape characteristics have been formed while development the system. The results of method verification showed good quality for a fairly large number of river catchments. Forecasting technique has been implemented as part of automated streamflow forecasting system with GIS-Web component for dissemination of forecast products to end-users via web-application.

Keywords: streamflow, hydrological model, operational forecasting system.

Введение

В настоящее время с развитием информационных технологий все чаще в практике оперативного гидрологического прогнозирования используются автоматизированные системы выпуска прогнозов характеристик речного стока. Данные системы включают в себя комплекс программ с использованием баз данных с архивной и оперативной гидрометеорологической информацией, различных физико-математических моделей формирования стока, а также веб-ГИС приложений для удобной визуализации и аналитики полученных прогнозов стока рек конечным пользователем.

Стоит отметить, что разработка автоматизированной системы существенно упрощается, а ее эффективность возрастает, если в основе лежит единая методика прогнозирования. Одним из таких примеров систем прогнозирования является разработанная в отделе речных гидрологических прогнозов Гидрометцентра России система краткосрочных и среднесрочных прогноза речного стока, в основе которой лежит метод экстраполяции гидрографа, при котором прогнозируемый расход или уровень воды определяется в зависимости от его значений за дату составления прогноза и за несколько предыдущих суток. [1; 2]. Данный метод был применен к 2776 речным створам, расположенным по всей территории страны. Не смотря на простоту метода (данный метод использует только гидрометрические наблюдения), он позволяет получать вполне удовлетворительные прогнозы с заблаговременностью до 10 суток для более чем 200 речных створов. Однако удовлетворительные результаты для прогнозов заблаговременностью до 10 суток были получены в основном для рек с достаточно большой площадью и малым уклоном водосбора.

В связи с этим была поставлена задача разработки методики прогноза расходов воды с использованием концептуальной модели формирования стока, которая бы учитывала ход метеорологических величин (осадков, температуры и т.д.). В настоящее время для прогнозирования стока рек с различной заблаговременностью используются такие модели прогноза погоды, как ICON, COSMO [3].

Материалы и методы исследования

В данной работе использовалась концептуальная модель формирования стока HBV-96 [4] и система краткосрочного численного прогноза погоды COSMO-Ru, основанная на использовании модели Консорциума по мелкомасштабному моделированию атмосферы (CONsortium for Small-scale MOdelling). В результате были рассчитаны прогнозы суточных расходов воды с заблаговременностью 1, 2 и 3 суток. Модель HBV-96 включает в себя 12 параметров и пять блоков, описывающих основные процессы формирования речного стока на водоразделе: динамику снежного покрова; транспирацию и испарение с водосборной поверхности; динамику влажности почвы; образование поверхностного, почвенного и грунтового стока; преобразование образующегося стока в русловую сеть.

В качестве объектов исследования было выбрано 590 различных водосборов, средняя площадь которых составила 71500 км². Период гидрометеорологических наблюдений составил 10 лет (с 2010 по 2019 гг.). Прогнозные метеорологические характеристики, используемые в качестве входных данных в модели HBV-96, были получены из системы регионального краткосрочного численного прогноза погоды COSMO-RU с шагом сетки 7 км. Прогнозные значения осадков и температуры интерполировались в точки с координатами метеостанций. Полученные значения объединялись с данными наблюдений на метеостанциях, после чего данные пересчитывались на суточный временной интервал. В результате метеорологические наблюдения и прогнозные значения усреднялись по водосборам.

Калибровка параметров модели HBV-96 была произведена на обучающей выборке, образованной данными гидрометеорологических наблюдения за период с 2010

по 2016 гг. В качестве целевой функции, используемой при оптимизации, был выбран коэффициент Нэша-Сэтклиффа. Для оптимизации параметров использовался алгоритм дифференциальной эволюции [5]. Алгоритм включает в себя следующие этапы:

1. Генерация начальной популяции. Случайным образом генерируется набор параметров модели (векторы значений).
2. Воспроизводство потомков. Для каждого вектора из исходной популяции («родителя») строится его вектор-потомок по специальному алгоритму.
3. Отбор потомков. Отбор происходит на каждом шаге работы алгоритма. После генерации вектора-потомка проводится сравнение целевой функции для него и для «родителя». В новую популяцию добавляется тот из векторов, на котором целевая функция достигает наименьшего значения.

В результате работа алгоритма повторяется до тех пор, пока не выполняется изначально заданное условие сходимости. Для повышения точности прогнозов был применен метод коррекции, основанный на автокорреляции ошибок [6].

Для проверки методики прогнозирования на независимой выборке в качестве контрольной выборки использовались данные гидрологических наблюдений за период с 2017 по 2019 гг. Расхождение между фактическими значениями расходами воды $Q(t)$ и прогнозами, выдаваемыми по модели, $\tilde{Q}(t)$ характеризуется критерием эффективности Нэша-Сатклиффа:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [Q(t) - \tilde{Q}(t)]^2}{\sum_{t=1}^n [Q(t) - \bar{Q}]^2},$$

где суммирование ведется по всему периоду наблюдений, \bar{Q} – среднее значение расходов воды за рассматриваемый период. Помимо прогнозов, полученных с использованием вышеупомянутой модели и общей методики с заблаговременностью $\Delta t = 1, 2, 3$ дня, расчет суточных расходов проводился с использованием наблюдаемых значений суточной температуры воздуха и осадков, который можно интерпретировать как прогноз с нулевой заблаговременностью ($\Delta t = 0$). Используемая коррекция модельных расчетов также позволят повысить качество прогнозов суточного расхода. Результаты верификации представлены в Табл.

Табл. Среднее значение коэффициента Нэша-Сатклиффа для заблаговременностей 1, 2 и 3 суток.

	$\Delta t = 0$	$\Delta t = 1$	$\Delta t = 2$	$\Delta t = 3$
До коррекции	0.680	0.669	0.636	0.621
После коррекции	0.955	0.891	0.836	0.792

Результаты и выводы

В данной работе разработана система прогнозов речного стока заблаговременностью 3 суток с использованием концептуальной модели формирования стока HBV-96 и системы краткосрочного численного прогноза погоды COSMO-Ru. Дополнительная коррекция прогнозов расходов воды, основанная на автокорреляции ошибок, позволила сильно повысить качество прогноза. Результаты проверки на независимой выборке показали, что разработанная методика позволяет давать хорошие и удовлетворительные прогнозы суточного стока для большого количества водосборов рек, расположенных в различных регионах страны. Таким образом, предложенную методику можно использовать в рамках автоматизированной системы оперативного среднесрочного прогноза стока рек в России.

Разработанная методика прогнозирования на данный момент реализовывается с применением технологий создания баз данных и с использованием ГИС-веб-технологий

для создания приложения для конечного пользователя. В частности, для проектирования баз данных использовались инструменты PostgreSQL, находящиеся в свободном доступе и позволяющие создать целостную структуру гидрометеорологических данных, необходимую для описываемой методики. Часть средств передачи прогностической продукции пользователям была создана с использованием серверной версии ArcGIS, а также инструментов программирования веб-приложений. Для автоматизации методики расчета и прогнозирования суточного стока для изучаемых речных бассейнов в оперативном режиме разработана компьютерная программа на языке программирования Python. Пример работы данного ГИС-веб-приложения представлен на Рис.

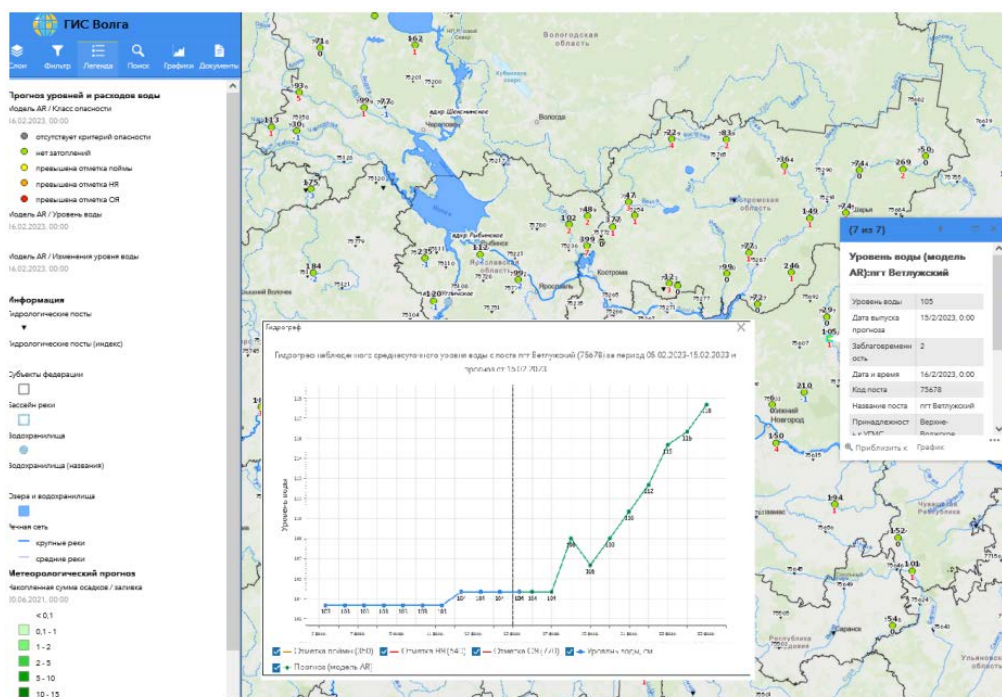


Рис. Пример работы веб-приложения с представлением прогностической продукции для конечных пользователей.

В разрабатываемом ГИС-веб-приложении предусмотрена возможность проверки точности прогнозов, при этом осуществляется графическое совмещение фактических и прогнозных данных об уровне воды. Кроме того, можно объединить спутниковые данные с наземной гидрологической информацией с помощью графического интерфейса. В настоящее время данная система проходит тестирование. Основная цель системы – поддержка принятия решений гидрологами-синоптиками по выдаче официального прогноза и предупреждений о неблагоприятных паводковых условиях на реках.

Благодарность.

Работа выполнена в рамках темы 1.1.9. плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 годы.

Acknowledgments

The work was carried out as a part of NITR Roshydromet project 1.1.9 in 2020 – 2024.

Список литературы

1. Борщ С.В., Колий В.М., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Прогнозирование стока рек России методом экстраполяции гидрографа // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2021. – № 2(380). – С. 77-94.
2. Борщ С. В., Колий В. М., Семенова Н. К., Симонов Ю. А., Христофоров А. В. Возможность прогнозирования стока рек России методом экстраполяции гидрографа в зависимости от характеристик их водосборов. — Гидрологические исследования и прогнозы, 2021, № 3 (381), с. 115—130.
3. Wetterhall, F., Modigliani, U., Moschini, F., Kasic, B., and Ferri, S.: Creating a coupled multi-model hydrometeorological forecasting and decision support system, EMS Annual Meeting 2022, Bonn, Germany, 5–9 Sep 2022, EMS2022-222.
4. G. Lindström, B. Johansson, M. Persson, M. Gardelin, S. Bergström, Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model, Journal of Hydrology 201 (1-4), 1997, p.272–288.
5. K. Price, R. Storn, J. Lampinen. Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization. Springer, 2005.
6. Борщ С. В., Симонов Ю. А., Христофоров А. В., Методы коррекции прогнозов речного стока. — Гидрологические исследования и прогнозы, 2020, № 1 (375), с. 162-17.
7. Nash, J. E., Sutcliffe, J. V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles". Journal of Hydrology. 10 (3), 1970, p. 282–290.

Анализ гидрологических условий как основа для выполнения прогноза развития русловых деформаций на примере реки Амур

О. А. Серова^{1*}, М.С. Хамитов¹, Н. С. Бакановичус², А. А. Лялина², А. А. Максимова²,
Д. Д. Тесленко², А. В. Пучкарюс²

¹АО «Транснефть – Подводсервис», Нижний Новгород, Россия

²АО «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б. Е. Веденеева», Санкт-Петербург, Россия

SerovaOA@tps.transneft.ru

Аннотация. Для прогнозирования русловых процессов на перспективу наиболее актуальным вопросом в области проектирования подземных коммуникаций через водные преграды является ретроспективный полнообъемный анализ гидрологических условий.

Для возможности принятия обоснованных инженерных решений с целью предотвращения размыва дна в районе устройства подземных коммуникаций через водные преграды совместно со специалистами АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» выполнен прогноз развития русловых деформаций участка р. Амур, которому предшествовал комплекс работ по сбору, систематизации и анализу требуемых исходных данных.

Ключевые слова: гидрологическая характеристика, русловые процессы, деформация русла, переформирование русла, размыв, аккумуляция наносов.

Analysis of hydrological conditions as a basis for forecasting the development of channel deformations on the example of the Amur River

Olga A. Serova^{1*}, Maxim S. Khamitov¹, Natalya S. Bakanovichus², Anna A. Lialina², Anna A. Maksimova², Daniil D. Teslenko², Alena V. Puchkaryus²

¹Transneft UW Service, JSC, Nizhny Novgorod, Russian Federation

²Vedeneev All-Russia Research Institute of Hydraulic Engineering, St. Petersburg, Russian Federation

SerovaOA@tps.transneft.ru

Abstract. For forecasting channel processes in the future, the most relevant issue in the field of designing underground utilities through water barriers is a retrospective full-volume analysis of hydrological conditions.

For the possibility of making reasonable engineering decisions to prevent bottom scouring in the area of underground utilities through water obstacles forecast of channel deformation development in the Amur River section has made jointly with specialists from VNIIG named after B.E. Vedeneyev. The performed forecast has preceded by a set of works on collection, systematization and analysis of the required initial data.

Keywords: hydrological characterization, channel processes, channel deformation, channel reformation, scour, sediment accumulation.

Введение

Сбор актуальных и ретроспективных исходных данных, их анализ, включая выбор и обоснование сценарных гидрологических условий на прогнозный период является первостепенной и важной комплексной задачей для выполнения численного моделирования русловых деформаций и представления физического поведения исследуемого процесса в математическом виде.

На исследуемом участке расположен подводный переход магистрального трубопровода «Восточная Сибирь – Тихий океан» (ППМТ «ВСТО – II») пересекает реку Амур в её нижнем течении на 913 км от устья, который состоит из основной и расположенной в 0,5 км ниже по течению резервной ниток.

Для возможности принятия обоснованных инженерных решений с целью предотвращения размыва дна в районе трассы прохождения подземных коммуникаций выполнен прогноз развития русловых деформаций р. Амур, которому предшествовал комплекс работ по сбору, систематизации и анализу требуемых исходных данных.

Целью настоящей статьи является освещение вопросов:

- актуализации расчётных гидрологических характеристик р. Амур на исследуемом участке, включая анализ многолетней гидрологической цикличности;
- ретроспективного анализа переформирований русла р. Амур на исследуемом участке, который выполнялся на основе сбора и систематизации данных предшествующих лет и современных полевых инженерно-гидрографических и инженерно-гидрологических изысканий; ретроспективного анализа космических снимков.

Анализ многолетней гидрологической цикличности

Важной гидрологической характеристикой является многолетняя гидрологическая цикличность, анализ которой необходим для составления вариантных сценариев при проведении численного моделирования прогноза русловых деформаций на перспективу. Такой анализ проведён на основе многолетних данных наблюдений в створе гидрологического поста р. Амур – г. Хабаровск (г. ст.), на Рис. 1 представлены совмещённые хронологические графики характерных годовых расходов воды.

По результатам рассмотрения хронологического графика обнаружена цикличность продолжительностью около 25-32 лет. Наиболее заметно цикличность прослеживается при анализе максимальных расходов воды, которые, в основном, и определяют направленность и интенсивность руслоформирующих процессов.

Анализ 124-летнего периода (с 1896 по 2019 гг.) позволяет отметить следующие аспекты:

- Рассматриваемый период включает четыре завершённых и один неполный макроцикл.
- В каждом макроцикле наблюдается несколько лет с максимальными расходами воды более 30 000 м³/с.
- Заключительная часть каждого из четырёх завершённых макроциклов исполнялась сравнительно небольшими максимальными срочными расходами воды, которые не превышают среднее многолетнее значение 24 100 м³/с.
- Рассмотрение заключительного 10-летия в конце каждого из четырёх макроциклов свидетельствует о том, что превышение среднего многолетнего максимального срочного расхода воды наблюдалось для первого макроцикла – 1 раз (в 1917 г.), для второго макроцикла – 6 раз (1945 – 1948 гг., 1951 г., 1953 г.); для третьего макроцикла – 3 раза (1971 – 1973 гг.), для четвёртого макроцикла – 1 раз (в 2004 г.).

Анализ многолетней гидрологической цикличности позволит сформировать сценарии гидрологических условий для более достоверного прогноза развития русловых деформаций.

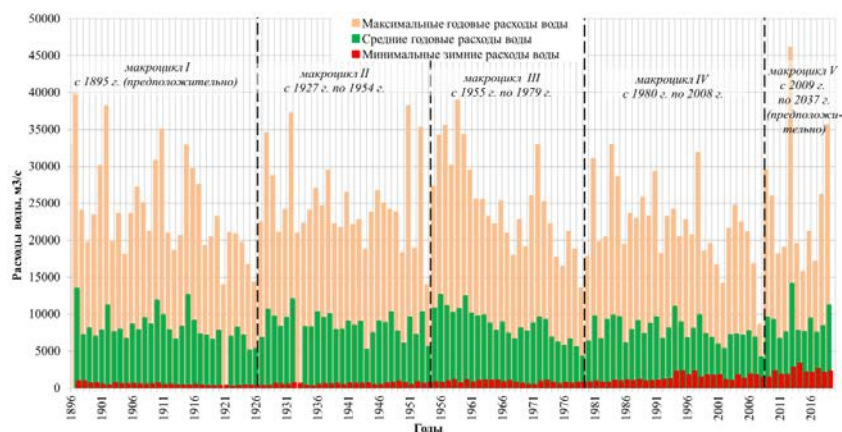


Рис. 1 Совмещённые хронологические графики характерных годовых расходов воды р. Амур – г. Хабаровск (г. ст.).

Анализ перестроений русла

Река Амур в районе исследуемого участка имеет широкую пойму (до 20 км), которую пересекают множество проток, старичных озёр различной формы и глубины, берега низкие. На исследуемом участке река образует чередующиеся сужения и расширения, обусловленные геологическим строением территории. Об общей неустойчивости главного русла р. Амур и его протоков, а также сложном ходе деформаций русла и поймы реки свидетельствует сочетание русловых процессов, которые, по типизации ГГИ, относятся к пойменной многорукавности, на фоне которой на отдельных участках наблюдается русловая многорукавность и побочный тип руслового процесса.

Для таких типов руслового процесса характерны большая подвижность аккумуляций наносов в русле в виде перемещения мезо- и микроформ, перераспределение стока по отдельным рукавам водотока, что и обуславливает создание общей неустойчивости главного русла и его проток. На Рис. 2 представлены фотоматериалы исследуемого участка, сделанные во время инженерных изысканий в 2020 г., на которых видны, сползающие, обрушившиеся, сложенные легкоразмываемыми грунтами берега.

Важной составляющей при анализе руслового процесса является количественная оценка темпов и направленности основных перестроений. В настоящее время наличие разновременных космических снимков позволяет более тщательно подходить к анализу русловых процессов.

При определении плановых деформаций подбирались разновременные космические снимки примерно одинаковой водности (1987, 2001, 2014 и 2019 гг.) и приводились к одному масштабу. По результатам оцифровки контуров элементов русла и поймы получены совмещённые схемы их смещения (Рис. 3). Это позволило вычислить количественные значения плановых деформаций.

Ретроспективный анализ процессов деформации русла свидетельствует о том, что за рассмотренный период времени с 1987 г. по 2020 г. на исследуемом участке отмечаются следующие значимые перестроения:



Рис. 2 Фотографии исследуемого участка, сделанные во время инженерных изысканий в 2020 г. АО «Транснефть – Подводсервис».

- интенсивные размывы, скорость которых составляет 5-6 м/год, произошли на участках левого пойменного берега от истока протоки Пчелиной до 879 км с.х. и 867-871 км с.х., на участке правого пойменного берега – от 871 км с.х. до истока протоки Ноевской;
- вследствие переформирования рельефа дна на участке прохождения подземных коммуникаций сместилась ось потока, что привело к полному размыву острова у правого берега ниже по течению;
- на 869 км с.х. закрепился крупный остров площадью 2,5 км²;
- на участке 888-891 км с.х. развилась протока Прямая: если в начале данного периода ширина её русла на этом участке составляла 370-420 м, то к концу – уже 420-550 м. По данным инженерных изысканий, правый рукав р. Амур, в который впадают протоки Хохлацкая и Прямая, в настоящее время принимает около 28 % стока (в том числе 17 % – по протоке Прямая и 11 % – по протоке Хохлацкая), скорости течения в нём не уступают скоростям в главном русле. При сохранении существующей тенденции развития русловых деформаций на рассмотренном участке в будущем правый рукав будет принимать больший объём стока, что приведёт к ещё большему размыву правого пойменного берега, а также ухвостья о. Изоляторского и его правого берега.

О масштабах переформирования русла р. Амур на рассматриваемом участке также свидетельствуют значительные изменения положения судового хода, который проанализирован по картам лоций 1899 г., 1941 г., 1996 г. и 2019 г. На участке прохождения подземных коммуникаций за рассмотренный период времени судовой ход, совпадающий на этом участке с тальвегом, диаметрально поменял своё положение, принимая очертание так называемой «восьмёрки».

Анализ тенденций, которые наблюдались за период 1899-2020 гг., позволяют полагать, что в перспективе начнётся и будет развиваться обратный процесс – создания аккумуляционной зоны у правого берега с одновременным смещением глубоководной зоны – к левому берегу.

Кроме плановых деформаций русла р. Амур рассмотрены глубинные (вертикальные деформации). Дно и берега реки на исследуемом участке сложены легкоразмываемыми грунтами, продукты размыва в виде донных гряд активно перемещаются по руслу, обуславливая переформирования его рельефа. Об этом свидетельствует изменение положения тальвега, которое было проанализировано за период 2008-2020 гг. и показало его оттеснение к левому берегу, при этом в створе максимального смещения (875,5 км с.х.) отметки дна понизились на 2,3 м.



Рис. 3 Фрагмент схемы плановых деформаций исследуемого участка русла р. Амур, линии бровок поймы и островов по состоянию на 1987 г. и 2019 г.

Кроме того, проанализированы результаты съёмки рельефа дна русла р. Амур в исследуемом районе в 2009, 2013 и 2020 гг. С использованием программного комплекса ArcMap выполнено сравнение топографических планов русла различных лет путём определения разницы отметок рельефа за различные годы, что позволило визуализировать области намывов и размывов на изучаемом участке русла (Рис. 4). Количественная оценка произошедших вертикальных деформаций русловой части реки выполнялась путём построения поперечных разрезов, два из которых, для примера, представлены на рис. 9.

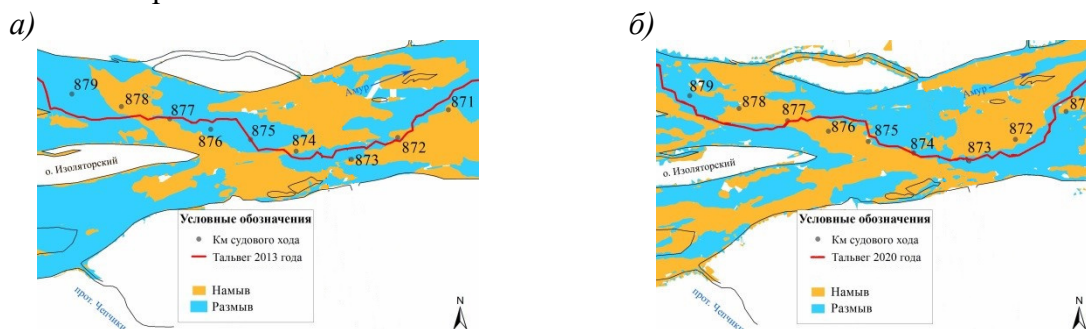


Рис. 4 Схема размывов и намывов на исследуемом участке, произошедших за период: *а* – 2009-2013 гг.; *б* – 2013-2020 гг.

Анализ полученных результатов динамики русловых деформаций, свидетельствует о том, что области намывов сместились вниз по течению, области размывов выше по течению от расположенных подземных коммуникаций увеличились по площади и получили распространение у левого берега, ниже по течению – у правого берега. Так, в период 2009-2013 гг. в устье о. Изольторского происходил намыв, максимальная величина его составила 6 м, а в период 2013-2020 гг. здесь уже образовалась зона размыва, максимальная величина которого составила около 4 м. Зона намыва на этом участке за рассматриваемый период сместилась вниз по течению от устья острова примерно на 750 м величина намыва в этом месте составила 4-5 м.

В районе 874 км с.х. у правого берега также прослеживается смещение области намыва вниз по течению и вглубь русла на 400 м, величина намыва увеличилась с 3 м до 4 м. У правого берега, в районе 874-875 км с.х., за период 2013-2020 гг. образовалась область размыва, величина которого составила 1-6 м.

По данным исследований прошлых лет, значительным переформированием русло р. Амур в районе размещения подземных коммуникаций подвергалось в период между 2008 и 2012 гг., вследствие смещения глубоководной зоны вправо на 280-300 м.

На поперечном разрезе в створе прохождения подземных коммуникаций (Рис. 5) отчетливо прослеживается сохранившаяся тенденция смещения глубоководной зоны к правому берегу в период 2013-2020 гг. Как уже отмечалось ранее, при анализе плановых деформаций, на месте данной плёсовой ложины до 2017 г. существовал остров, который полностью размыт в условиях изменившейся структуры потока. Таким образом, максимальная величина изменения отметки рельефа в этом месте составила 15 м.

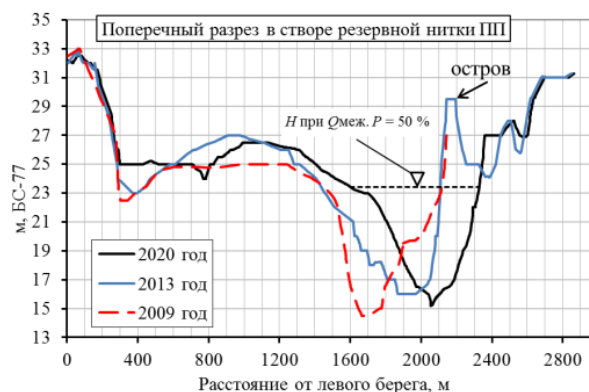


Рис. 5 Поперечный разрез в створе подземных коммуникаций.

Все перечисленные переформирования русла за период 2009-2020 гг. изменили поток таким образом, что его ось стала искривляться, больше тяготея к пойменным берегам: на участке 876 км с.х. – к левому берегу и на участке 872,5 км с.х. – к правому. Этим можно объяснить увеличение зон размывов именно у берегов указанных участков.

Выводы

Комплексные исследования русловых деформаций посредством ретроспективного анализа служат основой для выполнения гидрологически обоснованного прогноза их развития на перспективу. В результате комплексного анализа гидрологических условий р. Амур в исследуемом, описанного в статье, получили сведения, которые использовались при проведении в 2020 г численного моделирования русловых процессов р. Амур на перспективу 10 лет, а именно:

- гидрологическая характеристика участка моделирования, составленная с использованием сведений по ближайшему гидрологическому посту на р. Амур в г. Хабаровск с учётом боковой приточности. При этом использовались данные гидрологических наблюдений до 2019 г. включительно. Данные результаты использовались для составления вариантных сценариев при проведении численного моделирования;
- подробный анализ плановых (горизонтальных) и глубинных (вертикальных) деформаций, с их количественной оценкой. Данные результаты использовались для верификации и калибровки математической модели.

Список литературы

1. Маккавеев, Н.И. Русло реки и эрозия в её бассейне / Н.И. Маккавеев. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 346 с.
2. Маккавеев, Н.И. Русловые процессы / Н.И. Маккавеев, Р.С. Чалов. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 264 с.
3. Борщенко Е. В. Морфодинамика русел рек бассейна Амура (Российская часть) и её трансформация под влиянием естественных и антропогенных факторов, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. – Москва, 2013. – 221 с.

Особенности построения системы регламентации отведения взвешенных веществ в поверхностные водные объекты на основе учета стохастического характера их динамики

Т.Н. Синцова*, А.П. Лепихин

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия
tanya_sinzova@mail.ru*

Аннотация. Вся действующая в настоящее время система регламентации основывается на допущениях, что физические или химические показатели качества воды однозначно определяются совокупностью внутриводоемных и внешних антропогенных процессов. Однако динамика параметров, определяющих состояние водного объекта описывается, как правило, достаточно сложными случайными процессами. Поэтому оценка актуального состояния водного объекта и их возможных экстремальных значений может рассматриваться только с определенной погрешностью. Соответственно, нормативы допустимых воздействий, для того чтобы они были эффективны, должны строиться с учетом данных погрешностей измерений. Наиболее ярко стохастическая природа показателей качества воды проявляется в регламентации взвешенных веществ. Предложена альтернативная система регламентации взвешенных веществ на основе использования автоматических измерительных комплексов, на основе оценки мутности воды через изменение ее оптической плотности. Указаны необходимые условия для обеспечения корректности функционирования системы регламентации отведения взвешенных веществ: интенсивность естественного изменения транспортирующей способности потока, определяемая его гидрологическим режимом, должна быть медленнее изменения техногенных факторов, определяющих содержание взвешенных веществ в отводимых стоках, а сами взвешенные вещества должны быть химически нейтральными, не участвующими в транспортировке гетерофазнонеконсервативных веществ, при этом размеры частиц взвешенных веществ должны быть однородны на всем рассматриваемом участке водотока.

Ключевые слова: взвешенные вещества, регламентация, стохастика, пороговые показатели.

Features of building a system for regulating the discharge of suspended solids into surface water bodies on the basis of taking into account the stochastic nature of their dynamics

T.N. Sintsova*, A.P. Lepikhin

*Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia
tanya_sinzova@mail.ru*

Abstract. The entire current regulation system is based on the assumptions that physical or chemical indicators of water quality are unambiguously determined by a combination of internal and external anthropogenic processes. However, the dynamics of the parameters that determine the state of a water body is usually described by rather complex random processes. Therefore, the assessment of the current state of the water body and their possible extreme values can only be considered with a certain error. Accordingly, the

standards for permissible impacts, in order to be effective, must be built taking into account these measurement errors. The stochastic nature of water quality indicators is most clearly manifested in the regulation of suspended solids. An alternative system for the regulation of suspended solids based on the use of automatic measuring systems, based on the assessment of water turbidity through a change in its optical density, is proposed. The necessary conditions for ensuring the correct functioning of the system for regulating the removal of suspended solids are indicated: the intensity of the natural change in the transporting capacity of a stream, determined by its hydrological regime, should be slower than the change in technogenic factors that determine the content of suspended solids in the discharged effluents, and the suspended solids themselves must be chemically neutral, not participating in the transport of heterophase non-conservative substances, while the particle sizes of suspended solids must be uniform throughout the considered section of the watercourse.

Keywords: suspended solids, regulation, stochastics, threshold indicators.

Введение

Оценка актуального состояния и возможных экстремальных характеристик любого физического или химического показателя качества воды водных объектов может рассматриваться только с определенной погрешностью, соответственно, для того чтобы нормативы качества были эффективны, необходимо, чтобы они учитывали данную погрешность с требуемой надежностью.

Так как содержание взвешенных веществ в наибольшей мере определяется гидрологическим режимом рассматриваемого водотока, являющимся достаточно сложным случайным процессом, их регламентация является наиболее ярким примером невыполнения данных требований. Значительное разнообразие факторов, определяющих в водотоке содержание взвешенных веществ, их очень существенную внутригодовую изменчивость, обусловило для данного поллютанта принципиально отличную схему регламентации. Их регламентация строится не на некоторых пороговых значениях, единых для всех водных объектов, а на основе нормирования локальных изменений качества воды между фоновым и контрольным створами. Согласно [4] содержание взвешенных наносов в контрольном створе водного объекта не должно превышать более чем на 0.25 мг/л по сравнению с фоновым створом в водных объектах первой категории и на 0.75 мг/л – в водных объектах второй категории. Однако, согласно нормативным документам, средняя квадратическая погрешность определения взвешенных веществ [5; 6] составляет 10 мг/л. Возникает вопрос, как должна быть построена система производственного мониторинга, которая позволяла бы с требуемой надежностью гарантировать выполнимость данных требований. Парадокс ситуации заключается в том, что, с одной стороны, С.Н. Черкинский еще в 1947 г. указывал на низкую обоснованность данных нормативов, отмечал, что они основывались на материалах Английской Королевской комиссии по пресноводному рыбоводству 1907 г. [8], а с другой стороны, взвешенные вещества являются наиболее распространенным, наиболее часто регламентируемым компонентом загрязнения отводимых сточных вод, так как взвешенные вещества, кроме непосредственного воздействия на гидробионтов могут выступать как активный транспортер гетерофазнонеконсервативных поллютантов. Однако ролью взвешенных веществ в переносе данных поллютантов можно пренебречь, если будет выполнено одно из следующих неравенств [1]:

$$\left(a_i \frac{S}{\rho_s} \right) \ll C_{\text{фон}i}, \quad (1)$$

$$\left(a_i \frac{S}{\rho} \right) \ll C_{\text{ПДК}i},$$

где a_i – концентрация подвижных форм i – поллютанта на взвешенных частицах;
 S – концентрация рассматриваемых взвешенных наносов;
 ρ_s – плотность материала взвешенных наносов;
 $C_{\text{фон}i}$ – естественное фоновое содержание i – ингредиента в воде водного объекта.

Материалы и методы

Существенный как практический, так и теоретический интерес представляют результаты статистической обработки колебаний мутности воды при различной частоте измерений в р. Каме (Камском водохранилище) в районе г. Березники. Данный участок представляет собой зону выклинивания Камского водохранилища. В то же время данный водный объект испытывает значительные нагрузки от активно разрабатываемого крупнейшего Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей (ВКМКС), а также он активно используется в водообеспечении промышленных предприятий этого комплекса.

Для анализа колебаний содержания взвешенных веществ использовались материалы как регулярных наблюдений на сети Росгидромета, так и собственных наблюдений с использованием измерительного комплекса Valeport MIDAS ECM. Его характеристика дается в [2].

Для оценки внутригодовой динамики содержания взвешенных наносов использовались материалы регулярных наблюдений Пермского ЦГМС – филиала ФГБУ «Уральское УГМС» на створе, в 150 м выше автодорожного моста через р. Каму, т.е. рассматриваемые взвешенные вещества сформировались в значительной мере под воздействием естественных факторов. Результаты их статистической обработки представлены в Табл.1.

Табл. 1 Статистические характеристики концентрации взвешенных веществ (мг/л) в р. Каме (Камское водохранилище) выше г. Березники при частоте измерений $\nu = 1/\text{мес}$ за период наблюдений Росгидромета 1974 – 2001 гг.

Название	Глубина, м	Среднее значение, $X_{\text{ср}}$	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент вариации, C_v	Коэффициент асимметрии, C_s	Экспесс, E_x
июль	9	15.578	11.743	0.754	1.382	0.059
сентябрь	9	7.706	4.109	0.533	-0.446	-0.703
октябрь	9	9.450	6.587	0.697	0.946	0.080
февраль	0.5	6.867	4.720	0.687	0.349	0.193
март	0.5	5.257	4.184	0.796	0.825	0.058

Как следует из Табл. 1, концентрации взвешенных веществ характеризуются значительной изменчивостью, сопоставимой с их средними измеренными значениями, при этом коэффициент вариации $C_v \sim 0.53-0.75$. Следует подчеркнуть, что значимая изменчивость взвешенных веществ, хотя и значительно меньшая, чем представленная в Табл. 1, фиксируется при значительно более краткосрочных наблюдениях при достаточно однородном гидрологическом режиме. В Табл. 2 представлены материалы измерений, выполненных с разной частотой измерений (ν) за 22.07.2021 г., 14.10.2022 г. ($\nu = 1/\text{с}$) и 13.09-14.09.2021 ($\nu = 12/\text{час}$). При такой высокой частоте измерений колебания мутности воды обусловлены турбулентными пульсациями.

Как следует из Табл. 2, колебания мутности воды характеризуются весьма существенными значениями коэффициентов асимметрии и эксцесса. Эти особенности колебаний мутности воды подтверждаются материалами измерений, выполненных в другие сроки (22.07.2021 г. и 14.10.2022 г.) с использованием одного и того же измерительного комплекса. Следует отметить, что существенная асимметрия

колебаний мутности воды сохраняется и при измерениях со значительно меньшей частотой измерений $\nu = 12/\text{час}$ и продолжительностью измерений $T_{\text{из}} \sim 1$ сут, выполненных 13-14.09.2021 г. с установкой прибора на глубине 10 м. При такой частоте измерений они вряд ли определяются только турбулентными пульсациями, вероятно важную роль в их формировании играют значительно более инерционные, когерентные структуры.

Табл. 2 Статистические характеристики мутности воды (FTU) в р. Каме (Камском водохранилище) в районе г. Березники для различных частот измерений.

Дата	Глубина, м	Частота измерений	Среднее значение, $X_{\text{ср}}$	Средне-квадратическое отклонение	Коэффициент вариации, C_v	Коэффициент асимметрии, C_s	Экссесс, E_x
22.07.2021 ¹	8	1/с	6.907	0.464	0.067	0.924	1.04
14.10.2022	7	1/с	6.659	0.502	0.075	1.132	2.07
13.09-14.09.2021	10	12/час	6.394	0.362	0.057	0.824	1.109

¹Измерения 22.07.2021 г. были выполнены при наличии существенной вертикальной плотностной стратификации водных масс.

Так как характерной особенностью пульсаций мутности воды является их значимая положительная асимметрия, соответственно, распределение показателей мутности воды в ее периферийных частях не описывается нормальным распределением (Рис. 1). Данная особенность, по-видимому, обуславливается значительной отрицательной плавучестью взвешенных частиц.

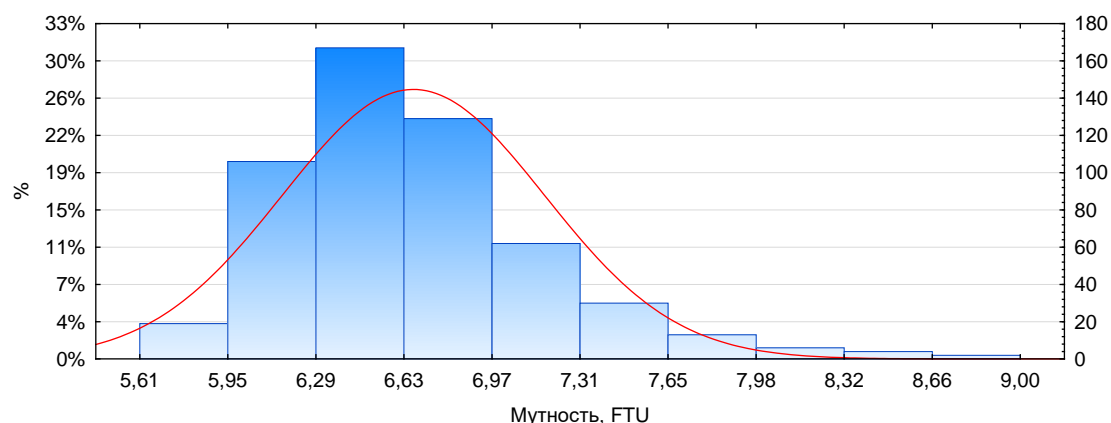


Рис. 1 График плотности вероятности распределения колебаний мутности воды в р. Каме (Камском водохранилище) в районе г. Березники 14.10.2022 г. ($\nu = 1/\text{с}$).

На наличие значительных тяжелых «хвостов» распределения взвешенных наносов указывалось в [3]. Значимое отличие распределения колебаний мутности воды, а соответственно, и взвешенных наносов от нормального распределения накладывает дополнительные трудности на порядок регламентации отведения взвешенных наносов.

При достаточной близости первых четырех статистических моментов показателей мутности воды при отсечке замеров с частотой 1/с и 12/час следует обратить внимание на принципиальное отличие их спектральных плотностей (Рис. 2-4), что вполне объяснимо принципиальным различием механизмов, обуславливающих их колебания.

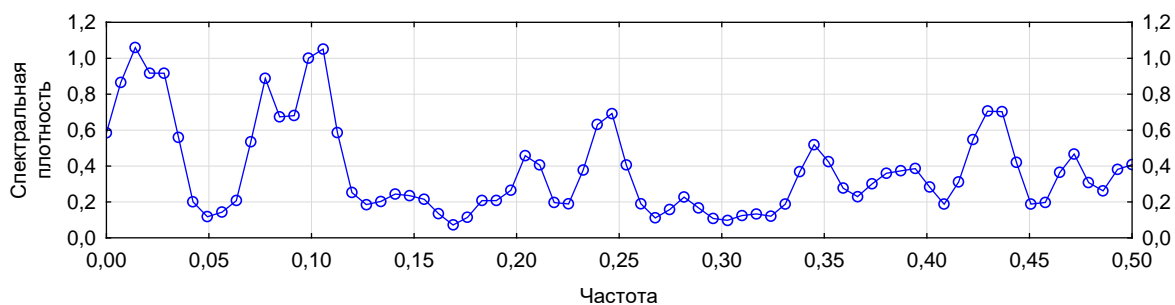


Рис. 2 График спектральной функции мутности в р. Каме (Камском водохранилище) в районе г. Березники за 22.07.2021 с 1-секундным интервалом.

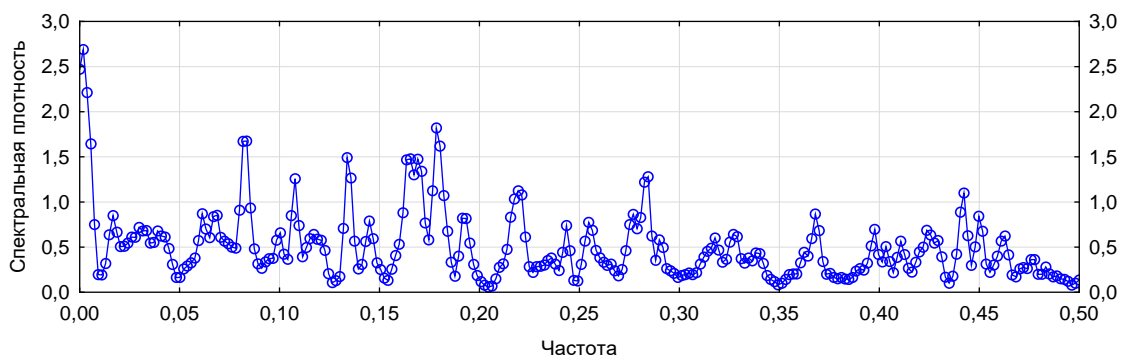


Рис. 3 График спектральной функции мутности в р. Каме (Камском водохранилище) в районе г. Березники за 14.10.2022 с 1-секундным интервалом.

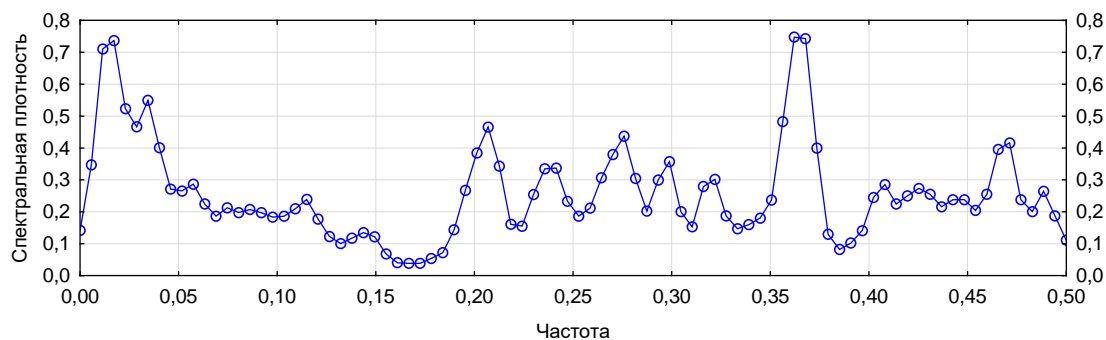


Рис. 4 График спектральной функции мутности в р. Каме (Камском водохранилище) в районе г. Березники за 13-14.09.2021 с 5-минутным интервалом.

Если короткопериодные колебания мутности обуславливаются турбулентными пульсациями с ярко выраженными характерными временными масштабами $T \sim 7$ с и в 40-50 с, то в суточных колебаниях отчетливо выделены колебания с периодом ~ 0.25 и 5 часов. Этот период 5 часов согласуется с характерным временем вертикального перемешивания водных масс, вследствие вертикальной турбулентной диффузии. Несложно видеть, что $T \propto H^2 / K_{zz}$, учитывая, что по многочисленным оценкам $K_{zz} = 0.07 \cdot V_* \cdot H$, где H – глубина потока, м; V_* – динамическая скорость, $V_* = g^{1/2} V_{cp} / C$, g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; V_{cp} – средняя скорость на глубине 10 м, C – коэффициент Шези, при $H \sim 10$ м, $V_{cp} = 0.532$ м/с, $C \sim 50$ $m^{1/2}/c$ имеем $T \sim 5$ часов. Анализ колебаний мутности воды с 20-минутной частотой наблюдений дается в работе [7].

Результаты и обсуждение. Выводы

Использование современных измерительных комплексов открывает принципиально новые возможности в решении вопроса регламентации отведения взвешенных веществ, являющихся наиболее распространенным компонентом загрязнения сточных вод. Сложность решения этой задачи определяется многофакторностью формирования динамики потоков взвешенных наносов, их стохастическим характером. Поэтому установление порога допустимого превышения содержания взвешенных веществ в контрольном створе над фоновым должно проводиться на основе анализа их дисперсий, обусловленных турбулентными процессами.

Введенная более 80 лет назад традиционная схема регламентации отведения взвешенных веществ не учитывает достаточно сложный стохастический характер их динамики. Некорректность постановки задачи обусловила их значительную внутреннюю противоречивость. Для обеспечения корректности функционирования данной схемы регламентации необходимо выполнение следующих условий:

- транспортирующая способность потока, определяющаяся его гидравлическим режимом, должна быть равномерна на участке от фонового до контрольного створа, а различие во времени отбора проб ΔT в этих створах должно быть существенно меньше времени добегаания между ними. При этом для обеспечения однородности рядов по содержанию взвешенных веществ в водном объекте должна обеспечиваться однородность их гидрологического режима;
- взвешенные вещества должны представлять собой химический нейтральный поллютант, не участвующий в транспортировке гетерофазнонеконсервативных веществ;
- размеры частиц взвешенных веществ должны быть однородны на всем рассматриваемом участке;
- влияние на содержание взвешенных веществ в фоновом створе вышерасположенного участка водного объекта должно быть минимально.

Список литературы

1. Веницианов Е.В., Лепихин А.П. Физико-химические основы моделирования миграции и трансформации тяжелых металлов в природных водах. Екатеринбург: Изд-во РосНИИВХ, 2002. 235 с.
2. Интернет-адрес Valeport MIDAS ECM <https://www.valeport-co-uk>
3. Лепихин А.П., Синцова Т.Н. К статистике показателей качества отводимых сточных вод // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 2. С. 23-46. DOI: 10.35567/19994508_2023_2_2.
4. Методика разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей (с изменениями на 18 мая 2022 года). Утверждена приказом Минприроды России от 29 декабря 2020 года № 1118.
5. РД 52.08.104-2002. Методические указания. Мутность воды. Методика выполнения измерений // Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. С-Пб.: Гидрометеоиздат, 2002.
6. РД 52.24.468-2019 Массовая концентрация взвешенных веществ и сухого остатка в водах. Методика измерений гравиметрическим методом // Росгидромет. ФГБУ «ГХИ», 2019.
7. Чалов С.Р., Цыпленков А.С. Роль крупномасштабной турбулентности в изменении мутности речных вод // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2020. №3. С. 34-46.
8. Черкинский С.Н. Санитарные условия спуска сточных вод в водоемы. Изд-во МКХ РСФСР, 1947. 92 с.

Определение интенсивности изменения климата для более эффективных адаптационных действий в бассейне Аральского моря

В.И. Соколов^{1*}, Б.Б. Алиханов²

¹Агентство реализации проектов Международного Фонда спасения Арала, г. Ташкент

²Комитет Сената Республики Узбекистан по проблемам Приаралья и экологии, г. Ташкент, Узбекистан
vadim_sokol@mail.ru

Аннотация. Показано, что процесс изменений климата в бассейне Аральского моря приобретает в региональном разрезе черты неравномерности и прогрессивности. Представлена авторская методология оценки интенсивности климатических изменений, векторов их воздействия на региональном и локальном уровнях. Обосновано использование разработанной исследователями формулы для оценки интенсивности климатических изменений на региональном уровне с учетом совокупности локальных факторов влияния. Результаты исследования имеют большое практическое значение для оптимизации Национальных планов адаптации и Национальных планов борьбы с засухой стран бассейна Аральского моря.

Ключевые слова: потепление, температура воздуха, осадки, водоснабжение, интенсивность изменений климата, национальный план адаптации, план борьбы с засухой.

Determination of Climate Change Intensity for better Adaptation Actions in the Aral Sea Basin

V.I. Sokolov^{1*}, B.B. Alikhanov²

¹Agency for project implementation of the International Fund for Saving the Aral Sea, Tashkent

²Committee of the Senate of the Republic of Uzbekistan on problems of the Aral Sea region and ecology, Tashkent, Uzbekistan
vadim_sokol@mail.ru

Abstract. It is shown that process of climate change in the Aral Sea basin gets features of unevenness and progressiveness in the regional context. The author's methodology for assessing intensity of climate changes and vectors of their impact at the regional and local levels is presented. The use of formula developed by researchers for assessing intensity of climate change at the regional level is justified, taking into account the totality of local influencing factors. Results of the study are of great practical importance for optimizing National Adaptation Plans and National Drought Management Plans in countries of the Aral Sea basin.

Keywords: warming, air temperature, precipitation, water supply, intensity of climate change, national adaptation plan, drought management plan.

Введение

Изменение климата в планетарном масштабе неизбежно и неоспоримо. При этом приоритетным источником таких изменений является повышение температурных показателей, то есть потепление, вызванное увеличением концентрации парниковых газов в атмосферном воздухе. Обобщение масштабных исследований в области изменения климата и динамического взаимодействия природных и социальных систем проводится в рамках программы «Всемирные исследования климата» [1].

В рамках указанной программы Межправительственная группа экспертов по изменению климата уже много лет реализует проект по сравнению семейства специальных моделей [2]. На сегодняшний день успешно реализуется шестая фаза этого проекта. В рамках этой фазы ожидаемые изменения температурных показателей достигают полутора градусов Цельсия в прогнозируемых временных рамках следующих десятилетий. Примечательно, что максимально процесс повышения температурных показателей затронет Центральную Азию, расположенную в средних и высоких широтах северного полушария планеты. Исключительная особенность циркуляционных процессов в этом регионе обусловлена его расположением и центральной частью континента. Исходя из этого, можно утверждать, что страны Центральной Азии одни из наиболее уязвимых к изменению климата.

Сегодня, используя теоретические выводы и образцы многолетних наблюдений, крайне актуальна необходимость оценки интенсивности климатических изменений для разработки дальнейших стратегий и планов адаптации к изменению климата, минимизации последствий и превентивных мер.

Несмотря на достаточно высокий уровень научного интереса к проблеме, рассматриваемой в данном исследовании, поиск оптимальных инновационных решений для эффективного управления рисками, возникающими в результате негативного воздействия глобального изменения климата, продолжается. В частности, для Узбекистана эта проблема особенно актуальна на фоне усиливающейся тенденции опустынивания и засухи – под воздействием усыхания Аральского моря.

Целью данного исследования является вклад в научную базу для оптимизации системы управления климатическими рисками, анализа и оценки воздействия интенсивности изменения климата и разработки системы превентивных мер.

Материалы и методы исследования

Для определения надлежащих подходов и инструментов был проведен критический обзор существующих методов оценки интенсивности изменения климата на различных доступных исследовательских платформах международных и региональных структур. Были изучены такие платформы, как Платформа планирования, исследований и практики адаптации к изменению климата [3] и Портал знаний об изменении климата Группы Всемирного банка [4]. Анализ также был сосредоточен на передовом опыте оценки воздействия изменения климата и климатических данных и инструментов на международных и региональных сайтах (например, на официальном страновом портале данных о выбросах парниковых газов РКИК ООН [5], Каталоге климатических данных ВМО [6].], Платформе информации о климате Центральной Азии [7] и Портал знаний по водным и экологическим проблемам в Центральной Азии (CAWater-info) [8]). К сожалению, авторы не смогли найти адекватных подходов для оценки интенсивности климатических изменений.

Обоснована целесообразность использования формулы, предложенной ранее авторами [9], в частности, для определения интенсивности изменения климата на региональном уровне:

$$J_i = \sum_{t=10} (T \times V) \times R \times G \times K_k \times K_c \times K_{np} \quad (1)$$

В этой формуле интенсивность изменения климата рассчитывается на основе значений влажности атмосферы (V), среднегодовой температуры приземного воздуха (T), с учетом преобладающего направления ветра (R), географического положения региона (G) и коэффициентов корреляции по особенностям местности (Kк), цикличности (Kц), потерям природных ресурсов (Kпр).

Примечательно, что авторами предлагается использовать значения коэффициентов $R_{nw}=0,7$ (холодный сезон) и $Southwest\ Index\ R_{sw}=0,3$. Что касается географического положения региона, то, согласно прогнозу ВПИК [1], можно предложить принять значения $G=2$ для Умеренной зоны, $G=1$ для Полярного пояса и $G=1,5$ для Тропического и

Экваториального поясов. Величина K_k определяется в зависимости от особенностей территории (лес, сельская или городская местность и т. д.). K_s характеризует количество повторений аномалий и природных опасностей. $K_{пг}$ зависит от количества потерянных природных ресурсов.

Научная новизна представленной формулы предопределена тем, что обзор нормативных, концептуальных и эмпирических источников на глобальном и региональном уровнях показал, что такой метод еще никем не предлагался ранее. Право собственности авторов на данный метод подтверждено Свидетельством об авторском праве № 005172, выданным Государственным предприятием «Центр интеллектуальной собственности» при Министерстве юстиции Республики Узбекистан от 28 октября 2022 года.

Результаты и выводы

Бассейн Аральского моря и Узбекистан. Тенденции глобального потепления, представленные в исследованиях гидрометеорологических станций Узбекистана, характеризуются устойчивым характером [10]. Показатели среднегодовых температур, зафиксированные по ряду наблюдений с 1950 г. станциями страны, свидетельствуют о тенденции устойчивого повышения температуры, которые почти вдвое превышает показатели естественной изменчивости и свидетельствует об актуальности последствий глобального потепления для территории Узбекистана, в частности. При этом скорость потепления неодинакова в разных регионах страны и достигает наибольших показателей в южных районах республики и мегаполисах (до $0,43^{\circ}\text{C}$ за 10 лет), а наименьших - на территории горных районов. (до $0,14^{\circ}\text{C}$ за тот же период времени).

Увеличение скорости и силы климатических изменений в исследуемом регионе во многом связано с деградацией экосистемы Аральского моря. Климат Узбекистана с каждым годом становится все суше и жарче, растет количество пыльных бурь значительной интенсивности - летом и снижение снежных заносов в горах - зимой. По данным Всемирной метеорологической организации ООН [6], максимальная температура на Земле в 2022 г. была зафиксирована на территории Узбекистана (47°C , пункты наблюдения в Сурхандарьинской области).

До 1960-х годов Аральское море выполняло роль естественного регулятора климата, нивелируя резкие колебания температурных показателей в Средней Азии, благодаря большой площади водной поверхности и объему воды. Воздушные массы, поступающие в основном с западного направления над территорией Аральского моря, зимой нагревались, а летом охлаждались. Благодаря таким интенсивным процессам циркулирующая с воздушными массами влага выпадала в виде осадков над горными хребтами в осенне-зимний период, пополняя снежный и ледяной покров. Экологическая катастрофа Аральского моря вызвала существенные негативные изменения в этой циркуляционной системе, нарушив распределение влаги в Средней Азии.

Сегодня характерен поток воздушных масс с севера и запада зимой (влажных океанических масс из атлантического и арктического поясов), которые на пути через материк теряют максимум влаги. За счет выхолаживания территории и высотных систем Тянь-Шаня и Памира по периметру региона формируется зона высокого давления (Рис. 1). Ситуация осложнилась после экологической катастрофы Аральского моря.

Примечательно, что климатические изменения в бассейне Аральского моря характеризуются значительной интенсивностью и достигают двукратного повышения температуры ($0,29^{\circ}\text{C}$) по сравнению со среднемировыми ($0,14^{\circ}\text{C}$). В первую очередь это связано с активными процессами высыхания в самой морской системе.

Таким образом, можно утверждать, что зимой в этом регионе существует область с максимальными показателями давления в планетарном масштабе – квазистационарный азиатский максимум. При этом преобладание антициклонов и значительная гипотермия в недрах континента обуславливают уменьшение количества осадков в регионе за последние 20 лет и существенное снижение температурных показателей (до -30°C).

Осадки распределяются неравномерно, большая их часть выпадает на равнинной местности, что приводит к уменьшению многолетних снежно-ледниковых запасов региона.

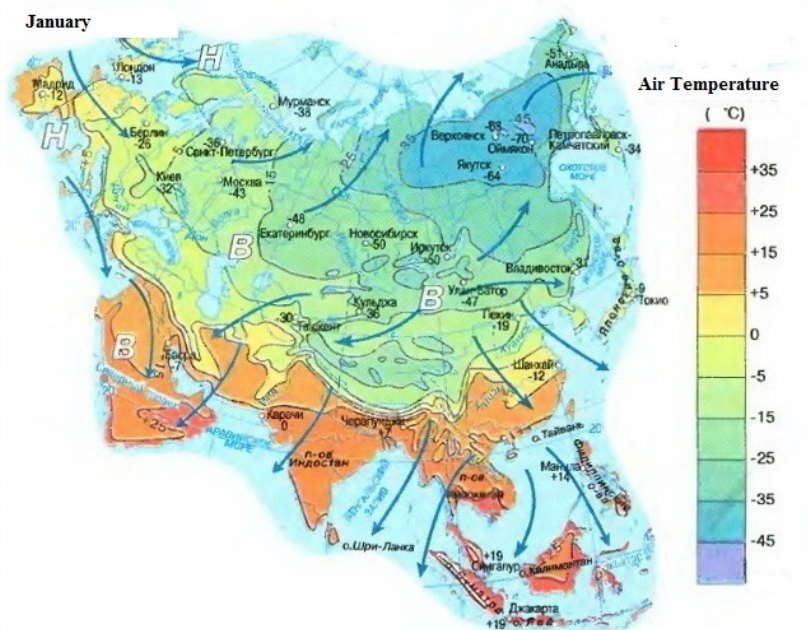


Рис. 1 Процесс циркуляции воздуха и влаги зимой в Средней Азии.

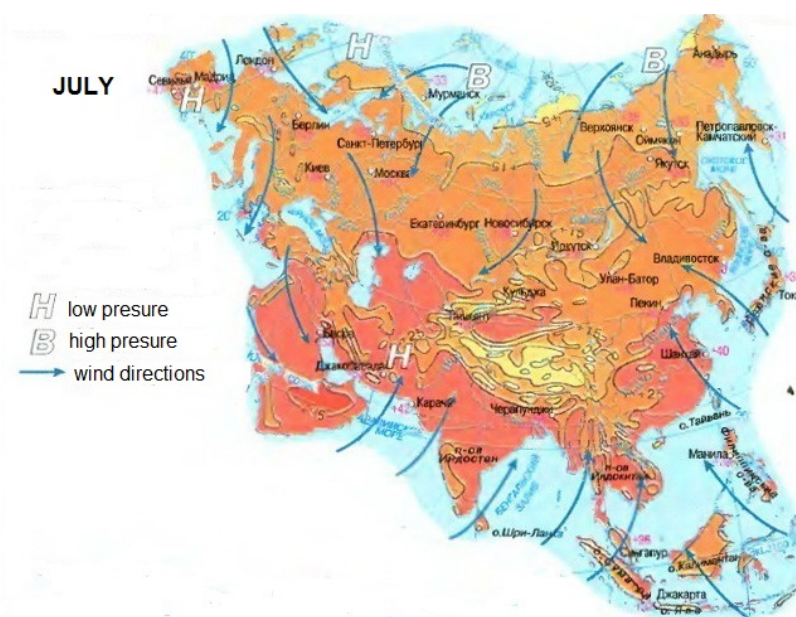


Рис. 2. Процесс циркуляции воздуха и влаги летом в Средней Азии

Летний период характеризуется существенными изменениями метеорологических условий в бассейне Аральского моря. Это связано с приоритетом области низкого давления над азиатским максимумом. Океанические воздушные массы, приходящие летом, обуславливают засушливые и жаркие климатические условия, а влажность моря существенно не влияет на ситуацию. Такие условия обуславливают средне-июльские температуры в пределах 30°C с пиками до 45°C во временном интервале последних 10 лет (Рис. 2).

В результате описанных процессов в последние 20–25 лет произошло существенное уменьшение количества осадков в летний период и усиление аридизации (Рис. 3). Одним из самых глобальных и опасных последствий таких процессов является интенсивное таяние многолетних ледников (30% ледниковой массы за последние 40 лет).

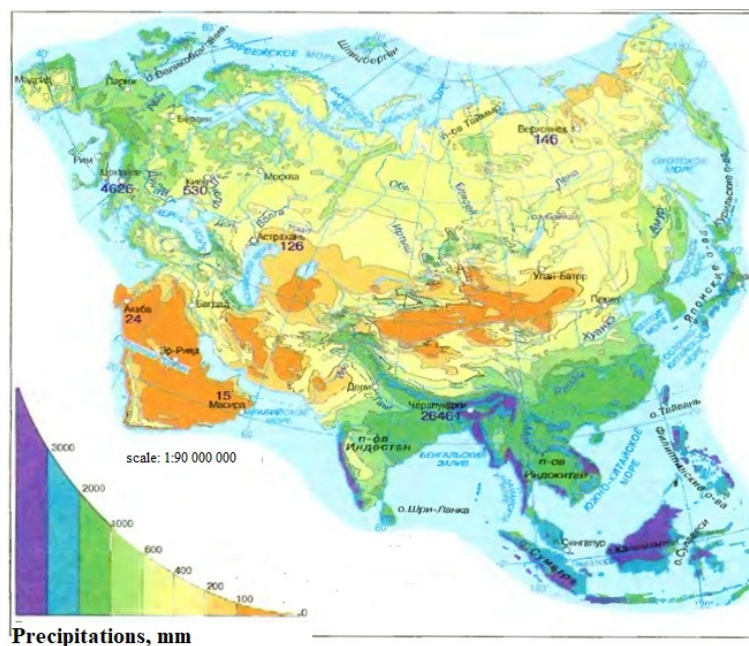


Рис. 3. Процессы аридизации в регионе Центральной Азии.

Рассматривая водную экосистему региона на сегодняшний день, можно констатировать ее упорное и неизбежное нарушение, имеющее катастрофические глобальные климатические последствия. Деградация экосистемы Аральского моря и появление новых районов опустынивания являются катализатором процессов глобального потепления на территории Узбекистана. Отдельной проблемой является также деградация ледниковой системы, что неизбежно сказывается на устойчивости водной системы страны. Происходящие в результате этих изменений процессы опустынивания в последнее время приобрели неуправляемый характер с катастрофическими масштабными последствиями социального, экологического и экономического характера.

Изменение климата оказывает существенное влияние на параметры окружающей среды и жизнь общества. Происходит смещение границ сезонов, нарушается цикличность и распределение осадков, происходят изменения ландшафта суши (опустынивание, заболачивание), увеличиваются объемы водопользования и испарения. В качестве вторичных последствий – климатическая миграция и негативное влияние на экономику.

Исходя из этого, можно утверждать, что поиск и реализация эффективных решений по стабилизации водной системы региона должны стать приоритетным направлением деятельности, требующим совместных усилий. Стабилизация ледниковой системы и экосистем верхних водозаборов возможна за счет внедрения инновационных мероприятий. При этом необходимо сосредоточить усилия на сохранении и приумножении водных ресурсов, оптимизации эффективности их использования, стабилизации состояния Аральского моря, минимизации воздействия засухи, прекращении процессов опустынивания.

Практическое применение. В связи с потерями, вызванными сельскохозяйственными засухами, имевшими место в Узбекистане в течение последних 20 лет, Глобальное водное партнерство (GWP) [11] выразило готовность оказать техническую и методологическую поддержку для подготовки национального плана по борьбе с засухой в Узбекистане. Эта поддержка финансируется Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США [12].

С декабря 2021 г. по март 2022 г. с привлечением национальных экспертов был подготовлен «Обзор текущего состояния борьбы с засухой в Узбекистане», а также концепция «Национального плана по борьбе с засухой». Целью национального плана

является решение проблем, связанных с засухой, посредством мониторинга и раннего предупреждения, оценки уязвимости и риска, а также мер по смягчению последствий засухи и адаптации.

5 апреля 2022 года в Ташкенте состоялся семинар по обсуждению необходимых шагов по разработке Национального плана по борьбе с засухой на 2023-2030 годы. В семинаре приняли участие представители всех министерств, ведомств, научно-исследовательских институтов, общественных организаций, занимающихся проблемой засух. В результате были даны рекомендации по содержанию национального плана, который должен охватывать четыре приоритета:

Первым приоритетным направлением является развитие потенциала для мониторинга, оценки риска и предотвращения засухи: укрепление технической базы Гидрометслужбы и внедрение инновационных решений для мониторинга и прогнозирования засухи; разработка системы мониторинга засухи и раннего оповещения, которая улучшит процесс принятия решений для планирования и управления рисками в отношении воздействия засухи на продовольственную и водную безопасность.

Второй приоритет – борьба с засухой. Сюда входит разработка мер по решению проблемы дефицита воды на основе данных мониторинга и раннего оповещения: степень ожидаемой маловодности и засухи (комплекс показателей) является критерием принятия тех или иных планов действий по смягчению последствий ожидаемой засухи.

Третьим приоритетным направлением является наращивание потенциала и повышение осведомленности: важно повышать осведомленность сельского населения (включая женщин) об адаптации к изменению климата и эффективных методах ведения сельского хозяйства, которое является наиболее пострадавшим от засухи сектором.

Четвертым приоритетным направлением является активное развитие регионального сотрудничества: учитывая трансграничный характер последствий засухи, чрезвычайно важно сотрудничество между странами региона. В связи с этим участники обратились к Глобальному водному партнерству с просьбой оказать посильную помощь в активизации регионального и международного сотрудничества по снижению риска засухи в Центральной Азии.

Таким образом, надлежащая оценка интенсивности изменения климата является ценным вкладом в более строгую формулировку Национального плана борьбы с засухой, особенно в рамках первой приоритетной области. Топы считают, что применение метода оценки интенсивности изменения климата, представленного в данной статье, могло бы надлежащим образом направить специалистов, участвующих в подготовке национального плана по борьбе с засухой в Узбекистане.

Благодарности

Авторы выражают благодарность партнерам из Экологического движения Узбекистана (Сергей Самойлов и Лейли Сеитова) за сотрудничество в продвижении результатов совместного проекта.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to partners from Ecological Movement of Uzbekistan (Sergey Samoilov and Leyli Seitova) for their cooperation in promoting results of the joint project.

Список литературы

1. Всемирная программа исследований климата. <https://www.wcrp-climate.org>
2. Межправительственная комиссия по изменению климата. <https://www.ipcc.ch/>
3. Платформа планирования, исследований и практики адаптации к изменению климата (weADAPT). <https://www.weadapt.org/>
4. Портал знаний об изменении климата (ССКР) Группы Всемирного банка. <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/>

5. Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК ООН), официальный страновой портал данных о выбросах парниковых газов. https://di.unfccc.int/detailed_data_by_party
6. Всемирная метеорологическая организация. Каталог климатических данных. <https://climatedata-catalogue.wmo.int/>
7. Климатическая информационная платформа Центральной Азии (ЦАКИП). <https://centralasiacclimateportal.org/>
8. Портал знаний по водным и экологическим проблемам в Центральной Азии (CAWater-info). http://www.cawater-info.net/news/index_e.htm
9. Мягкова Н. 2019. Экологические аспекты изменения климата в Узбекистане. Универсум: Технические науки: Цифровой научный журнал, 2(59), 1-4.
10. Alikhanov B.B., Samoylov S.V., Sokolov V.I. Theory of Climate Change Intensity Determination. Integrated Drought Management HelpDesk. GWP/WMO https://www.droughtmanagement.info/portal/wp-content/uploads/2022/11/Theory-of-Climate-change-Intensity-Determination_Eng.pdf
11. Глобальное водное партнерство (ГВП). <https://www.gwp.org/>
12. Национальное управление океанических и атмосферных исследований США. <https://www.noaa.gov/>

Параметризация химического стока городской реки Сетуни

Д.И. Соколов*, М.А. Терешина, О.Н. Ерина

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва
Dmitriy.Sokolov@yandex.ru*

Аннотация. По данным комплексного гидролого-геохимического мониторинга 2019-2022 гг. при помощи параметризации зависимости химического стока от гидрологического режима оценен вклад дождевых паводков в годовой химический сток р. Сетуни, составивший 33-46% для водного стока, 25-36% и 50-80% для стока растворенных и взвешенных веществ, 35-53% – органических, 32-68% – биогенных, от 0 до 84% (в среднем 36%) – отдельных микроэлементов в растворенной форме и от 62 до 90% (в среднем 86%) – в составе взвеси.

Ключевые слова: городская река, качество воды, химический сток, тяжелые металлы, загрязнение, параметризация.

Parameterization of chemical flux of the urban Setun river

D.I. Sokolov*, M.A. Tereshina, O.N. Erina

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
Dmitriy.Sokolov@yandex.ru*

Abstract. According to the data of integrated hydrological and geochemical monitoring 2019-2022, using the parameterization of the dependence of chemical flux on the hydrological regime, the contribution of rainfall floods to the annual chemical flux of the Setun river, which amounted to 33-46% for water runoff, 25-36% and 50-80% for dissolved and suspended solids runoff, 35-53% for organic, 32-68% for biogenic, from 0 to 84% (36% on average) for individual trace elements in dissolved form and from 62 to 90% (86% on average) for suspended solids.

Keywords: urban river, water quality, chemical runoff, heavy metals, pollution, parameterization.

Введение

В последние десятилетия проблеме изучения урбанизированных водосборов и особенностей формирования их гидролого-геохимического режима уделяется все больше внимания. Исследованиям пространственно-временной изменчивости качества воды городских рек, включая сток биогенных веществ, тяжелых металлов и др., посвящены десятки работ по всему миру [3; 4; 5; 7; 8; 9; 12]. Особое внимание уделяется роли ливневого стока [2; 6].

Одной из наиболее геохимически изученных территорий Московского мегаполиса является водосбор р. Сетуни – крупнейшего правого притока Москвы-реки в черте столицы и во всём верхнем и среднем течении. Около половины площади водосбора расположено в пределах городской застройки (в том числе промышленной), в верховьях располагается рекультивированный полигон ТБО «Саларьево» (ранее крупнейший в Европе), при этом часть водосбора площадью около 7 км² включена в крупнейший в Москве природный заказник «Долина реки Сетунь».

По данным комплексного гидролого-геохимического мониторинга, проведенного на р. Сетуни в 2019-2022 гг., выполнена параметризация зависимости изменения концентраций химических веществ от гидрологического режима р. Сетуни. Настоящее исследование методологически схоже с подобными международными работами [10; 11].

Материалы и методы исследования

Длина р. Сетуни составляет 38 км, её водосбор площадью $F=190 \text{ км}^2$ расположен в западной части города Москвы (рис. 1). Река протекает через городские районы Солнцево, Ново-Переделкино, частично в Одинцовском районе Московской области, пересекает МКАД в районе Сколковского шоссе, затем Аминьевское шоссе, Минскую улицу и впадает в р. Москву ниже Бережковского моста. Основные притоки Сетуни – реки Сетунька (в верховьях), Навершка и Раменка (в нижнем течении).

С августа 2019 г. в приустьевом створе р. Сетуни, вне зоны влияния р. Москвы ($F=186 \text{ км}^2$) в среднем ежемесячно осуществлялся мониторинг качества воды [1]. Отобранные пробы воды фильтровались через мембранные фильтры с диаметром пор 0.45 мкм, после чего в них определялось содержание различных форм биогенных элементов (фосфаты, нитриты) спектрофотометрическими методами и основной солевой состав методом ионной хроматографии. Фильтрованные пробы также отправлялись в лабораторию ВНИИ минерального сырья имени Н. М. Федоровского для определения содержания тяжелых металлов и металлоидов масс-спектральным и атомно-эмиссионным методами. В нефильтрованных образцах определялось валовое содержание азота и фосфора и химическое потребление кислорода (ХПК) методом бихроматной окисляемости.

Для получения данных о водном стоке р. Сетуни в данном створе был организован мониторинг уровней воды (H) с использованием автономных гидростатических логгеров НОВО U20L с дискретностью записи 30 минут. При помощи акустик-доплеровского профилографа RiverRay и измерителей скорости потока «Посейдон» или ИСП-1М измеряли расходы воды (Q) в различные фазы водного режима. По полученным данным построены кривые зависимости $Q=f(H)$, что позволило оценить среднесуточные расходы воды за весь период гидролого-геохимического мониторинга [1].

Разделение гидрографа на фазы водного режима выполнялось по методу Б.И. Куделина при помощи автоматизированного алгоритма Grwat в среде R. Регрессионный анализ с оценкой уровней значимости полученных связей, построение корреляционных матриц и графиков рассеяния также производились в среде R с использованием соответствующих пакетов.

Результаты и выводы

Для содержания ионов CO_3^{2-} , HCO_3^- и общей щелочности, ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} получены статистически значимые ($p \leq 0.001$, $n=69$) обратные связи с расходом воды (рис. 1). Однако для ионов Cl^- , Na^+ и K^+ достоверных связей с расходом воды получить не удалось, поэтому для параметризации использованы средние значения для фаз водного режима, тем более что в пределах одного сезона степень рассеивания этих показателей незначительна. Содержание Cl^- и Na^+ максимально зимой, особенно во время оттепелей, и в период снеготаяния, что может быть связано со смывом противогололедных реагентов с водосбора. Из-за различий в режиме главных ионов не выявлено значимых связей между общей минерализацией и гидрологическим режимом р. Сетуни ни для одного сезона, хотя для рек с естественным режимом характерна тесная связь между ионным и водным стоком (например, для верховий р. Москвы получены связи с расходом воды для минерализации с $r=-0.97$, для ионов HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ с $r \leq -0.87$ при $n > 100$). Поэтому ионный сток р. Сетуни параметризован как сумма главных ионов.

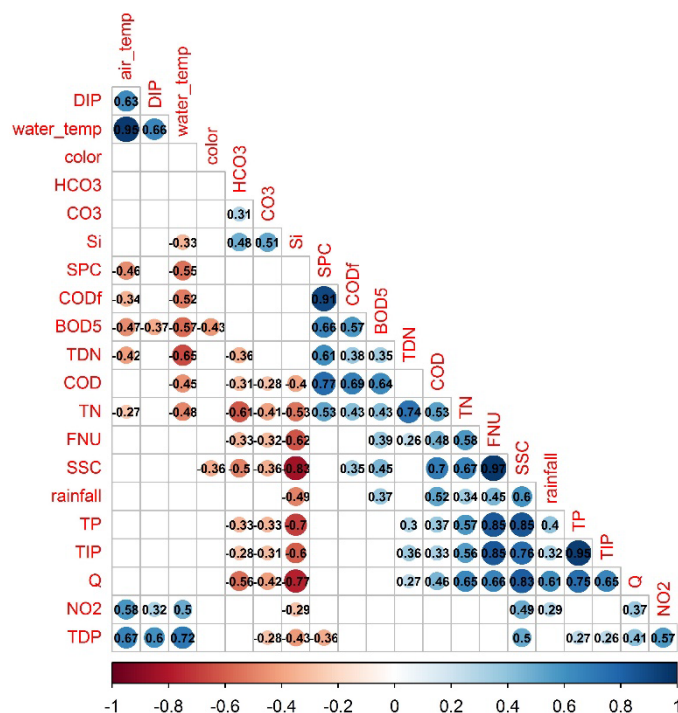


Рис. 1 Матрица корреляций гидрохимических, гидрофизических показателей и гидрометеорологических параметров в устьевом створе р. Сетуни по данным мониторинга 2019-2022 гг.

Содержание общего азота, валового и минерального фосфора весь год статистически значимо ($p \leq 0.001$, $n=64$) прямо пропорционально расходу воды, содержание кремния – обратно пропорционально. Для нитритного азота достоверная зависимость получена только для периодов летних паводков, для остальных фаз гидрологического режима использованы средние концентрации. В стоке азота круглый год преобладает растворенная форма (80-90%), фосфора – взвешенная (70% зимой, 80% весной и 60-70% летом и осенью). Суммарное содержание органических веществ (по величине ХПК) круглый год прямо пропорционально водности ($p \leq 0.001$, $n=60$) и на 90% представлено растворенной формой.

Существенное влияние на сток химических веществ р. Сетуни во время прохождения повышенных расходов воды оказывает ее мутность, круглый год прямо пропорциональная ($p \leq 0.001$, $n=44$) водному стоку.

Растворенные в воде р. Сетуни микроэлементы существенно различаются по характеру стока в разные сезоны (рис. 2). Для элементов Li, B, Sr получены значимые ($p \leq 0.001$, $n=69$) обратные, а для Sb, Se, W, Er – прямые связи с расходом воды для всего периода. Для Cu, Rb, Ba получены обратные, а для Pr, Nd – прямые связи с расходом воды для периода половодья, для остальных сезонов использованы средние концентрации. Для параметризации элементов Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, As, Br, Cs, La, Gd, Yb, Lu, Re, Tl, Pb, U также использованы их средние концентрации за разные фазы водного режима (а для Al, V, Ga, Ge, Mo, Cd – среднегодовые), т.к. значимых связей с гидрологическими параметрами получить не удалось даже для отдельных сезонов. Концентрации Y, Tb, Ho, Tm, Th выше порога обнаружения зафиксированы исключительно или преимущественно в период половодья (Sn, Sm – также во время летних паводков, Dy – во все сезоны, кроме зимней межени), для этих периодов задавались средние концентрации или использовались связи с расходом воды, в остальную часть года они заданы равными нулю.

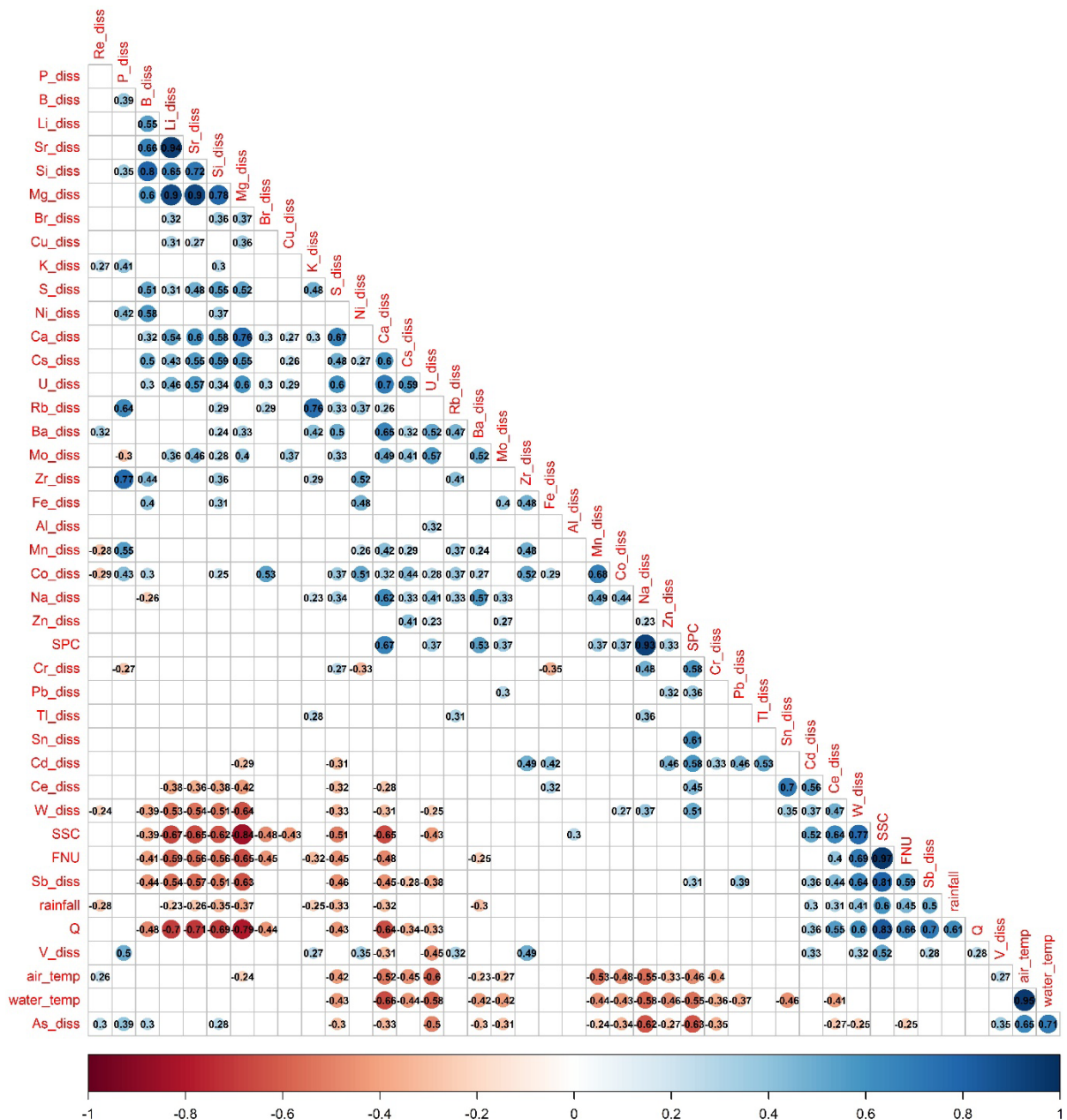


Рис. 2 Матрица корреляций содержания в воде растворенных микроэлементов и гидрометеорологических параметров в устьевом створе р. Сетунь по данным мониторинга 2019-2022 гг.

Режим подавляющего большинства микроэлементов в составе речной взвеси характеризуется отрицательной связью с расходом воды в периоды зимней и летней межени (преимущественно $p=0.01-0.001$ при $n=10-11$), положительной в летние паводки ($p=0.05-0.01$ при $n=23$) и отсутствием явных закономерностей в период половодья (для него использованы средние концентрации). Содержание Fe, Mn, P, As, Sr во взвеси обратно пропорционально водности р. Сетунь круглый год.

Микроэлементы Be, Sc, Se, Nb, Ru, Rh, Pd, In, Te, Eu, Ta, Os, Ir, Pt, Au, Bi, Hg, Ti, Ag, Hf (в растворенной форме), Se, Rh, Pd, Te, Re, Ir, Pt, Au, Hg (во взвеси) не обнаружены в воде р. Сетунь либо обнаружены в единичных пробах без явной связи с гидрологическим режимом, поэтому их концентрации параметризованы как нулевые.

Выполнена оценка вклада дождевых паводков в общее годовое поступление химических веществ в р. Москву со стоком р. Сетунь. Суммарный сток растворенных

веществ в паводки составляет 25-36% от годового, что ниже, чем соответствующая доля водного стока р. Сетуни (33-46%). Вклад дождей в вынос р. Сетунию взвешенных веществ составляет 50-80% годового стока. Доля паводкового стока органических веществ составляет 35-53% годового (т.е. близка к доле водного), биогенных – 32-68% (выше за счет большей роли взвешенной фракции). Вклад дождевых паводков в сток растворенных микроэлементов существенно варьирует – от 0 до 84% (в среднем 36%) в зависимости от характера связи содержания того или иного элемента с гидрологическим режимом. Намного выше роль паводков в формировании твердого стока микроэлементов – от 62 до 90% (в среднем 86%). Максимальная роль паводков отмечена в 2020 г. за счет экстремального паводка 3-4% обеспеченности, сформированного выпадением двухмесячной нормы осадков за несколько дней в конце мая – начале июня. Минимальный вклад паводков наблюдался в 2022 г. на фоне более высокого половодья. Разница между годами по вкладу дождевых паводков в сток растворенных макрокомпонентов составила примерно 10%, биогенных и органических веществ – 20%, взвесей – 30%, растворенных микроэлементов – 0-50% (в среднем 13%), микроэлементов во взвеси – 20-50% (в среднем 37%).

Гидролого-гидрохимический отклик городской реки Сетуни на выпадение дождевых осадков сопоставлен с ненарушенным водотоком-аналогом – р. Москвой выше Можайского водохранилища. Для современного режима р. Москвы характерно примерное равенство вклада весеннего половодья (20-40%) и дождевых паводков (40%) в годовой водный сток, между тем как для р. Сетуни при сопоставимом вкладе паводков доля водного стока в половодье в рассматриваемые годы существенно ниже (примерно 10%). Доля дождевых паводков в формировании ионного стока р. Москвы оценивается менее чем в 30% (для р. Сетуни – более 30%), стока органических веществ – примерно в 10% (для Сетуни – около 50%), твердого стока – в несколько процентов (для Сетуни – около 70%). Таким образом, очевидна существенно более высокая роль дождей в формировании стока городской реки.

Столь подробные данные многолетнего мониторинга гидролого-гидрохимического режима р. Сетуни, послужившие основой для выполненной параметризации ее химического стока, были получены для городской реки Московского региона впервые. Полученные расчетные уравнения при наличии надежной методики прогноза экстремальных паводков в бассейне р. Сетуни позволят прогнозировать смыв загрязняющих веществ с водосбора с заблаговременностью от 1 до 3 суток.

Благодарности

Гидроэкологический мониторинг выполнен при поддержке РНФ (проект 19-77-30004), параметризация химического стока – при поддержке РФФИ (проект 21-55-53039 GFEN_a).

Acknowledgments

Hydroecological monitoring was supported by RSF (project 19-77-30004), parameterization of chemical flux was supported by RFBR (project 21-55-53039 GFEN_a).

Список литературы

1. Chalov S., Platonov V., Erina O., Moreido V., Samokhin M., Sokolov D., Tereshina M., Yarinich Y., Kasimov N. Rainstorms impacts on water, sediment, and trace elements loads in an urbanized catchment within Moscow city: case study of summer 2020 and 2021 // *Theoretical and Applied Climatology*. 151. 2023. P. 871–889.
2. Faulkner H., Edmonds-Brown V., Green A. Problems of quality designation in diffusely polluted urban streams – the case of Pymme's Brook, north London // *Environmental Pollution*. 109(1). 2000. P. 91-107.
3. Göbel P., Dierkes C., Coldewey W.G. Storm water runoff concentration matrix for urban areas // *Journal of Contaminant Hydrology*. 91(1–2). 2007. P. 26-42.

4. Grimm N.B., Sheibley R.W., Crenshaw C.L., Dahm C.N., Roach W.J., Zeglin L.H. N retention and transformation in urban streams // *Journal of the North American Benthological Society*. 24(3). 2005. P. 626-642.
5. Groffman P.M., Boulware N.J., Zipperer W.C., Pouyat R.V., Band L.E., Colosimo M.F. Soil nitrogen cycling processes in urban riparian zones // *Environmental Science & Technology*. 36. 2002. P. 4547-4552.
6. Heaney J.P., Huber W.C. Nationwide Assessment of Urban Runoff Impact on Receiving Water Quality // *Water Resources Bulletin*. 20(1). 1984. P. 35-42.
7. Macklin M., Brewer P., Hudson-Edwards K., Bird G., Coulthard T., Dennis I., Lechler P., Miller J., Turner J. A geomorphological approach to the management of rivers contaminated by metal mining // *Geomorphology*. 79. 2006. P. 423-447.
8. Martin J.-M., Meybeck M. Elemental mass-balance of material carried by major world rivers // *Marine Chemistry*. 7(3). 1979. P. 173-206.
9. Neal C., Robson A.J. A summary of river water quality data collected within the Land–Ocean Interaction Study: core data for eastern UK rivers draining to the North Sea // *Science of The Total Environment*. 251–252. 2000. P. 585-665.
10. Ogwueleka T.C. Use of multivariate statistical techniques for the evaluation of temporal and spatial variations in water quality of the Kaduna River, Nigeria // *Environmental Monitoring and Assessment*. 187(3):137. 2015.
11. Phung D., Huang C., Rutherford S., Dwirahmadi F., Chu C., Wang X., Nguyen M., Nguyen N.H., Do C.M., Nguyen T.H., Tuan D.D.A. Temporal and spatial assessment of river surface water quality using multivariate statistical techniques: a study in Can Tho City, a Mekong Delta area, Vietnam // *Environmental Monitoring and Assessment*. 187(5):229. 2015.
12. Yang, S., Liang, M., Qin, Z. et al. A novel assessment considering spatial and temporal variations of water quality to identify pollution sources in urban rivers // *Scientific Reports*. 11:8714. 2021.

Оценка выноса основных загрязняющих веществ через замыкающий створ реки Сетунь

С.С. Соловьева*, Л.Е. Ефимова, М.А. Терешина, О.Н. Ерина, Д.И. Соколов

*Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
sevastiana01@mail.ru*

Аннотация. Малые реки, к которым относится р. Сетунь, составляют основу гидрографической сети, будучи при этом самыми многочисленными, но и наиболее уязвимыми элементами речных систем. Для оценки воздействия различных факторов на гидрохимический режим реки Сетунь по материалам 2019-2022 гг. проведен статистический анализ стока загрязняющих веществ (главные ионы, соединения азота, кремний, соединения фосфора, БПК₅, ХПК) через замыкающий створ реки. В ходе работы изучена степень неоднородности данных мониторинговых наблюдений и цикличность колебаний концентраций основных поллютантов. Проведен квартильный анализ, в результате которого выявлена зависимость главных ионов и биогенных веществ от водности реки. Построены функции распределения вероятностей, и проведен кластерный анализ, выделивший 4 основных группы веществ (по факторам формирования).

Ключевые слова: малые городские реки, гидрохимия, статистическая оценка.

Estimation of the removal of the main pollutants through the mouth cross-section of the Setun River

S. Soloveva*, L. Efimova, M. Tereshina, O. Erina, D. Sokolov

*Moscow State University, Moscow, Russia
sevastiana01@mail.ru*

Abstract. Small rivers, to which the Setun belongs, form the basis of the hydrographic network, being at the same time the most numerous, but also the most sensitive elements of river systems. To evaluate the impact of various factors on the hydrochemical regime of the Setun River in 2019-2022, a statistical assessment was made for the runoff of a number of pollutants (major ions, silicon, nitrogen and phosphorus compounds, BOD₅, COD) through the cross section near the mouth of the river. The heterogeneity of monitoring data and the cyclical fluctuations in the concentrations of the main pollutants in 2019-2022 were studied. Quartile analysis was performed, as a result of which the dependence of major ions and nutrient concentrations on water discharge was revealed. Probability distribution functions were constructed, and cluster analysis was carried out to identify 4 main groups of chemical compounds of different genesis.

Keywords: small city rivers, hydrochemistry, statistical assessment.

Введение

В современный период с каждым годом на водосборе Сетуни увеличивается доля застроенных территорий. Заметное влияние на качество воды городских рек оказывают стоки с территорий многочисленных предприятий, коммунально-бытовые сточные воды

и поверхностный диффузный сток, на поступление которого колоссальное влияние оказывает городская застройка. Влияние климатических факторов на гидрохимический режим и состояние вод малых городских рек, как правило, ослаблено за счет высокой антропогенной нагрузки.

Материалы и методы

Для оценки воздействия различных факторов на гидрохимический режим реки Сетунь по материалам 2019-2022 гг. выполнен статистический анализ стока загрязняющих веществ (главные ионы, соединения азота, кремний, соединения фосфора, БПК₅, ХПК) через замыкающий створ реки.

Вычисления производились по всему ряду данных, разделенному на два периода по водности (маловодный – межени и многоводный – половодья, паводки). Информация о гидрологическом режиме реки Сетунь, необходимая для расчета стока загрязняющих веществ через замыкающий створ, была получена из данных, предоставленных проектом «Водный, русловой и гидрохимический режим крупнейших городских агломераций в условиях роста экстремальных дождей осадков: сравнительный анализ Москвы и Шанхая» [2]. Для оценки гидрохимического состояния реки и стока поллютантов применялись статистические методы. Определения концентраций поллютантов с 25 и 75 процентной вероятностью их превышения и смещения медианных значений относительно среднего производилось через квартильный анализ. Определение типа распределения для каждого из поллютантов и выделение основных групп поллютантов через кластерный анализ осуществлялось с помощью функционала программы STATISTICA и расчета коэффициентов асимметрии (C_s). Однородность и цикличность рядов данных определялись при помощи, соответственно, расчета коэффициента вариации (C_v) и построения графиков функций автокорреляции (r) (Табл.).

Результаты и выводы

Основной закономерностью в распределении всех изученных веществ является превышение среднего значения над медианным. Это свидетельствует о наличии положительной асимметрии в каждом из полученных рядов. Отрицательная асимметрия возникает при наличии экстремально больших значений и более характерна для веществ, содержание которых в водах Сетуни зависит от уровня антропогенного воздействия. Так, у магния, калия, гидрокарбонатных ионов и сульфатов медианное значение практически равно среднему, а у хлоридов, натрия и кальция, входящих в состав противогололедных реагентов, значительно превышает его.

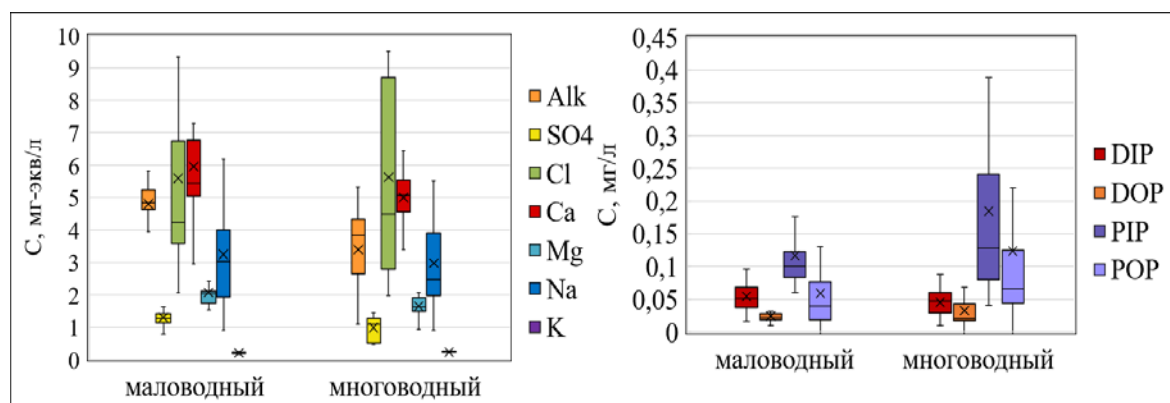


Рис. 1 Результаты квартильного анализа распределения главных ионов и биогенных веществ в маловодный и многоводный периоды в устье р. Сетунь за период 2019-2022 гг.

Для всех веществ характерно увеличение квартильного и абсолютного размаха значений в многоводные периоды. Увеличивается разброс значений, их неоднородность. Для большинства биогенных веществ в многоводные периоды повышаются значения верхнего квартиля; у ионов – понижаются границы нижнего квартиля. В периоды паводков и половодий в распределении биогенных веществ возрастает доля случаев фиксации их высокого содержания, что приводит к сдвигу границы значений 25%-й обеспеченности (Рис.1). Наибольший уровень экстремально повышенных значений характерен для взвешенного органического фосфора, среднее значение содержания которого равняется величине верхнего квартиля. Подобные изменения связаны с увеличением диффузного стока в многоводные периоды. У большинства ионов наоборот увеличивается доля низких концентраций (Рис.1), что в первую очередь связано с увеличением разбавления речных вод талым и дождевым маломинерализованным стоком с расположенных в границах ООПТ территорий. Распределение в области высоких обеспеченностей при этом практически не меняется.

Табл. Статистические параметры распределения основных загрязнителей в устье Сетуни за период 2019-2022 гг.

	m	σ	Cv	Cs	Cs/Cv	r
NO ₂	80,1	43,2	0,54	1,5	2,78	0,6
N _{общ}	3,13	0,93	0,3	-0,13	-0,44	0,6
N _{общ раств.}	2,54	0,64	0,25	-1,03	-4,07	0,66
Si	5,96	0,89	0,15	-22,5	-150	0,59
PIP	0,12	0,13	1,06	1,7	1,57	0,48
DIP	0,04	0,02	0,52	-2,9	-5,53	0,66
POP	0,07	0,1	1,39	1,6	1,12	0,58
DOP	0,02	0,01	0,42	-6,3	-14,82	0,69
XПК _{раств.}	42,6	22,2	0,52	-0,78	-1,5	0,77
Мутность	88,6	134	1,51	3,99	2,64	0,4
Alk	263	61,25	0,23	-1,37	-5,89	0,66
SO ₄	127	47,37	0,37	1,52	4,07	0,53
Cl	189	152,26	0,81	1,75	2,17	0,78
Ca	223	87,78	0,39	2,23	5,67	0,63
Mg	47,1	20,58	0,44	2,01	4,59	0,68
Na	73,9	42,11	0,57	0,06	0,11	0,72
K	9,33	2,87	0,31	2,49	8,1	0,49
M	931,89	339,57	0,36	1,99	5,47	0,49

Выявлена высокая неоднородность данных, отчасти обусловленная антропогенными факторами (застройка бассейна, сбросы промышленных и коммунальных стоков, смыв с автотрасс вод, насыщенных солями реагентов). Степень изменчивости стока химических веществ определялась через коэффициент вариации (табл.1; от 0,15 для Si до 1,51 для мутности). Согласно полученным результатам ($\overline{C}_v=0,56$) можно сделать вывод, что для большинства элементов химического состава характерна значительная степень рассеивания и неоднородность концентраций за период мониторинга ($\overline{C}_v>0,33$). Однородными рядами можно считать только данные о содержании общего взвешенного (0,3) и растворенного (0,25) азота, Si (0,15), Alk (0,23) и K (0,31).

Модуль значений коэффициента асимметрии (табл.1) большинства загрязнителей изменяется в диапазоне от 1 до 2,5. Исключение составляют кремний (Cs=-22,5),

растворенный органический фосфор (-6,5) и взвешенные вещества (3,99). Наиболее симметричное распределение характерно для натрия (0,06) и азота (0,13). Количество веществ с положительной (пик смещен влево от m) и отрицательной (пик смещен в сторону больших значений относительно мат.ожидания, большинство значений меньше среднего) асимметрией приблизительно одинаково. Наибольшая асимметрия характерна для распределения Si (-22,5). Асимметрия существенно усиливается из-за сильно преобразованного водосбора реки и активного использования ее вод в коммунальной отрасли и промышленности, что было доказано при аналогичных исследованиях в бассейне р. Москвы [1].

Через r была рассчитана степень взаимосвязи содержания вещества с его концентрациями в начале периода наблюдений. Это позволяет определить, как сильно изменились условия формирования стока конкретного химического элемента. Все значения автокорреляции положительные (Табл.), что может говорить о наличии постоянного антропогенного влияния. Средний коэффициент автокорреляции составил 0,66. Наименьшими r характеризуется изменчивость содержания взвешенных веществ, калия и содержания взвешенного минерального фосфора ($r=0,4-0,49$). Следовательно, воздействие, оказываемое на сток этих элементов минимально. Максимальные r наблюдались для Cl (0,78) и Na (0,72) наиболее зависящих от деятельности человека (снегоплавильные пункты, противогололедные реагенты). Построение выборочных автокорреляционных функций производилось для выявления наличия тренда и цикличности выбранных данных, определения наличия или отсутствия хаотической природы колебаний. Значение лага функции было выбрано равным 13, то есть четверти длины ряда данных ($k < n/4$, $n/4=13,75$). Для большинства загрязняющих веществ было характерно постепенное убывание коэффициента автокорреляции при увеличении порядка r (Рис. 2). Максимальные значения у автокорреляции первого порядка, что свидетельствует об отсутствии хаотичности и цикличности в колебаниях концентраций данных веществ. Исключение составили коррелограммы различных форм фосфора, для которых было характерно повышение значений автокорреляционной функции с лагом, равным 10. Это может говорить о наличии цикличности в изменчивости содержания фосфора (рис.2) в устье Сетуни с 10-месячной периодичностью.

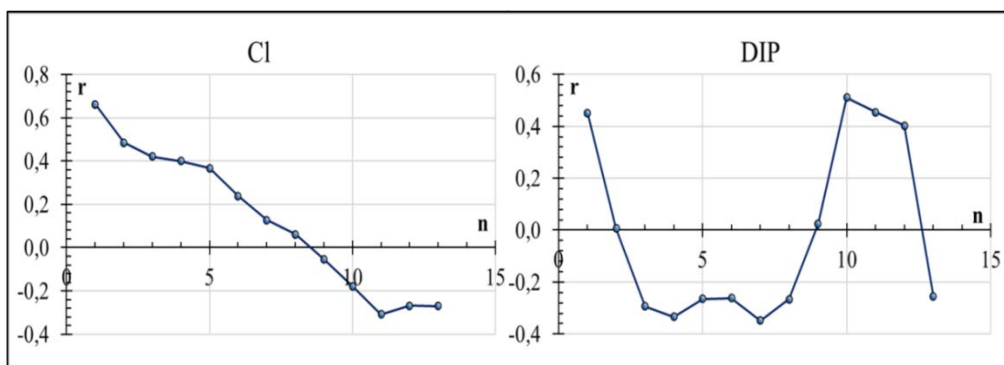


Рис. 2 Автокорреляционные функции распределения хлоридов и растворенного минерального фосфора в устье р. Сетунь в 2019-2022 гг.

Выяснено, что для стока большинства ионов (например, хлоридов, рис.3в) наиболее характерно логнормальное распределение, биогенные вещества подчиняются гамма-распределению, что может быть связано с разной природой их неоднородности. Исключение составляют нитриты (Рис. 3б) и валовый фосфор, наиболее приближенные к логнормальному распределению. Для выявления веществ со схожими условиями образования и природой неоднородности по данным о ежесуточном стоке химических веществ был проведен кластерный анализ (Рис. 3а). Построение кластеров

производилось в виде дендрограммы, что позволяет создать сложную иерархическую структуру. Выделение кластеров происходило по соответствию евклидовых расстояний.

В результате кластерного анализа определены 4 группы веществ, на формирование стока которых оказывают влияние схожие для кластера факторы. А именно: строительные работы в бассейне, сбросы коммунальных стоков, диффузный сток, природные факторы. В первый кластер входят N_o и $N_{раств}$; Si и взвешенные вещества с ХПК_{раств}. Они подвержены активному воздействию строительства в бассейне на сток химических веществ. В частности, за счет повышения эрозионного смыва при расчистке строительных площадок, или поступления в русло реки грунтовых вод (Si). Вторая группа включает в себя две подгруппы. В первую входят Na, Mg и NO_2 . Вторая группа состоит из Alk, Cl, Ca, SO_4 и PIP. Большая часть веществ этих кластеров тесно взаимосвязана через ионный состав (доли Alk, Cl, Ca практически равны и изменение содержания Alk обратно изменчивости Cl). Соединения $CaCl_2$ входят в состав противогололедных реагентов, поэтому Ca имеет одинаковую степень взаимосвязи с Cl и Alk. Содержание минерального фосфора может увеличиваться за счет адсорбирования на взвеси частиц моющих средств. Этот кластер основан на смыве загрязнителей с водосбора.

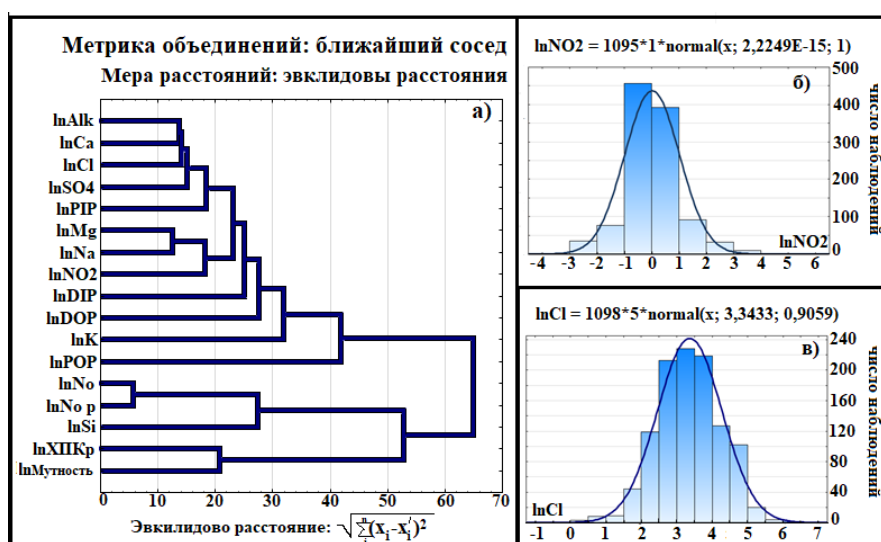


Рис. 3 Распределение по кластерам химических веществ (а) и ФРВ Cl(б) и NO_2 (в).

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-77-30004-П).

Acknowledgments

This study was supported by Russian Science Foundation (project 19-77-30004-П)

Список литературы

1. Ефимова Л. Е., Куликов В. А., Даценко Ю. С. Качество воды верхнего участка реки Москвы // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Водные ресурсы России: современное состояние и управление» Т. 1., Сочи, 8-14 октября 2018 г., С. 350–356.
2. Chalov S., Platonov V., Erina O., Moreido V., Samokhin M., Sokolov D., Tereshina M., Yarinich Yu., Kasimov N. Rainstorms impacts on water, sediment, and trace elements loads in an urbanized catchment within Moscow city: case study of summer 2020 and 2021 // Theoretical and Applied Climatology. 2023. №151. С. 871-889

Динамика снеготазпасов в лесу и поле при современном климате

А.В. Сосновский*, Н.И. Осокин

*Институт географии РАН, г. Москва
alexandr_sosnovskiy@mail.ru*

Аннотация. Проведено сравнение снеготазпасов в лесу и поле на равнинной территории России за разные климатические периоды. Средние значения снеготазпасов в поле за современный климатический период 1991–2020 гг. увеличилось на 4 % по сравнению с базовым историческим климатическим периодом 1966–1990 гг. и снизилось в лесу на 6 %. Отношение средних многолетних снеготазпасов в лесу к их значению в поле за эти периоды составило 1,05 и 1,16, соответственно.

Ключевые слова: снеготазпасы, лес и поле, базовые климатические периоды

Dynamics of snow storages in forests and fields in the modern climate

A.V. Sosnovsky*, N.I. Osokin

*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
alexandr_sosnovskiy@mail.ru*

Abstract. The comparison of snow storages in forests and fields on the flat territory of Russia for different climatic periods is carried out. The average values of snow storages in fields for the modern climatic period 1991-2020 increased by 4% compared to the basic historical climatic period 1966-1990 and decreased in forests by 6%. The ratio of average long-term snow storages in forests to their value in fields for these periods was 1.05 and 1.16, respectively.

Keywords: snow storage, basic climatic periods, forest and field.

Введение

Снежный покров является защитной оболочкой деятельного слоя земной поверхности в районах с отрицательными температурами воздуха. Он влияет на многие природные процессы и явления, а также на хозяйственную деятельность человека [1]. Среди параметров, определяющих свойства снежного покрова, наиболее важными являются его высота, плотность снега и снеготазпасы. Если высота и плотность снежного покрова совместно с его стратиграфией влияют на термическое сопротивление снежного покрова и термический режим почв и грунтов [3, 4], то снеготазпасы во многом определяют весенний сток, влажность грунта, гидрологический режим водных объектов.

Для определения параметров снежного покрова проводят измерения при снегомерных работах на маршрутах в лесу и поле. Более точное знание снеготазпасов требует определения их соотношения в лесу и в поле при климатических изменениях. Отношение снеготазпасов в лесу к их значению в поле определяет коэффициент снеготазпасования. Этот коэффициент зависит от многих параметров: интенсивности и специфики ветрового переноса снега в поле и в лесу; интенсивности снеготаяния во время зимних оттепелей; разнице в испарении с поверхности снега в лесу и поле.

Рассмотрим изменения средних многолетних максимальных снегозапасов (МСЗ) в лесу и поле за разные временные периоды. В климатологии используют базовые 30-летние средние значения температуры, суммы осадков и других показателей. Эти 30-летние исторические усредненные значения называются «климатическими нормами» и могут быть посчитаны на местном, национальном или мировом уровнях. Чтобы учесть быстрые темпы изменения климата, а также практические потребности в актуальной информации о климате Всемирная Метеорологическая Организация (ВМО) предложила двухуровневый подход к 30-летним базовым нормам для климатических данных (<https://meteoinfo.ru/news/1-2009-10-01-09-03-06/11151-03062015-l-r>).

Климатические нормы в настоящее время корректируются раз в 30 лет. Эти усредненные данные называются Климатологическими базовыми нормами ВМО. Однако в настоящее время климат Земли меняется намного быстрее, чем раньше. В результате, многие решения в сферах и отраслях, чувствительных к изменению климата, таких как водное хозяйство, энергетика, сельское хозяйство могут опираться на информацию, которая возможно уже устарела. Поэтому ВМО будет обновлять климатологические базовые нормы для оперативных целей каждые 10 лет, и период 1991–2020 гг. стал новым текущим базовым периодом. Тем не менее, будет сохранен период 1961–1990 гг. как исторический базовый период для поддержания долгосрочной оценки изменения климата. Предыдущий базовый период 1981–2010 гг. уже начали применять многие национальные метеорологические службы. Это позволило более согласованно подходить к сравнению климатических параметров и их изменениям различным исследователям и метеослужбам. Поэтому применение двухуровневого базового периода помогает согласовать и привести к одному стандарту различные национальные подходы и облегчить международные сравнения. Эти же периоды мы будем использовать при оценке влияния климатических изменений на снегозапасы в лесу и поле. Данные по снегосъемкам в лесу и поле, координаты и названия метеорологических станций России приведены на сайте института гидрометеорологической информации ВНИИГМИ-МЦД (<http://meteo.ru>) с 1966 г., поэтому для анализа влияния климатических изменений на снежный покров период 1961–1990 гг. заменяется на период 1966–1990 гг.

Массовые измерения показывают, что в лесах запасы воды в снеге, скапливающиеся к началу снеготаяния, как правило, больше, чем в поле. Процесс накопления снега в лесу – сложная функция многих факторов, прежде всего его таксационных характеристик (породный состав лесонасаждений, полнота, ярусность, возраст, сомкнутость лесного полога), а также метеорологических условий периода снегонакопления. Обзор исследований по оценке влияния разных факторов на снегозапасы представлен в работе [5].

Тенденции изменения снегозапасов в лесу и в поле приведены в работе [2]. При этом отмечается, что средний для России в целом запас воды в снеге по данным маршрутных снегосъемок в поле увеличивается на 2,71 мм за 10 лет, а по данным маршрутных наблюдений в лесу на территории России преобладают тенденции уменьшения максимальных снегозапасов. Так, средний для страны максимальный снегозапас в лесу уменьшается на 1,22 мм за 10 лет.

Наблюдения за снежным покровом по регламенту маршрутных снегосъемок осуществляются через каждые 10 дней в течение холодного периода и каждые 5 дней в период интенсивного снеготаяния. Длина маршрута составляет 1 или 2 км (в поле и лесу). Каждые 10 м в лесу или 20 м в поле измеряется высота снежного покрова и каждые 100 м в лесу или 200 м в поле измеряется плотность снежного покрова. Эти данные применяют для определения снегозапасов. Измерения проводятся зимой три раза в месяц: 10-го, 20-го и в последний день каждого месяца. Весной перед началом и в период

снеготаяния производятся учащенные снегосьемки в каждый последний день пятидневки (5, 10, 15, 20, 25-го и последний день месяца).

Для многих практических задач (сельское и лесное хозяйство, функционирование растений и животных, более точный учет альбедо поверхности и величин стока и т. п.) представляет интерес анализ влияния климатических изменений на снегозапасы отдельно в поле и лесу.

Цель настоящей работы – оценка средних многолетних максимальных снегозапасов (МСЗ) на равнинной территории России в лесу и в поле и их изменение за разные 30-летние базовые климатические периоды и за две декады XXI века – 2001–2010 и 2011–2020 гг.

Отметим, что снегонакопление в лесу зависит от таксационных характеристик леса, поэтому анализировать влияние климатических изменений на коэффициент снегонакопления можно только для одного и того же снегомерного маршрута в лесу. Сравнивать снегонакопление в лесу и в поле необходимо для одной метеостанции, так как в этом случае влияние изменчивости атмосферных осадков на небольшой территории над лесом и полем будет минимальным.

Обработка данных и анализ полученных материалов

Рассмотрим изменение средних многолетних максимальных снегозапасов в лесу и в поле для метеостанций равнинной территории России за разные временные периоды. Из 517 метеостанций с маршрутными снегосьемками, представленных на сайте ВНИИГМИ–МЦД, рассмотрены 82 метеостанции, которые имеют маршрутные снегосьемки одновременно и в лесу, и в поле. При этом 2/3 таких метеостанций расположены в Европейской части территории России (ЕТР). Снегозапасы измеряют в миллиметрах толщины слоя водного эквивалента.

Обработка данных маршрутных снегосьемок показала, что в периоды 1966–1990, 1981–2010, 1991–2020 гг. средние значения МСЗ составили для поля 115, 120 и 120 мм и для леса 132, 129 и 125 мм, соответственно. При этом наименьшие и наибольшие значения МСЗ для леса составляли 39–234, 37–234, 36–223 мм и для поля 37–210, 37–223, 29–208 мм, за указанные климатические периоды, соответственно.

За текущий климатический период 1991–2020 гг. максимальные снегозапасы в лесу – до 220 мм приурочены к северо-востоку ЕТР — бассейн р. Печора, а минимальные приходятся на юг Восточной Сибири и юго-запад ЕТР – 40-60 мм.

В поле за период 1991–2020 гг. максимальные снегозапасы достигают 180-200 мм в бассейне р. Печора и междуречье рек Волга и Кама, минимальные (как и в лесу) – юг Восточной Сибири, юго-запад ЕТР – 40-60 мм

Отношение снегозапасов в лесу за период 1991–2020 гг. к периоду 1966–1990 гг. составляет в среднем 0,94. При этом минимальные значения отношения – порядка 0,7, отмечены на Западе ЕТР и юго-востоке Западной Сибири, максимальные – порядка 1,3 – междуречье среднего течения рек Вилюй и Лена. В поле это отношение составляет 1,04. Максимальные значения отношения – порядка 1,15–1,25 приходятся на восточную часть ЕТР, юг Западной и Восточной Сибири, междуречье среднего течения рек Вилюй и Лена. При этом минимальные / максимальные значения отношения снегозапасов в лесу за период 1991–2020 гг. к периоду 1966–1990 гг. составили 0,58 / 1,27 и в поле – 0,59 / 1,33.

Приведённые данные показывают, что за текущий климатический период 1991–2020 гг. снегозапасы в лесу снизились на 6 %, по сравнению с историческим периодом 1966–1990 гг. и выросли в поле на 4 %. В результате из-за разницы в изменении снегозапасов в лесу и в поле будет меняться коэффициент снегонакопления. Эти изменения имеют пространственно-временной характер.

Рассмотрим, как менялся коэффициент снегонакопления. За периоды 1966–1990, 1981–2010, 1991–2020 гг. средние значения коэффициента снегонакопления составили

1,16; 1,08 и 1,05, соответственно. При этом минимальные / максимальные значения за эти периоды составляли 0,86 / 2,13; 0,67 / 2,28 и 0,64 / 1,74, соответственно.

Среднее значение отношения коэффициента снегонакопления за период 1991–2020 гг. к периоду 1966–1990 гг. составляет 0,91. Это отношение принимает минимальные значения – порядка 0,7–0,8 и приурочены к бассейну р. Ангара, а максимальные – порядка 1,15 – отдельные районы центральной части ЕТР.

Средние значения коэффициента снегонакопления постоянно снижались, что обусловлено снижением снеготазов в лесу и небольшим ростом в поле. Рассмотрим снеготазы за две первые декады 21 века (2001–2010 и 2011–2020 гг.), которые в значительной степени будут определять их распределение в следующий 30-летний климатический период 2001–2030 гг. Средние многолетние снеготазы в лесу / поле в периоды 2001–2010 и 2011–2020 гг. составляли 127 / 123 и 121 / 120 мм, соответственно (Рис. 1). При этом диапазон изменения снеготазов в лесу в 2001–2010 и 2011–2020 гг. составлял 36–242 и 38–214 мм, а в поле: 37–215 и 25–206 мм, соответственно.

Из Рис. 1 видна тенденция снижения снеготазов в лесу и их рост в поле за базовые климатические периоды. Отметим также, что снеготазы за период 2011–2020 гг. в лесу и в поле снизились по сравнению с периодом 2001–2010 гг.

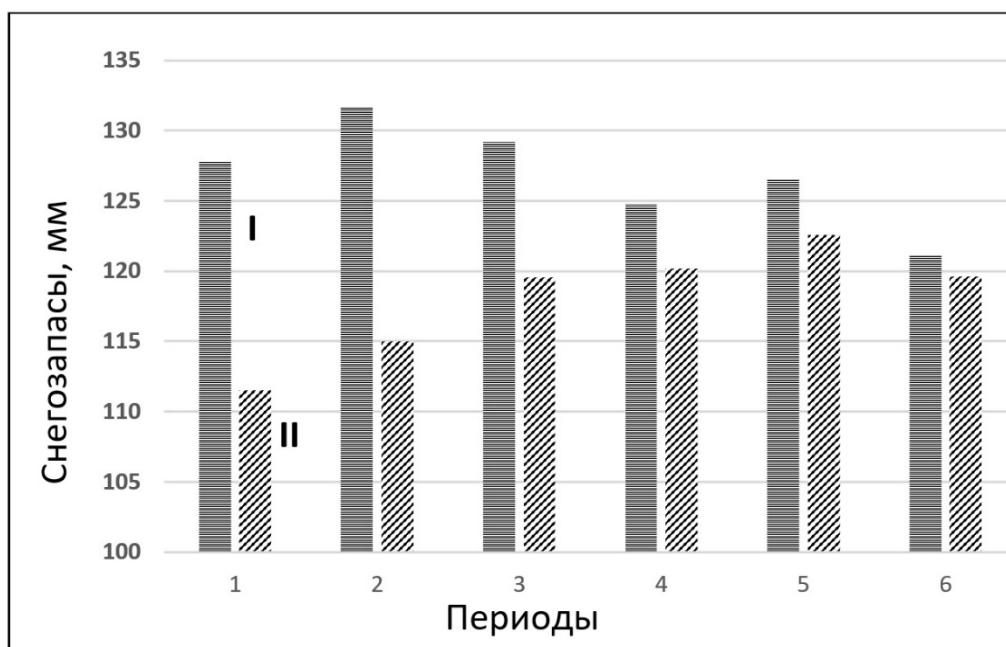


Рис. 1 Средние многолетние снеготазы на равнинной территории России в лесу – I и поле – II за периоды: 1 – 1966–2020; 2 – 1966–1990, 3 – 1981–2010, 4 – 1991–2020, 5 – 2001–2010 и 6 – 2011–2020 гг.

Коэффициент снеготазов за рассмотренные климатические периоды представлен на Рис. 2. Из Рис. 2 видна тенденция снижения коэффициента снеготазов – выравнивания МСЗ в лесу и поле при современном климате. Снижение коэффициента снеготазов за базовые климатические периоды происходит как в среднем по России, так и в ее регионах – ЕТР, Западной и Восточной Сибири.

Разница в снегонакоплении в лесу и в поле в значительной мере обусловлена изменением метелевого переноса снега. В работе [5] показано, что тенденция выравнивания МСЗ в лесу и поле обусловлена снижением скорости ветра. Анализ скорости ветра на метеостанциях со значительным изменением коэффициента снеготазов показал, что число наблюдений, при которых скорости ветра находятся в

диапазоне 6–10 м/с и более 10 м/с существенно снизилось в 2001–2010 гг. относительно периода 1966–2000 гг., особенно в ЕТР.

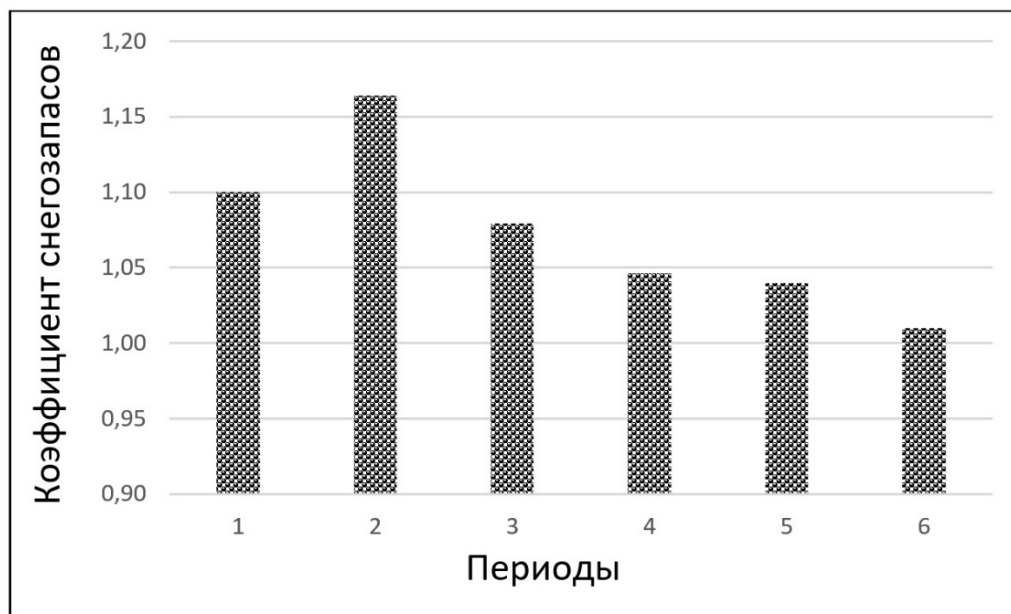


Рис. 2 Средние многолетние значения коэффициента снеготзапасов на равнинной территории России за периоды: 1 – 1966–2020; 2 – 1966–1990, 3 – 1981–2010, 4 – 1991–2020, 5 – 2001–2010 и 6 – 2011–2020 гг.

Также анализ тенденции изменения скорости ветра, представленный в работе [2], показал, что во все сезоны года средняя по территории России за 1976–2022 гг. скорость ветра уменьшается. Число дней с ветром более 15 м/с зимой и осенью также уменьшается в большинстве регионов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Института географии РАН АААА-А19-119022190172-5 (FMGE2019-0004).

Acknowledgments

The work was supported by framework of the research project АААА-А19-119022190172-5 (FMGE-2019-0004) of the Research Plan of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences.

Список литературы

1. Воейков А.И. Снежный покров, его влияние на почву, климат и погоду и способы исследования // Зап. Русск. геогр. об-ва по общей географии. 1889. Т. 18. № 2. 213 с.
2. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. М.: Изд-во Росгидромет, 2023. 104 с.
3. Осокин Н.И., Самойлов Р.С., Сосновский А.В. Оценка влияния толщины снежного покрова на деградацию мерзлоты при потеплении климата // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2006. № 4. С. 40–46.
4. Осокин Н.И., Самойлов Р.С., Сосновский А.В., Сократов С.А. О роли некоторых природных факторов в промерзании грунтов // Материалы гляциологических исследований (МГИ). 2000. Вып. 88. С. 41–45.
5. Сосновский А.В., Осокин Н.И., Черняков Г.А. Динамика снеготзапасов на равнинной территории России в лесу и в поле при климатических изменениях // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 2. С. 183–190.

Оценка соблюдения нормативов допустимого воздействия на водные объекты бассейнов крупных рек севера европейской части России

А.А. Строков

*Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Росгидромет, г. Москва, Россия
aastrokov@mail.ru*

Аннотация. В статье приводится оценка соблюдения установленных в 2014-2015 гг. нормативов допустимого воздействия на водные объекты (НДВ) бассейнов четырех рек севера европейской части России (ЕЧР): Онеги, Северной Двины, Мезени и Печоры. Рассмотрены виды НДВ, затрагивающие качественные и количественные показатели водных ресурсов: 1) по привнесу химических и взвешенных минеральных веществ (НДВ_{хим}); 2) по изъятию водных ресурсов (НДВ_{из}). По результатам анализа данных государственного мониторинга водных объектов в замыкающих створах в период 2015-2020 гг. НДВ_{хим}, выраженные через нормативы качества воды (C_n), нарушаются во всех реках в отношении металлов (медь, марганец, цинк, железо, алюминий) до 5.4 раз (р. Онега), до 2 раз (р. Северная Двина), до 5.5 раз (р. Мезень) и до 3.3 раз (р. Печора), а также в отношении органических веществ (нефтепродуктов, легко- и трудноокисляемых органических веществ) до 2 раз (р. Онега), до 1.4 раза (р. Северная Двина), до 2.5 раз (р. Мезень), до 33 раз (р. Печора). Нарушения C_n могут быть связаны с увеличением стока рассматриваемых рек и соответствующим увеличением природного диффузного стока и вымыванием загрязняющих веществ из почвогрунтов. Однако стоит уделить внимание и вероятному воздействию антропогенного диффузного стока, который по теоретическим оценкам составляет более 94% в бассейнах рек (99.9% в бассейне р. Онега; 94.6% в бассейне р. Северная Двина; 99.7% в бассейне р. Мезень; 94.1% в бассейне р. Печора). В период 2015-2020 гг. НДВ_{из} соблюдаются на всех реках: фактический объем безвозвратного забора составил 0.3% от НДВ_{из} в бассейне р. Онега, 12% – в бассейне р. Северная Двина, 0% – в бассейне р. Мезень, 6% – в бассейне р. Печора.

Ключевые слова: норматив допустимого воздействия, норматив качества воды, диффузный сток, изъятие водных ресурсов.

Assessment of compliance with norms of permissible impact on water bodies of major river basins in the north of European Russia

A.A. Stokov

*N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Roshydromet, Moscow, Russia
aastrokov@mail.ru*

Abstract. The article provides an assessment of compliance with norms of permissible impact on water bodies (NPI) established in 2014-2015 in the basins of four rivers of the north of European Russia: the Onega, the Northern Dvina, the Mezen and the Pechora. Types of permissible impact norms affecting qualitative and quantitative indicators of water resources are considered: 1) inflow of chemical and suspended mineral substances (NPI_{ch}); 2)

withdrawal of water resources (NPI_{wd}). According to the results of state monitoring of water bodies in the closing sites in 2015-2020 NPI_{ch} , expressed through water quality standards, are violated in all the rivers for metals (copper, manganese, zinc, iron, aluminum) up to 5.4 times (the Onega river), up to 2 times (the Northern Dvina river), up to 5.5 times (the Mezen river) and up to 3.3 times (the Pechora river), for organic substances (oil products, easy and hard-to-oxidize organic substances) up to 2 times (the Onega river), up to 1.4 times (the Northern Dvina river), up to 2.5 times (the Mezen river), up to 33 times (the Pechora river). Disturbance of water quality standards may be associated with an increase in runoff of the rivers and a corresponding increase in natural diffuse runoff and leaching of pollutants from soils. However, attention should also be paid to the probable impact of anthropogenic diffuse runoff, which is theoretically estimated at over 94% in the river basins (99.9% in the Onega river basin; 94.6% in the Northern Dvina river basin; 99.7% in the Mezen river basin; 94.1% in the Pechora river basin). In the period of 2015-2020 NPI_{wd} are complied with in all the rivers: the actual volume of irretrievable withdrawals was 0.3% of NPI_{wd} in the Onega river basin, 12% in the Northern Dvina river basin, 0% in the Mezen river basin, and 6% in the Pechora river basin.

Keywords: norm of permissible impact, water quality standard, diffuse runoff, withdrawal of water resources.

Введение

Установление и соблюдение нормативов допустимого воздействия (НДВ) на водные объекты по различным видам воздействия в рамках схем комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО) обеспечивают устойчивое и безопасное водопользование в процессе социально-экономического развития территории любого региона нашей страны [2; 3].

В 2014-2015 гг. для всех водохозяйственных участков страны были разработаны и утверждены Росводресурсами и бассейновыми водными управлениями (БВУ) проекты СКИОВО, включая НДВ, срок действия которых до 2029-2030 гг. Мониторинг реализации мероприятий, предложенных в СКИОВО, а также корректировка отдельных Книг СКИОВО ведется БВУ по сей день (например, [4]). Однако мониторинг соблюдения НДВ довольно размыт и даже имеются попытки упразднить его инструментарий как слишком «сложный» и снова перейти к контролю нормативов допустимых сбросов (НДС) [1].

Целью исследования является понимание соблюдения или несоблюдения установленных НДВ по наиболее значимым видам воздействия (привнос химических и взвешенных минеральных веществ и изъятие водных ресурсов) для бассейнов крупных рек севера европейской части России (ЕЧР) (Онеги, Северной Двины, Мезени и Печоры), относящихся к экономически развивающейся и климатически меняющейся Арктической зоне России. Статья является продолжением комплексных исследований устьевых областей рек севера ЕЧР, отраженных в [8-10].

Материалы и методы исследования

В работе использовались утвержденные НДВ по привносу химических и взвешенных минеральных веществ ($НДВ_{хим}$) с нормативами качества воды (C_n), а также по изъятию водных ресурсов ($НДВ_{из}$) для рассматриваемых речных бассейнов севера ЕЧР [5]; актуальные среднегодовые данные (2015-2020 гг.) по загрязненности воды приоритетными загрязняющими веществами (ЗВ) [6]; материалы по точечным и диффузным источникам поступления ЗВ в водные объекты [4]; данные по безвозвратному водопотреблению из ресурсов поверхностных и подземных вод [7]. Нормативы качества воды (C_n), установленные в НДВ, учитывают региональные особенности водных объектов и предельно допустимые концентрации (ПДК) веществ

для приоритетных видов водопользования. Применен сравнительно-географический метод исследования указанных величин с дальнейшим анализом полученных результатов. Для характеристики состояния всего речного бассейна рассматривался нижний замыкающий створ каждой крупной реки, где ведутся многолетние наблюдения Росгидромета: р. Онега – с. Порог; р. Северная Двина – г. Архангельск; р. Мезень – с. Дорогорское; р. Печора – г. Нарьян-Мар.

Результаты и выводы

Оценка соблюдения НДВ_{хим.} На Рис. 1 показаны нарушения нормативов качества воды C_n в отношении наиболее приоритетных металлов (медь, марганец, цинк, железо, алюминий) и органических соединений (нефтепродукты, БПК₅ и ХПК).

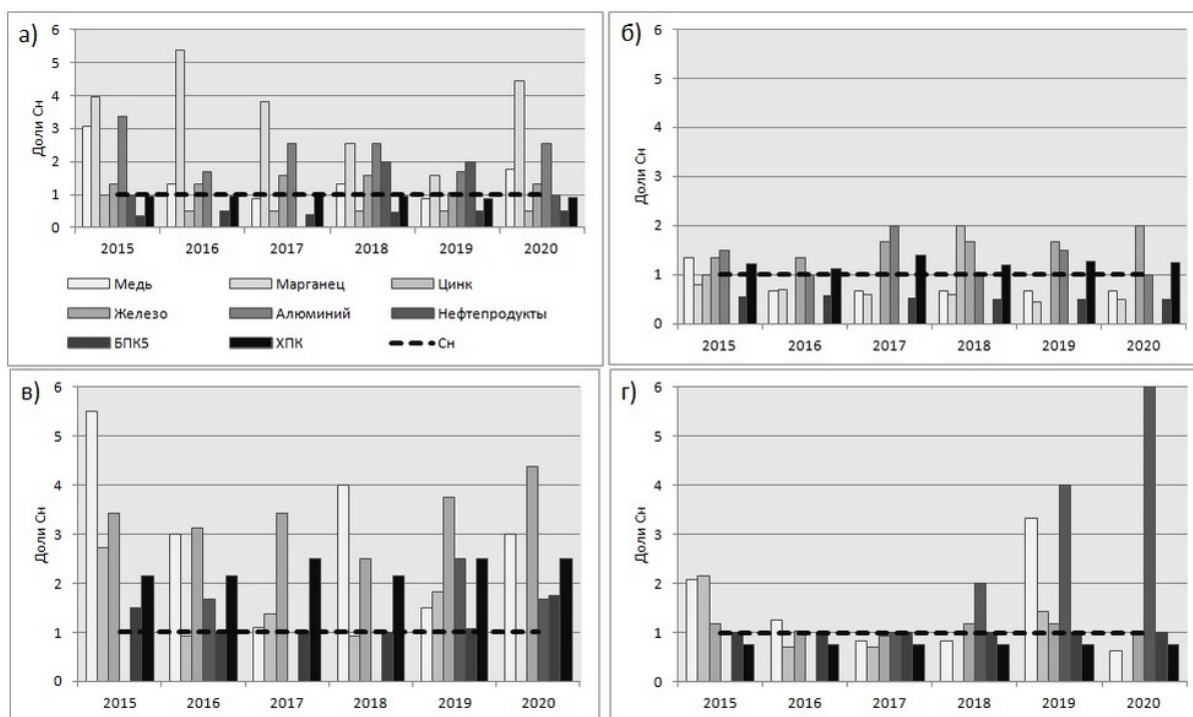


Рис. 1 Наблюденные и нормативные (C_n) концентрации загрязняющих веществ в воде рек Онега (а), Северная Двина (б), Мезень (в) и Печора (г), доли C_n .

Несмотря на установленные нормативы C_n фактическое качество воды не соответствует нормативному во всех реках за рассматриваемый период 2015-2020 гг. Так в р. Онега концентрация меди находится в диапазоне 0.9-3.1 C_n ; марганца – 1.6-5.4 C_n ; железа – 1.1-1.6 C_n ; алюминия – 1.7-3.4 C_n ; нефтепродуктов – 0-2 C_n . Соответствие или слабое превышение характерно для цинка (0.5-1.0 C_n) и органических веществ (БПК₅ 0.4-0.5 C_n и ХПК 0.9-1.1 C_n).

В р. Северная Двина концентрация меди находится в диапазоне 0.7-1.3 C_n ; цинка – 0-2 C_n ; железа – 1.3-2.0 C_n ; алюминия – 1-2 C_n ; ХПК – 1.1-1.4 C_n . Соответствие нормативам отмечено для марганца (0.4-0.8 C_n), нефтепродуктов (<1 C_n) и БПК₅ (0.5-0.6 C_n).

В р. Мезень концентрация меди находится в пределах 1.1-5.5 C_n ; цинка – 0.9-2.7 C_n ; железа – 2.5-4.4 C_n ; нефтепродуктов – 0-2.5 C_n ; БПК₅ – 1.0-1.8 C_n ; ХПК – 2.1-2.5 C_n .

В р. Печора концентрация меди находится в пределах 0.6-3.3 C_n ; цинка – 0.7-2.1 C_n ; железа – 0.9-1.2 C_n ; нефтепродуктов – 1-33 C_n . Соответствие нормативам отмечено в отношении органических веществ (1.0 C_n по БПК₅ и 0.8 C_n по ХПК).

Нарушения C_n по ЗВ могут быть связаны с увеличением стока рассматриваемых рек за последние годы, как показано в работе [10], и соответствующим увеличением природного и/или антропогенного диффузного стока и вымыванием этих загрязняющих веществ из почвогрунтов и антропогенных объектов. Однако, если природная составляющая диффузного стока не подлежит регулированию и достижение «экологического благополучия» по C_n невозможно, то стоит обратить внимание на антропогенную составляющую диффузного стока, которая может регулироваться при грамотном исполнении водоохранных мероприятий, заложенных в СКИОВО. В Табл. представлено соотношение точечных и диффузных источников поступления ЗВ в рассматриваемые водные объекты.

Табл. Источники загрязнения речных бассейнов севера ЕЧР [10].

Речной бассейн	Доля от суммарного поступления ЗВ, %				Доминирующие источники
	Точечные источники	Диффузные источники			
		всего	в том числе		
			потенциально-управляемые	неуправляемые	
Онега	0,1	99,9	99,3	0,6	промышленные и сельхозпредприятия
Северная Двина	5,4	94,6	50,6	44,0	промышленные предприятия и сельхозугодия (пашни, сенокосы, пастбища)
Мезень	0,3	99,7	3,0	96,7	сельхозугодия (пашни, сенокосы, пастбища)
Печора	5,9	94,1	46,3	47,8	промышленные предприятия и сельхозугодия (пашни, сенокосы, пастбища)

Диффузные источники играют доминирующую роль (94.1-99.9%) в загрязнении всех водных объектов. Точечные источники локально расположены в бассейнах рек Северная Двина и Печора (до 6%). Потенциальному регулированию подлежат диффузные источники, расположенные лишь в бассейне р. Онега. В бассейнах рек Северная Двина и Печора примерно одинаковое соотношение потенциально-управляемых и неуправляемых источников диффузного поступления ЗВ. В бассейне р. Мезень отмечается подавляющее большинство неуправляемых источников. Таким образом, можно предположить, что намеченные водоохранные мероприятия, предпринимаемые в рамках реализации СКИОВО [4], могут иметь максимальный положительный эффект для бассейна р. Онега, средний эффект – для бассейнов рек Северная Двина и Печора, минимальный – для бассейна р. Мезень.

Оценка соблюдения НДВ_{из}. На Рис. 2 показан фактический безвозвратный водозабор ($W_{\text{факт}}$) за последние годы и НДВ_{из} (W_n) для рассматриваемых речных бассейнов.

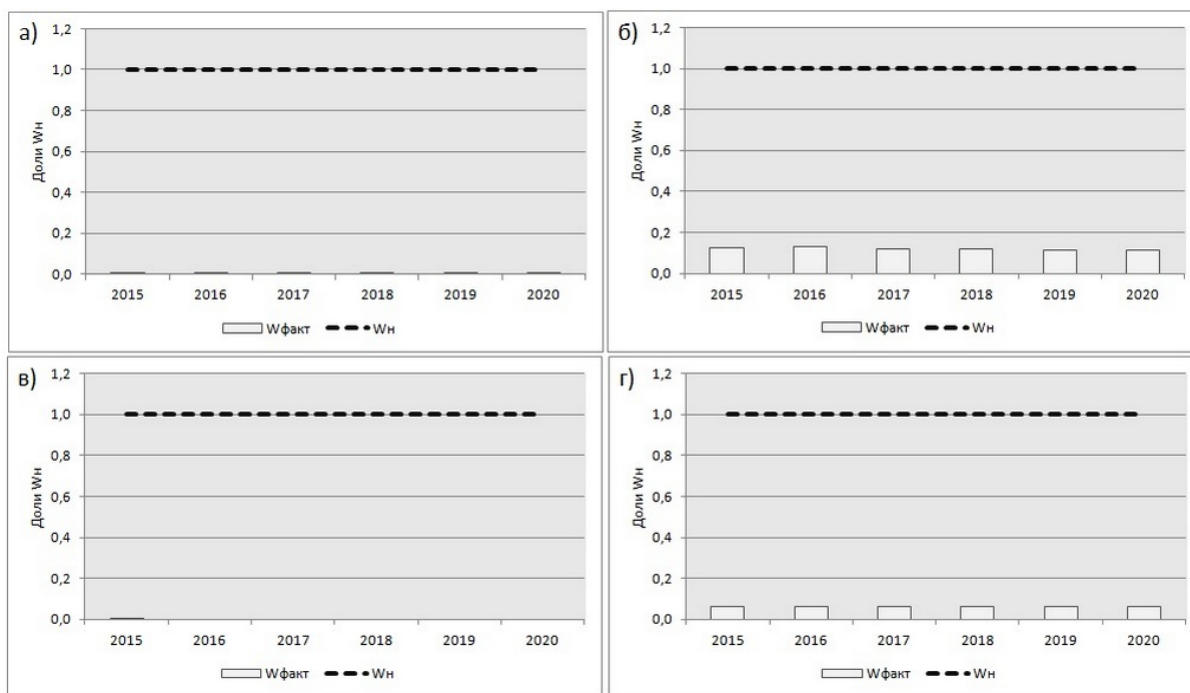


Рис. 2 Фактическое безвозвратное ($W_{\text{факт}}$) и нормативное ($W_{\text{н}}$) водопотребление из рек Онега (а), Северная Двина (б), Мезень (в) и Печора (г), доли $W_{\text{н}}$.

За рассматриваемый период времени 2015-2020 гг. НДВ_{из} с большим «запасом» соблюдаются во всех речных бассейнах. Фактический объем безвозвратного забора составил 0.003 $W_{\text{н}}$ (0.3%) в бассейне р. Онега; 0.11-0.13 $W_{\text{н}}$ (12%) - в бассейне р. Северная Двина; 0-0.001 $W_{\text{н}}$ (0%) - в бассейне р. Мезень; 0.06 $W_{\text{н}}$ (6%) - в бассейне р. Печора. Максимальные объемы водопотребления характерны для более освоенных водосборов рек Северная Двина и Печора. Учитывая увеличение стока северных рек и относительно стабильное или даже сокращающееся водопотребление [10], можно ожидать увеличение профицита водных ресурсов на данной территории.

Благодарности

Автор выражает благодарность специалистам Отдела информационного обеспечения морской и водохозяйственной деятельности ФГБУ «ГОИН» Росгидромета под руководством заместителя директора института, канд. физ.-мат. наук И. В. Землянова за помощь в сборе материалов и конкретных данных для настоящего исследования.

Работа выполнена в рамках научной темы 4.6 «Развитие моделей, методов и технологий мониторинга гидрохимического состояния и загрязнения морей России и оценки гидрологического и гидрохимического состояния морей и морских устьев рек» (AAAA-A20-120042190045-6 от 21/04/2020).

Acknowledgments

The author thanks the specialists of the Department of Information Support of Marine and Water Management Activities of FSBI "SOI" Roshydromet headed by the Deputy Director of the Institute, I.V. Zemlyanov for assistance in collecting materials and specific data for this study.

The work was performed within the scientific theme 4.6 "Development of models, methods and technologies for monitoring of hydrochemical state and pollution of Russian seas and assessment of hydrological and hydrochemical state of seas and sea mouths of rivers" (AAAA20-120042190045-6 dated 21/04/2020).

Список литературы

1. Веницианов Е.В., Лепихин А.П. Современные методы расчета необходимых для регулирования качества вод нормативов // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Трансграничные водные объекты: использование, управление, охрана», Сочи, 20-25 сентября 2021 г. С. 69-74.
2. Методические указания по разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты. Утверждены приказом Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 12.12.2007 № 328 (зарегистрированы Минюстом РФ 23.01.2008 г. №10974). – 35 с.
3. Методические указания по разработке схем комплексного использования и охраны водных объектов. Утверждены приказом Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 169 от 04.07.2007 (зарегистрированы Минюстом РФ 10.08.2007 г. №9979). – 21 с.
4. Официальный сайт Двинско-Печорского бассейнового водного управления Федерального агентства водных ресурсов. Раздел СКИОВО, включая НДВ. Доступен online: <http://www.dpbvu.ru/deyatelnost/skiovo-vklyuchaya-ndv>. Дата обращения: 13.04.2023.
5. Официальный сайт Федерального агентства водных ресурсов. Раздел Нормативы допустимого воздействия. Доступен online: <https://voda.gov.ru/activities/normativy-dopustimogo-vozdeystviya/>. Дата обращения: 13.04.2023.
6. Официальный сайт ФГБУ «Северное УГМС». Раздел Обзоры загрязнения. Доступен online: <http://www.sevmeteo.ru/monitoring/reviews/>. Дата обращения: 13.04.2023.
7. Официальный сайт ФГБУ «Государственный гидрологический институт». Раздел Издания ГГИ доступные для скачивания. Доступен online: http://www.hydrology.ru/ru/izdaniya_ggi_New. Дата обращения: 13.04.2023.
8. Справочно-аналитический обзор гидрологического режима устьевой области реки Печора / Е. В. Борщенко, Д. В. Мишин, Г. С. Ермакова и др. — ООО ПресСто Москва-Иваново, 2021. — 152 с.
9. Справочно-аналитический обзор гидрологического режима устьевой области реки Северная Двина / С. В. Лебедева, Е. А. Ракчеева, Е. В. Борщенко [и др.] : под ред. Е. В. Борщенко, Е. А. Ракчеевой, О. В. Горелиц. – Москва-Воронеж: ООО «ЮКОНЪ», 2022. – 196 с.
10. Строков А.А., Куликова Ж.М., Ракчеева Е.А., Горелиц О.В. Оценка загрязненности воды морских устьев рек севера европейской части России за 2012-2020 гг. (на примере Онеги, Северной Двины, Мезени и Печоры) // Метеорология и гидрология. 2023. № 4. С. 127–136.

Структура водосборов озер Беларуси как фактор их гидрохимического режима

Н.Ю. Суховило

*Белорусский государственный университет, г. Минск, Белоруссия
SukhoviloNY@bsu.by*

Аннотация. На примере разнотипных озер Беларуси показана взаимосвязь между структурой водосборов и гидрохимическими характеристиками водной массы. Ретроспективный анализ структуры водосборов озер по картографическим материалам с начала XX века до настоящего времени и данных дистанционного зондирования (ДДЗ) Земли, выявил изменение лесистости и доли сельскохозяйственных земель в диапазоне от 10 до 40 %. Наибольшей стабильностью структуры отличаются лесные водосборы с пересеченным рельефом и водосборы с большой площадью верховых болот, наименьшей – осушенные водосборы Полесья и водосборы, на территории которых расположены крупные населенные пункты.

Соответствующим образом меняется химический состав озерных вод. Например, в оз. Ореховское после осушительной мелиорации и уменьшения площади водосбора в период с 1986 по 1996 гг. произошел скачкообразный рост минерализации воды со 120 до 220 мг/дм³. Концентрация нитратов в водной массе возросла более, чем в 7 раз. Достаточно ярко выражен рост минерализации воды и концентрации биогенных элементов в ацидотрофных озерах, чему способствует улучшение их транспортной доступности. Улучшение экологического состояния по гидрохимическим показателям отмечается для озер, расположенных в национальных парках.

В целом, для озер Беларуси выявлены значимые зависимости между лесистостью водосборов и минерализацией воды, между прозрачностью воды и периодом водообмена, а также между долей сельскохозяйственных земель и водородным показателем.

Ключевые слова: озеро, водосбор, гидрохимический режим, лесистость, распаханность, заболоченность.

The structure of catchments of lakes in Belarus as a factor of their hydrochemical regime

N.Yu. Sukhovilo

*Belarusian State University, Minsk, Belarus
SukhoviloNY@bsu.by*

Abstract. On the example of different types of lakes in Belarus, the relationship between the structure of catchments and the hydrochemical characteristics of the water mass is shown. A retrospective analysis of the structure of lake catchments based on cartographic materials from the beginning of the 20th century to the present and remote sensing data (RSD) of the Earth revealed a change in forest cover and plowed area in the range from 10 to 40%. The highest stability of the structure is observed in forest catchments with rugged relief and watersheds with a large area of bogs, while the least stable is in the drained watersheds of Polesie and watersheds where large settlements are located.

The chemical composition of lake waters changes accordingly with change of catchments structure. For example, in the lake Orekhovskoye after drainage reclamation and reduction of the catchment area in the period from 1986 to 1996 there was an abrupt increase in water mineralization from 120 to 220 mg/dm³. The concentration of nitrates in the water mass increased by more than 7 times. The growth of water salinity and the concentration of biogenic elements in acidotrophic lakes is quite pronounced, which is facilitated by the improvement of their transport accessibility. An improvement in the ecological state in terms of hydrochemical indicators is noted for lakes located in national parks.

In general, for the lakes of Belarus, significant relationships have been identified between the forest cover of watersheds and water salinity, between water transparency and the period of water exchange, as well as between the plowed area and pH.

Keywords: lake, catchment, hydrochemical regime, forest cover, plowed area, proportion of swamps.

Введение

Озеро вместе со своим водосбором представляют собой единую сложную природную систему, являющуюся средой и одновременно результатом взаимодействия геоморфологических, гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических процессов. Основными характеристиками водосбора, влияющими на внутриводоемные процессы, являются его история развития, определяющая особенности генезиса, морфологии и морфометрии рельефа, степени его расчлененности, литологического строения, а также физико-географические условия выражающиеся в показателях лесистости, распаханности, заболоченности, тесно связанные с общим характером рельефа, климатом и густотой гидрографической сети. Таким образом, под озерной геосистемой подразумевается целостная природно-антропогенная система, включающая озеро и его водосбор. Озера, расположенные на возвышенностях, как правило, имеют небольшие по площади водосборы, и, следовательно, более замедленный внешний водообмен. В условиях интенсивного внешнего воздействия в них происходит активное накопление загрязняющих веществ в водной массе. Особенно сильные негативные последствия накопления биогенов будут характерны для глубоких стратифицированных озер, т.к. там обмен веществом и энергией между слоями затруднен, и в окислении загрязняющих веществ участвует не вся водная толща, а только эпилимнион.

Антропогенное воздействие на развитие озерных бассейнов наиболее сильно проявилось в последнее столетие и привело к существенным изменениям состояния озер, проявившихся в загрязнении лимносистем и истощении их ресурсов. Поэтому изучение гидрохимического режима водных объектов приобретает особую актуальность, т.к. может служить основой при разработке прогноза их экологического состояния и предотвращения деградации озерных экосистем.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования стали 150 разнотипных озер Беларуси. При отборе объектов необходимо было, чтобы они располагались в различных регионах Беларуси, отличались по соотношению долей лесов, болот, пашни, населенных пунктов в пределах водосборных территорий. Анализ изменения структуры водосборов озер выполнялся на основе топографических карт различных периодов. Для современного этапа применялись также данные дистанционного зондирования Земли из открытых источников [3–5].

Данные о составе воды приведены в фондовых материалах НИЛ озераведения БГУ и Белгидромета [1, 2]. Определение концентрации растворенных веществ ранее

производилось по общепринятым лабораторным методикам, в настоящее время для этого применяется фотометрический метод.

Результаты и выводы

Площадь водосбора озера является важным показателем, определяющим скорость внешнего водообмена в водоеме и интенсивность поступления в него питательных веществ. Минимальные площади водосборов характерны для моренных возвышенностей и камовых массивов (9 и 23,8 км² соответственно), максимальные – для озерно-аллювиальных и озерно-ледниковых низин (265,3 и 273,5 км² соответственно). Следовательно, для озер, чьи водосборы расположены в низменных ландшафтах, характерен интенсивный водообмен (озеро Олтуш характеризуется периодом водообмена 0,07 года, Споровское – 0,03 года), в то время как для моренных возвышенностей и камовых массивов период водообмена достигает 34,6 лет (оз. Болдук).

Помимо различных площадей водосборов, в формировании озерных геосистем значительная роль отводится структуре водосборной территории. Она тесно связана с рельефом местности. Возвышенности, особенно в Поозерье, из-за мелкоконтурности рельефа слабо пригодны для ведения сельского хозяйства, поэтому для них характерна высокая степень лесистости, что выражается в меньшей доле поступлением питательных веществ с водосбора и способствует сохранению озерных геосистем в естественном состоянии. Равнинные водосборные территории более интенсивно используются в сельском хозяйстве, что обуславливает высокую долю их распаханности и как следствие, активный приток биогенных элементов. Это вызывает более быстрый по сравнению с возвышенностями переход озер на более высокий трофический уровень. Поэтому на Полесье мезотрофные озера отсутствуют, в Поозерье сохранились мезотрофные и мезотрофные с признаками олиготрофии водоемы. В Центральной Беларуси мезотрофным озером до недавнего времени являлось озеро Свитязь, расположенное в пределах Новогрудской возвышенности. Малая площадь водосбора на сожских водно-ледниковых низинах обусловлена тем, что на них остались лишь озера в пределах верховых болот, которые и служат их водосборами. Водосборы, находящиеся в естественных природных условиях, с высокой степенью лесистости или заболоченности не способствуют активной трансформации озерных геосистем и переходу озер в эвтрофное состояние.

Анализ структуры водосборов озер на протяжении 1865 – 2020 гг. показал следующие общие закономерности: с конца XIX в. происходило увеличение доли сельскохозяйственных земель, которая достигла пика в конце 1970-х начале 1980-х гг., после чего началось снижение доли пашни и увеличение лесистости, наблюдаемые до настоящего времени. Помимо этого, на заболоченных водосборах с конца XIX в. производилась осушительная мелиорация. Наиболее активно преобразование водосборов происходило во второй половине XX в. Наиболее стабильной структурой отличаются полностью залесенные (Глубелька, Бредно) и заболоченные (Ельня) водосборы, что вызвано сложностью их использования в сельском хозяйстве из-за расчлененного рельефа или большой мощности торфа.

Значительный интерес представляет изучение трансформации гидрохимического режима озер, на водосборах которых ведется осушительная мелиорация. Примером таких озер является озеро Ореховское (Малоритский район Брестской обл.). Его ионный состав, а также доля компонентов минерализации в 1954 – 2010 гг. показаны на рисунках 1 и 2. В период с 1986 по 1996 гг. из-за проведения мелиоративных работ на водосборе произошел скачкообразный рост минерализации воды со 120 до 220 мг/дм³. Главным образом, это произошло за счет повышения концентрации ионов кальция и гидрокарбонатов, являющихся зональными для территории Беларуси, однако на

рисунке 2 видны признаки трансформации химического состава вод: в 1996 г. в воде отсутствовали сульфат-ионы, а также катионы натрия и калия. Резкое увеличение концентрации растворенных веществ является следствием ускорения процессов их сноса с водосборной территории при прокладке мелиоративных каналов. Постепенно минерализация воды будет снижаться, но поскольку в водной массе и донных отложениях произошла аккумуляция веществ, принесенных с водосбора, а объем воды стал меньше вследствие понижения уровня воды, то снижение минерализации до фоновых значений маловероятно.

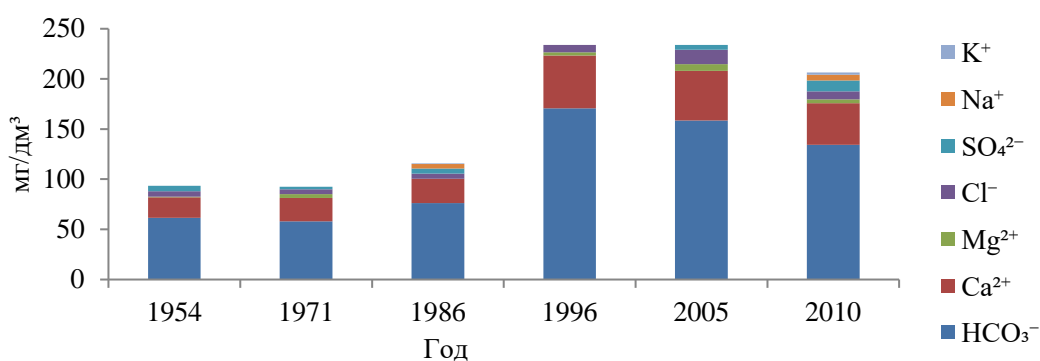


Рис. 1 Динамика содержания главных ионов в поверхностном слое оз. Ореховское в 1954–2010 гг.

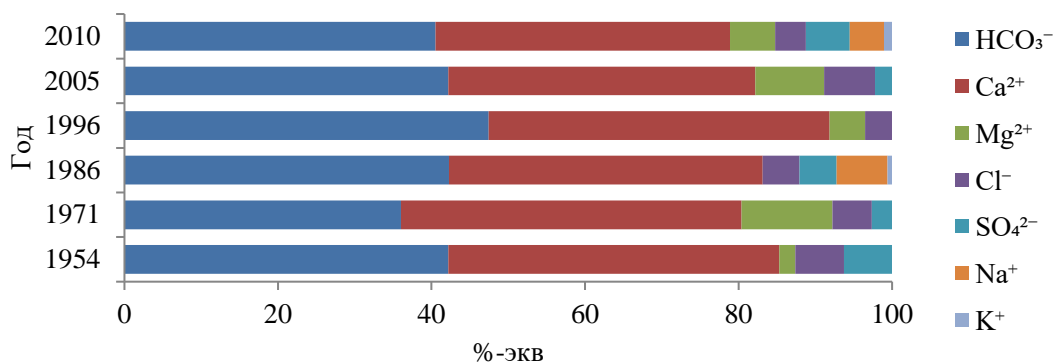


Рис. 2 Динамика соотношения между главными ионами в поверхностном слое оз. Ореховское в 1954–2010 гг.

Резкий рост также демонстрирует концентрация нитратов в воде. Так, в 1972 – 86 гг. она составляла около 0,1 мг/дм³ и была относительно стабильной (0,09 – 0,12 мг/дм³), в 2010 г. достигла 0,72 мг/дм³. Рост продуктивности озерной экосистемы отразился на прозрачности воды: она уменьшилась в 3 раза: с 1,3 до 0,4 м.

Урбанизация и развитие промышленности также вносят свой вклад в изменение состава вод. Примером таких водосборов может служить водосбор оз. Болысо вблизи г. Браслава Витебской обл. До 1970-х гг. водоем развивался в естественных условиях, затем на водосборе построили очистные сооружения, а сброс недостаточно очищенных сточных вод был направлен в озеро. Следствием интенсивного антропогенного влияния является изменение в соотношении ионов. С 1972 г. в водоеме более, чем в два раза возросло относительное содержание сульфатов, в три раза – хлоридов, почти в четыре раза – суммы ионов натрия и калия, а относительное содержание кальция, магния и гидрокарбонатного иона снизилось на 7, 8 и 5 % соответственно. По сравнению с природным фоном в воде оз. Болысо снизилась роль бикарбонатов, кальция, магния и

сульфатов и почти в три раза возросло относительное содержание суммы натрия, калия, хлоридов.

Хорошо согласуются с динамикой антропогенной нагрузки на водоем и величины водородного показателя. В многолетнем аспекте они изменяются в широком диапазоне – 7,20 – 9,61. Пределы колебаний рН в период с 1948 по 1972 гг. были незначительными, как в поверхностных, так и в придонных горизонтах воды и составляли 8,03 – 8,49 и 7,39 – 7,93 соответственно. Заметное увеличение с 1986 г. значений водородного показателя в поверхностных горизонтах воды – результат усиления фотосинтеза. Такие процессы постоянно наблюдаются в водоемах гипертрофного типа.

Изменения в гидрохимическом режиме озер могут происходить не только при изменении структуры водосборов или строительстве промышленных предприятий и объектов сельскохозяйственного производства. Существует группа озер с низкой минерализацией воды, высокой прозрачностью, кислой реакцией среды, невысокими концентрациями биогенных элементов (ацидотрофные водоемы). Их водосборы заняты лесом, хозяйственная деятельность на них почти не ведется. Наибольшую угрозу для таких озер представляет интенсивная рекреационная нагрузка, которая усилилась в последние десятилетия в связи с развитием транспорта и спутниковых навигационных систем. Примерами таких озер могут служить Свитязь, Белое (Лунинецкий район), Глубокое (Полоцкий район). В оз. Белое с 1989 до 2016 гг. минерализация в озере колебалась в пределах от 27,93 до 35,9 мг/дм³. При отборе проб в 2022 г. минерализация воды в поверхностном слое была равна 51,09 мг/дм³, в придонном оно возросло до 64,11 мг/дм³.

Рост минерализации произошел в основном за счет роста хлоридов. Кроме этого, возросло содержание некоторых катионов (Mg⁺ и K⁺). Концентрация гидрокарбонатов в поверхностном слое воды изменялась от 5,5 мг/дм³ в 2001 г. до 24,4 мг/дм³ в 2022 г. В 2022 г. на фоне двукратного роста концентрации хлоридов с 5,1 до 10,4 мг/дм³ произошло сокращение концентрации сульфатов почти в 1,5 раза (3,5 до 2,1 мг/дм³). Концентрация нитритов в воде не превышает 0,02 мг/дм³, содержание нитратов колеблется в достаточно широких пределах – от 0,05 до 0,58 мг/дм³ и находится в обратной зависимости с ионами аммония и в прямой – с количеством растворенного кислорода. К 2022 г. произошел резкий скачок концентрации ионов аммония, когда этот показатель возрос с 0,05 до 4,07 мг/дм³. Он превышает ПДК для хозяйственно-питьевого водоснабжения в 1,6 раза, для рыбопроизводства – в 6,3 раза. Основной причиной увеличения данного показателя является неограниченный поток отдыхающих, особенно в выходные дни.

В результате того, что реальная биогенная нагрузка из-за увеличивающегося притока туристов превышает допустимую, происходит перестройка всей лимносистемы: увеличивается концентрация соединений азота и фосфора, за счет увеличения биомассы фитопланктона снижается прозрачность воды, возрастает ее минерализация, снижается глубина произрастания погруженных макрофитов, исчезают охраняемые виды, требовательные к высокому качеству воды.

Улучшение качества воды отмечается, главным образом, в озерах, расположенных на территории национальных парков. Так, в озере Свирь, часть водосбора которого расположена на территории НП «Нарочанский», созданного в 1999 г., минерализация воды за последние 20 лет снизилась с 292,6 до 213,9 мг/дм³, а концентрация аммоний-иона – с 0,33 до 0,05 мг/дм³.

На региональном уровне существует обратная связь между лесистостью водосборов и средней минерализацией озерных вод: для озер Беларуси с лесистостью водосборов 80–100 % средняя минерализация вод составляет 113 мг/дм³, озер с

лесистостью водосборов 40–59,9 % – 173 мг/дм³, озер с минимальной лесистостью водосборов (0 – 19,9 %) средняя минерализация вод достигает 213 мг/дм³.

Между прозрачностью воды в озерах и периодом водообмена в них присутствует логарифмическая зависимость с корреляционным отношением между параметрами 0,48. Причем для мелководных остаточных и термокарстовых озер оно равно 0,72, для глубоких карстовых, ложбинных и эвразийских – 0,57.

Заключение

Анализ структуры водосборов озер на протяжении 1865 – 2020 гг. показал следующие общие закономерности: с конца XIX в. происходило увеличение доли сельскохозяйственных земель, которая достигла пика в конце 1970-начале 1980-х гг., после чего началось снижение доли пашни и увеличение лесистости, наблюдаемые до настоящего времени. Помимо этого, на заболоченных водосборах с конца XIX в. производилась осушительная мелиорация. Наиболее активно преобразование водосборов происходило во второй половине XX в.

Изменение структуры водосборов нашло свое отражение в гидрохимическом режиме озер. Так, например, после проведенной осушительной мелиорации на водосборе оз. Ореховское минерализация воды в нем выросла в два раза: со 118,6 до 241,4 мг/дм³, а прозрачность снизилась с 1,2 до 0,4 м. Улучшение качества воды отмечается, главным образом, в озерах, расположенных на территории национальных парков.

В последние десятилетия более выражено влияние непроектной (рекреационной) сферы хозяйства на водные объекты и их экологическое состояние. Наиболее высокие рекреационные нагрузки испытывают озера Центральной Беларуси (Свитязь) и Полесья (Белое, Лунинецкий район). В Поозерье туристический поток рассредоточен ввиду большого количества пригодных для купания водоемов. Также зачастую допустимые фосфорные нагрузки на водоемы Поозерья несравнимо выше, чем на озера Полесья, из-за больших объемов воды и активного водообмена.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект №X22M-069).

Acknowledgments

The work was partly supported by The Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project №X22M-069).

Список литературы

1. Власов Б. П. Антропогенная трансформация озер Беларуси: геоэкологическое состояние, изменения и прогноз. Минск: БГУ, 2004. 207 с.
2. Ежегодник качества поверхностных вод по гидрохимическим показателям на территории Республики Беларусь. Минск, 1983 – 2015.
3. Польская карта 1930 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://maps.vlasenko.net/historical/mapa-taktyczna-polski/P26_S44_Braslaw.jpg. Дата доступа: 10.10.2022 г.
4. Топографические карты Беларуси [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://maps.vlasenko.net/belarus/map1k-by.html>. Дата доступа: 10.10.2022 г.
5. OpenStreetMap [Электронный ресурс]. .Режим доступа: <https://www.openstreetmap.org/#map=12/55.7299/27.1448>. Дата доступа: 16.07.2022 г.

Особенности калибровки пространственно-распределенной модели стока ECOMAG для реки с преимущественно дождевым питанием

З.А. Сучилина*, Б.И. Гарцман

*Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия
mezozoya1@mail.ru*

Аннотация. Модель ECOMAG – пространственно-распределенная модель гидрологического цикла суши. При настройке модели ECOMAG важным этапом работы является калибровка оптимальных параметров, которые включают в себя параметры почво-грунтов, снеготаяния, испарения, инфильтрации и др. Использование пространственно-распределенной модели для краткосрочного прогнозирования стока требует специфической калибровки модели, многие методические аспекты которой еще не разработаны. В частности, настройка значения коэффициента шероховатости русла существенно влияет на вид гидрографа в условиях дождевого питания рек дальневосточного типа (на примере реки Уссури). Поэтому шероховатость русла была включена, как базовый параметр калибровки вместе с остальными параметрами, калибруемыми в базовой версии ECOMAG. В результате были получены разные наборы оптимальных параметров для разных периодов – для многоводных и маловодных лет, для весенних и летне-осенних сезонов. Применен также специальный алгоритм калибровки параметров по данным группы станций с использованием метода PCA (Principal Component Analysis), что позволяет эффективно разделять полезный сигнал и случайный шум в совокупностях данных. Целью работы является расширить понимание того, как зависит набор оптимальных параметров от выбранного периода, времени, водности и способа калибровки, а также, провести сравнительный анализ чувствительности параметров. В перспективе такой подход к калибровке позволит перейти к работе с гибридной моделью, которая способна выбирать набор параметров в зависимости от текущего состояния водного режима.

Ключевые слова: река Уссури, модель ECOMAG, шероховатость русла, краткосрочный прогноз, калибровка модели, дождевой тип питания реки.

Calibration specifics of the spatially-distributed runoff model ECOMAG for a river with the predominantly rain-fed regime

Z.A. Suchilina*, B.I. Gartsman

*Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia
mezozoya1@mail.ru*

Abstract. The ECOMAG model is a spatially-distributed terrestrial hydrological cycle model. When configuring the ECOMAG model, calibration of optimal parameters is an important step which includes soil parameters, snow melt, evaporation, infiltration, etc. Use of a spatially-distributed model for short-term run-off forecasting requires specific model calibration, many methodological aspects of which have not yet been developed. In particular, adjusting the channel roughness coefficient significantly affects the hydrograph under the conditions of rain-fed rivers of the Far East type (on the example of the Ussuri River).

Therefore, channel roughness was included as a basic calibration parameter together with the others parameters calibrated in the basic ECOMAG version. This resulted in different sets of optimal parameters for different periods - for high-water and low-water years, for the spring and summer-autumn seasons. A special calibration algorithm based on the data of a group of stations was also applied using the PCA method (Principal Component Analysis). This allows efficient separation of useful signal and random noise in data sets. The aim of the work is to increase the understanding of how the set of optimal parameters depends on the selected period, time, water and calibration method, and to conduct a comparative analysis of the sensitivity of the parameters. This calibration approach will eventually lead to a hybrid model which is able to select a set of parameters depending on the current state of the water regime.

Keywords: Ussuri river, ECOMAG model, channel roughness, short-term forecast, model calibration, rain-fed rivers.

Введение

Вопрос включения коэффициента шероховатости русла в качестве базового параметра наряду с остальным набором параметров при настройке модели ECOMAG является основополагающим как с теоретической, так и с практической точки зрения. Модель ECOMAG в большинстве случаев адаптирована для рек в условиях умеренно-континентального климата с преобладанием снегового типа питания. Очевидно, что в условиях муссонного климата с большим количеством дождей в течении летне-осеннего паводкового сезона набор параметров будет отличаться и особую роль играет значение коэффициента шероховатости русла. Данный параметр крайне чувствителен, и регулировка коэффициента шероховатости русла позволяет нам более детально учитывать физику процесса при моделировании дождевых паводков, а также, воспроизводить подъемы и спады расходов воды с точки зрения натуральных условий более приближенными к реальной ситуации на водосборе. Апробация данного подхода необходима для составления качественного краткосрочного прогноза, что является неотъемлемой частью дальнейшей работы.

Целевым аспектом работы является понимание того, как зависит набор оптимальных параметров, включающих коэффициент шероховатости русла, от выбранного периода, времени, водности и способа калибровки на примере реки Уссури с преимущественно дождевым типом питания.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является бассейн реки Уссури до замыкающего створа р.п. Кировский (площадь водосбора 24400км²), который расположен в Приморском крае Российской Федерации. Выбранная часть бассейна р. Уссури обладает достаточно надежными и продолжительными рядами гидрометеорологических данных, что позволяет испытать в качестве основного расчетного инструмента Информационно-моделирующий комплекс ECOMAG (ECOLOGICAL Model for Applied Geophysics; автор Ю.Г.Мотовилов) [1;2].

В качестве базового периода калибровки был выбран период 1999-2009 гг., что связано с наличием качественной гидрометеорологической информации. Калибровка модели выполнялась для разных периодов и сезонов 1999-2009 гг.: калибровка сухого периода 2003, 2007-2009 гг., фактический расход воды не превышает 1000 м³/с; калибровка влажного периода 1999-2002, 2004-2006 гг., фактический расход воды превышает 1000 м³/с; калибровка весеннего периода (с 20 марта по 31 мая каждого года за период 1999-2009 гг.); калибровка летне-осеннего периода (с 1 июня по 30 сентября каждого года за период 1999-2009 гг.).

На каждом этапе калибровки в первую очередь оценивался и подбирался коэффициент шероховатости русла, затем настраивались остальные параметры. После

чего проводилась оценка результатов по критерию Нэша-Сатклифа (NS) для замыкающего створа р.п. Кировский и рассчитанному как средневзвешенный по дисперсии для группы постов.

Для устранения скоррелированности между постами и получения адекватной оценки качества моделирования использовался Метод Главных Компонент (PCA – Principal Component Analysis) [3]. Суть метода заключается в линейном преобразовании исходной системы координат, заданной матрицей скоррелированных исходных данных, в новую, которую принято называть *U*-пространством. *U*-пространство строится таким образом, что первая его ось ориентирована по направлению наибольшего рассеяния исходного облака данных, вторая ось вдоль максимального рассеяния перпендикулярно первой оси и т.д. В результате исходный набор переменных проецируется в новый набор переменных в *U*-пространстве, называемый главными компонентами. Число главных компонент равно исходному числу переменных, но они являются статистически независимыми (некоррелированными), т.е. ортогональными. Кроме того, в силу способа построения *U*-пространства, дисперсии главных компонент последовательно уменьшаются от первой до последней, в сумме достигая величины полной дисперсии исходной совокупности данных. Первые две главные компоненты берут на более 95% дисперсии полезной исходной информации. Оставшиеся менее 5% дисперсии отбрасываются как шум, который включает в себя погрешности измерения расходов воды и другие ошибки. Далее мы переводим модельные расходы из *U*-пространства в обычное с помощью матрицы коэффициентов. И рассчитываем RNS (многомерный критерий Нэша-Сатклифа) между очищенными от шума модельными данными и исходными фактическими данными.

Таким образом, данная методика позволяет использовать всю совокупность исходных данных с постов и с помощью МГК исключать шум, привносимый различными источниками, что приводит к максимально качественной многомерной калибровке.

Результаты и выводы

В ходе работы были подобраны разные наборы параметров для разных периодов и сезонов, что дает возможности и варианты использовать ту или иную комбинацию параметров в зависимости от ситуации. Результаты представлены в Табл.. На этапе методологии были выделены разные сезоны, для которых были подобраны параметры, и затем проводилась оценка того, как меняются параметры и насколько. Выводы можно сделать следующие.

Во-первых, есть параметры, которые не меняются совсем в связи с тем, что они никак не влияют на вид гидрографа, а также, не целесообразны и физически не обоснованы для данной территории. К ним относятся *Zrlake* (уклон в озерах), *GFAOPT* (горизонтальная водопроницаемость – горизонт А), *ULOPT* (водоудерживающая способность снега) и параметры *Prliq*, *Prsno*, отвечающие за уменьшение/увеличение количества жидких и твердых осадков не менялись априори.

Во-вторых, есть параметры, которые меняются. В качестве меры изменчивости была выбрана величина изменения разницы между максимальным и минимальным значениями относительно среднего значения параметра. Она может быть 50% и больше, что говорит нам о сильной изменчивости параметра, а может быть меньше 50% от среднего, что выявляет слабоменяющиеся параметры.

К сильно изменяющимся параметрам относятся: *FAOPT* (вертикальная водопроницаемость – горизонт А), *GFAOPT* (горизонтальная водопроницаемость - горизонт А), *POOPT* (поверхностное задержание (коэффициент Попова)), *TCRpre* (критическая температура для определения фазы атмосферных осадков

(жидкие/твердые)), РКехр (показатель степени в формуле инфильтрации) и TCRst (критическая температура таяния снежного покрова).

Табл. Результаты подбора параметров.

№ параметра	Наименование параметра	Вид калибровки	Базовый период (1999-2009)	Сухой период (Кировский)	Сухой период (NS по группе постов)	Влажный период (NS Кировский= NS группы постов)	Весна (NS Кировский= NS группы постов)	Лето (Кировский)	Лето (NS по группе постов)	Весь период (1999-2009) с использованием метода PCA
			Нэш-Сатклиф	0.82	0.835	0.792	0.87	0.854	0.761	0.712
		Шероховатость русла	0.1	0.05	0.05	0.1	0.08	0.1	0.1	0.1
1	вертикальная водопроницаемость - горизонт А	FAOPT	2	4.5	4.5	2	2.2	2.1	2.1	1.9
2	уклон в озерах	Zrlake	2.1207	2.1207	2.1207	2.1207	2.1207	2.1207	2.1207	2.1207
3	горизонтальная водопроницаемость - горизонт А	GFAOPT	80.09	80.09	80.09	80.09	80.09	80.09	80.09	80.09
4	горизонтальная водопроницаемость - горизонт В	GFBOPT	40	20	10	40	47	33	33	40
5	испарение в почвах	EKOPT	0.6	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
6	глубина горизонта А, высота верхнего почвенного слоя	ZAOPT	2	2.5	2.6	2.2	2	2.5	2.6	2.4
7	поверхностное задержание (коэффициент Попова)	POOPT	1	0.7	0.4	1	0.7	1.1	1.1	1
8	коэффициент стаивания	ALFOPT	0.5	0.7	0.7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
9	критическая температура для определения фазы атмосферных осадков (жидкие/твердые)	TCRpre	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
10	водоудерживающая способность снега	ULOPT	0	0	0	0	0	0	0	0
11	показатель степени в формуле инфильтрации	RKехр	2.5	2.5	2.5	2.5	0.9	2.5	2.5	2.5
12	критическая температура таяния снежного покрова	TCRst	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
13	коэффициент для осадков в жидкой фазе	Prlq	1	1	1	1	1	1	1	1
14	коэффициент для осадков в твердой фазе	Prsno	1	1	1	1	1	1	1	1

К слабоизменяющимся параметрам относятся: ЕКОРТ (испарение в почвах), ZAOPT (глубина горизонта А, высота верхнего почвенного слоя), ALFOPT (коэффициент стаивания).

В-третьих, в качестве отдельного параметра рассматривался коэффициент шероховатости. Причем, ранее он никогда не калибровался. Мы вносим шероховатость в число калибруемых параметров, так как это имеет рациональное обоснование,

связанное с тем, что мы работаем с дождевым режимом реки и значение коэффициента шероховатости имеет существенное влияние на дождевые паводки. При этом, в ходе калибровки, было установлено, что шероховатость относится к сильно изменяющимся параметрам и это изменение физически обосновано и логично.

Благодарности

Авторы выражают благодарность лаборатории “Гидроинформатики” ИВП РАН за всестороннюю поддержку в области данных научных исследований.

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0001 Государственного задания ИВП РАН.

Acknowledgments

The authors thank the Laboratory of Hydroinformatics of the WPI RAS for comprehensive support in the field of scientific research data.

The investigation was carried out within the framework of the theme No. FMWZ-2022-0001 of the State Assignment of the WPI RAS.

Список литературы

1. Мотовилов Ю.Г. Информационно-моделирующий комплекс ECOMAG для моделирования речных бассейнов // VI Всероссийский гидрологический съезд. Тезисы докладов. Секция 5. СПб.: Гидрометеиздат, 2004. С. 139-140.

2. Motovilov Yu.G., Gottschalk L., Engeland K. and Belokurov A. ECOMAG – regional model of hydrological cycle., Application to the NOPEX region. Department of Geophysics, University of Oslo, Institute Report Series no.105, May 1999.(8)

3. Pomerantsev, A.L. Chemometrics in Excel. Wiley: Hoboken, New Jersey, 2014. 336 p. <https://doi.org/10.1002/9781118873212>

Трансформация засушливых условий на территории Беларуси в период изменения климата

И.В. Тарасевич^{1*}, Ю.А. Гледко¹, И.С. Данилович^{1,2}

¹Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь
²Институт природопользования НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь
ira5582831@yandex.by

Аннотация. На основе данных гидрометеорологических наблюдений проведена характеристика трансформации засушливых условий путем пространственного распределения осадков и модуля стока по территории Беларуси за период изменения климата. Отмечается тенденция к уменьшению количества осадков в отдельные месяцы теплого периода года – июнь, август, сентябрь, и увеличение в мае, июле и октябре. Наибольшее увеличение количества осадков в период изменения климата отмечено в феврале, а наибольшее уменьшение – в июне.

Ключевые слова: климат, атмосферные осадки, речной сток, засухи, антициклоны.

Transformation of arid conditions on the territory of Belarus during the period of climate change

I.V. Tarasevich^{1*}, Yu.A. Hledko¹, I.S. Danilovich^{1,2}

¹Belarussian State University, Minsk, Belarus
²Institute for Nature Management NAS of Belarus, Minsk, Belarus
ira5582831@yandex.by

Abstract. Based on the data of hydrometeorological observations, a characterization of the transformation of arid conditions was carried out by means of the spatial distribution of precipitation and runoff modulus over the territory of Belarus during the period of climate change. There is a tendency to reduce the number of days in certain months of the warm period of the year - June, August, September, and increase in May, July and October. The largest increase in precipitation during the period of climate change was observed in February, and the largest decrease in June.

Keywords: climate, precipitation, river runoff, droughts, anticyclones.

Введение

Засухи и засушливые условия в атмосфере, почве, водных системах, от которых ежегодно страдает значительная часть населения Земли, являются характерной чертой трансформации климата. Тенденции частоты метеорологических засух в Европе показывают увеличение их повторяемости с 1950 года в южной Европе и большей части центральной Европы. Ожидается, что частота метеорологических засух к середине 21 столетия увеличится на большей части рассматриваемого региона. В связи с продолжающимся периодом заметного изменения климата, неоднородным пространственным распределением трендов осадков и усилением засушливости территории Беларуси, и как следствие изменений условий формирования речного стока, особенно в период открытого русла, актуальность детальных исследований является

несомненной и необходима для разработки мер адаптации к негативным климатическим изменениям.

Цель работы – изучение трансформации засушливых условий на территории Беларуси в период изменения климата.

Предмет исследования – закономерности пространственно-временного распределения атмосферных и гидрологических засух на территории Беларуси.

Материалы и методы исследования

Достоверность полученных результатов базируется на использовании фактических данных Государственного климатического и водного кадастров Республики Беларусь [1], представленных месячными и годовыми суммами осадков по 12 метеорологическим станциям; среднемесячными и среднегодовыми расходами воды по данным 32 гидрологических постов Белгидромета за период 1945-2020 гг.

Объект исследования – засушливые явления в атмосфере и водных системах.

Для количественной оценки распределения осадков и стока выполнен факторный анализ, который в качестве исходных метеорологических и гидрологических параметров включает месячные суммы осадков (P_{1-12} , мм) и средние месячные расходы воды (Q_{1-12} , м³/с).

Для пространственного анализа в работе использованы географические и картографические методы. По полученным данным произведено картографирование величин сумм осадков и стока с использованием информационной системы для картографии ArcGIS.

Результаты и выводы

Территория Восточной Европы является регионом, где нередко происходят засухи разной интенсивности и продолжительности. Наиболее подвержены засухе южные районы в теплый период года, когда в атмосфере преобладают антициклонические процессы, способствующие интенсивному радиационному прогреву и иссушению воздуха и почвы из-за дефицита осадков. В среднем за год на территорию Беларуси приходят или формируются над ней 15-16 антициклонов.

С начала XX века до конца 80-х годов на территории Республики Беларусь наблюдалось чередование кратковременных периодов потепления и непродолжительных периодов похолодания. С 1989 года отмечается самый продолжительный период потепления [2].

Среднее годовое количество осадков в Беларуси в конце XX века существенно не изменилось [3]. В период 1989–2020 гг. в целом по стране оно увеличилось. Отмечается тенденция к уменьшению количества осадков в отдельные месяцы теплого периода года – июнь, август и сентябрь, и увеличению в мае июле и октябре.

Осадки. Атмосферная засуха формируется в условиях дефицита осадков, на фоне высоких температур и при низкой влажности воздуха, которые создаются благодаря высокому уровню инсоляции в отсутствии облачности. Такое сочетание метеорологических параметров ведет к уменьшению стока. Атмосферные засухи могут быстро начинаться и внезапно заканчиваться, в случае выпадения обильного количества осадков или наступления длительного периода с регулярным увлажнением атмосферными осадками. Однако, если осадки отсутствуют длительный период, запасы почвенной влаги без пополнения их дождями постепенно истощаются. Дальнейшая эволюция засушливых условий может привести к образованию гидрологических засух.

С учетом накопленных материалов наблюдений и в связи с изменениями в структуре выпадения осадков в последние 30 лет, которые свидетельствуют о нарастании экстремальности климата, требуется проведение современной оценки режима увлажнения в период изменения климата.

По данным метеорологических наблюдений за период с 1945 по 1988 гг. и с 1989 по 2020 гг. составлены таблицы годовых сумма осадков и дополнительно осадков за теплый период. Данные за период с 1945 по 1988 гг. представлены в Табл. 1.

Табл. 1 Суммы осадков теплого сезона за период 1945-1988 гг., мм.

Станция	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Бобруйск	37,6	48,6	82,2	83,3	80,0	56,6	45,4
Борисов	44,8	58,6	81,1	82,1	74,9	62,5	48,9
Брест	38,1	55,4	77,6	77,9	78,4	50,2	42,1
Гомель	36,5	48,0	80,7	80,1	65,8	49,6	42,2
Гродно	42,1	53,9	77,2	82,2	72,3	52,3	43,8
М. Горка	38,2	58,5	78,5	81,6	79,2	47,7	43,7
Минск	41,6	62,7	78,5	84,5	76,1	59,5	47,3
Полоцк	42,0	53,0	79,6	86,7	75,6	72,5	52,6
Витебск	41,0	54,7	74,8	90,6	72,8	69,1	46,8
Орша	31,1	40,8	56,2	81,8	86,8	76,6	63,5
Могилев	41,3	59,3	78,9	80,8	70,5	55,9	45,5
Горки	41,8	54,9	73,5	84,4	75,1	61,4	45,6

Осадки в основном обуславливаются обстоятельствами атмосферных циркуляций, географическим положением и характером рельефа. Распределение осадков в значительной степени зависит от внешних условий, таких как рельеф местности и характер подстилающей поверхности. Западный перенос воздушных масс определяет уменьшение осадков к юго-востоку.

По данным Табл. 1 построены карты распределения сумм осадков на территории Республики Беларусь (Рис. 1).

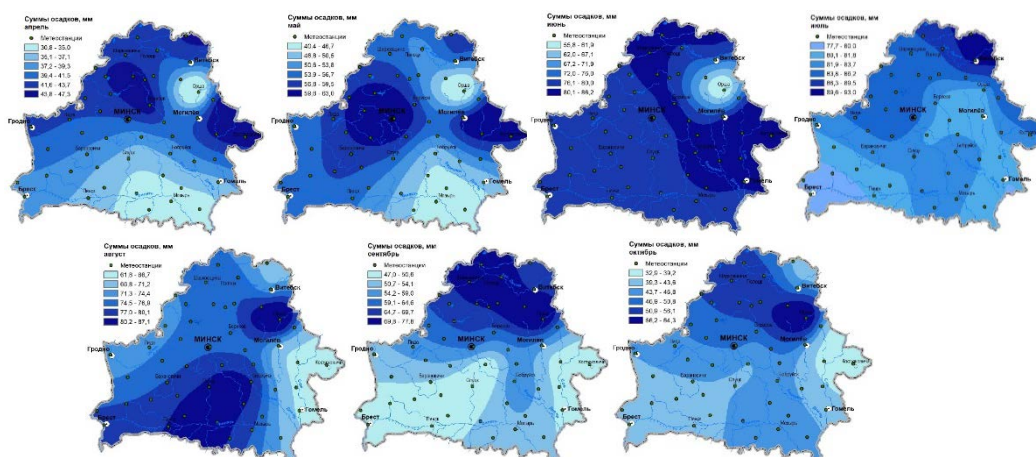


Рис. 1 Распределение осадков теплого сезона (апрель-октябрь) 1945-1988 гг.

Во все периоды года Центральная часть Республики Беларусь, более возвышенная, получает больше осадков, чем северные и южные низменности. На территории Белорусской гряды больше осадков выпадает в западной части.

По данным инструментальных наблюдений на 12 метеостанциях составлена Табл. 2. В ней представлены осредненные суммы осадков по месяцам в теплый сезон (апрель – октябрь) за период с 1989 по 2020 гг.

По данным Табл. 2 построены карты распределения сумм осадков на территории Республики Беларусь (Рис. 2).

Анализ выпадения осадков на исследуемой территории за период потепления климата (1989-2020 гг.) показывает, что их количество в целом по стране существенно

не изменилось. Следует отметить незначительное увеличение количества осадков холодного периода и уменьшение количества осадков теплого периода.

Табл. 2 Суммы осадков теплого сезона за период 1989-2020 гг., мм.

Станция	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Бобруйск	40,7	60,9	75,6	89,2	56,8	51,3	55,3
Борисов	41,3	62,7	79,3	97,2	75,7	61,2	54,1
Брест	39,0	65,1	67,5	82,1	69,7	56,3	41,3
Гомель	38,1	63,8	73,4	95,6	57,3	54,0	55,7
Гродно	34,4	53,7	60,9	86,3	60,5	51,5	41,5
М. Горка	36,8	58,4	71,3	89,8	64,3	50,1	49,4
Минск	43,1	66,0	80,0	97,0	71,8	56,4	54,3
Полоцк	40,5	62,9	84,3	89,2	74,7	62,5	65,0
Витебск	38,0	61,5	75,6	92,2	79,7	65,4	67,0
Орша	38,8	65,7	75,4	81,4	72,2	59,7	57,5
Могилев	40,8	57,2	68,5	87,7	64,8	52,3	54,9
Горки	38,0	59,5	71,0	85,0	73,7	54,1	59,0

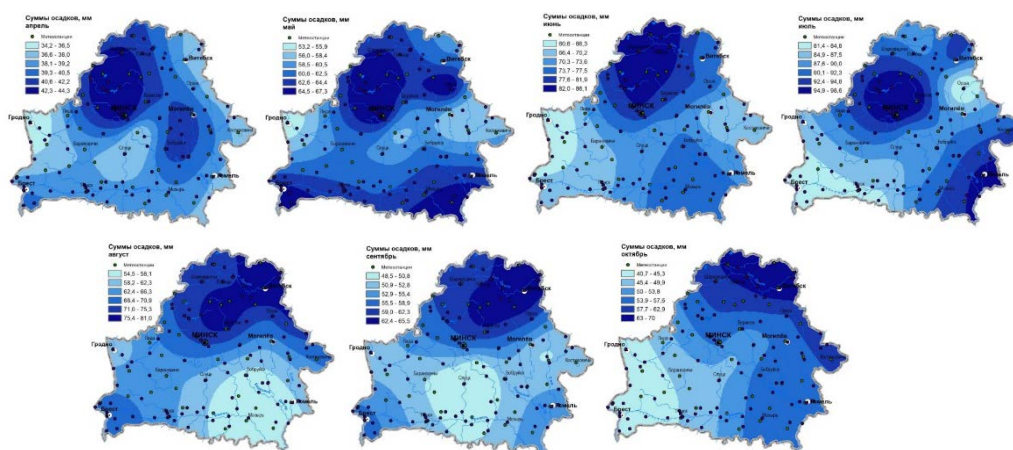


Рис. 2 Распределение осадков теплого сезона (апрель-октябрь) 1989-2020 гг.

Территория Беларуси располагается в переходной зоне между севером, где отмечается увеличение осадков и минимальный сток увеличивается, и югом, где наблюдается уменьшение осадков и минимального стока. За последние 30 лет, охватывающих период потепления климата Беларуси (1989–2020 гг.), отсутствуют значимые изменения годовых сумм осадков, но в то же время засушливые явления отмечаются более часто [4].

Сток. Величины суммарного речного стока на территории Беларуси в многолетнем разрезе колеблется в пределах многолетнего значения 56 км^3 , в последние десятилетия отмечаются их незначительное снижение [5].

Изменение климата, отмечающееся в последние десятилетия на глобальном уровне, имеет свои региональные различия. Изменения гидрологического режима связаны с разнонаправленными тенденциями выпадения осадков. На реках Беларуси незначительно изменилась доля летнего и осеннего стока, но при этом наблюдается тенденция снижения наименьших уровней летне-осенней межени.

По данным инструментальных наблюдений по 32 гидрологическим постам рассчитаны величины средних модулей стока за теплый сезон (апрель–октябрь) по двум периодам: с 1945 по 1988 гг. и с 1989 по 2020 гг. По полученным данным построены

карты распределения средних модулей стока за теплый сезон на территории республики Беларусь (Рис. 3, 4).

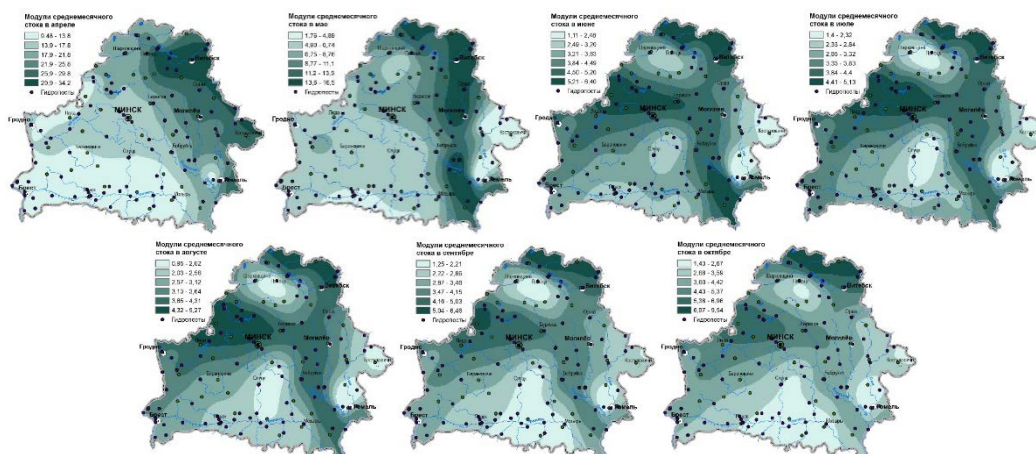


Рис. 3 Распределение модулей стока теплого сезона (апрель-октябрь) 1945-1988 гг.

Карты распределения среднееголетнего модуля стока за теплый период по территории Беларуси отражают зональный характер распределения среднееголетнего стока, изменяющийся для теплого периода.

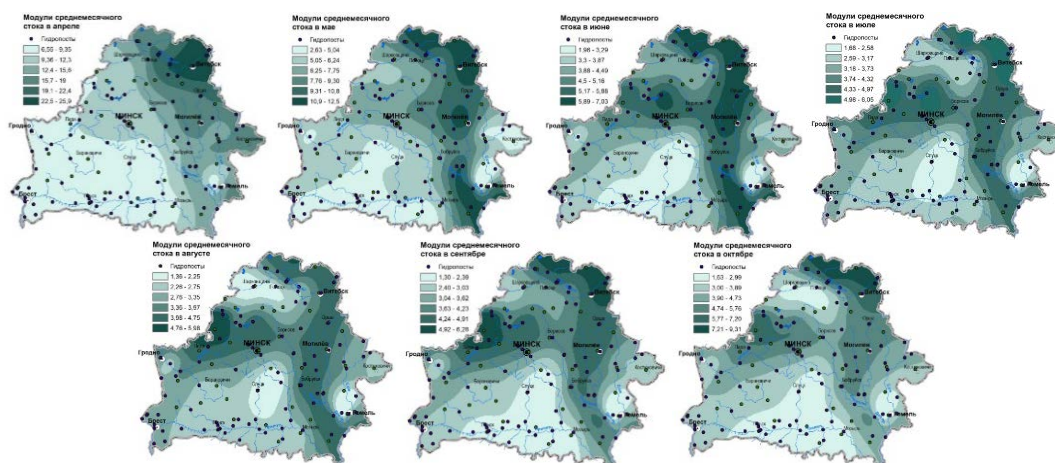


Рис. 4 Распределение модулей стока теплого сезона (апрель-октябрь) 1989-2020 гг.

В связи с изменением климата за последние десятилетия увеличилась неравномерность распределения стока в южной части Беларуси – бассейнах рек Припяти, Западного Буга, южной части бассейнов Днепра и Немана – произошло снижение стока, которое имело место во все сезоны, за исключением зимнего, когда сток увеличился. Исключение составляет бассейн Западного Буга, для которого характерно снижение стока во все сезоны года. Наоборот, в северной и восточной частях Беларуси в бассейне Западной Двины и в северной части бассейна Днепра за последние 30 лет имело место увеличение среднегодового стока (Рис. 4).

На режим меженного стока в теплый период года оказали влияние изменения в структуре выпадения осадков, которые заключаются в росте максимальных сумм осадков [6]. На реках отмечается увеличение повторяемости очень маловодных периодов во всех речных бассейнах, и одновременно увеличение высоты дождевых паводков и/или рост наименьших расходов воды периода открытого русла (кроме бассейна р. Неман).

При анализе распределение среднего многолетнего модуля стока по территории Беларуси (Рис. 3, 4) отмечаются следующие характерные особенности: на севере и северо-востоке и на юге и юго-востоке наблюдается уменьшение осадков и стока; увеличение стока на возвышенностях (Опшмянская, Минская, Городокская) и его уменьшение в пределах Полесской низменности.

Изменения гидрологического режима связаны с разнонаправленными тенденциями выпадения осадков и повышения температуры воздуха. Наибольшие изменения характерны для бассейнов малых рек вследствие их более высокой чувствительности к климатическим аномалиям. В теплый период года отмечены малые изменения доли летне-осеннего стока, но установлен рост повторяемости маловодных периодов на реках и одновременный рост высоты дождевых паводков на большинстве рек страны.

Список литературы

1. ГКК. Государственный климатический кадастр: материалы наблюдений Государственной сети гидрометеорологических наблюдений Республики Беларусь. № свид-ва 0870100021, 2020
2. Логинов В.Ф., Лысенко С.А., Мельник В.И. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования. Минск: Энциклопедикс; 2020. 218.
3. Дубенок С.А., Корнеев В.Н., Михан О.Н., Данилович И.С., Квач Е.Г. Глава 4. Прогноз изменения и использования водных ресурсов и состояния поверхностных вод // Прогноз состояния природной среды Беларуси на период до 2035 года. Под общ. ред. В.С. Хомича; Национальная академия наук Беларуси, Институт природопользования; Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. – Минск: Беларуская навука, 2022. – 360 с.
4. Данилович И.С., Логинов В.Ф. Текущие и ожидаемые изменения климата на территории Беларуси // Центральноазиатский журнал географических исследований, № 1-2, 2021. С. С.35-48.
5. Волчек А. А. Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учетом изменения климата / А. А. Волчек, В. Н Корнеев. – Брест: Альтернатива, 2017. – 240 с.
6. Данилович И.С. Современные изменения режима увлажнения в теплый период года и условий формирования стока летне-осенней межени на реках Беларуси / Данилович И.С., Квач Е.Г., Журавович Л.Н., Пискунович Н.Г. // Природные ресурсы. №1. 2021. – С. 22-33.

Оценка скорости подледникового таяния Антарктиды на основе одномерной мультифазной модели

А.А. Тарасов*, М.М. Степанова

*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия
sternpasserby@gmail.com*

Аннотация. В данной работе мы провели численное моделирование донного таяния всего антарктического ледяного щита. Для этого была разработана трёхфазная численная модель на основе одномерной однофазной задачи Стефана. Для дискретизации уравнений используется неявная разностная схема на неоднородной сетке первого порядка точности. Численное моделирование реализовано и проведено в параллельном режиме в среде MATLAB. Получены распределение скоростей донного таяния. Средняя скорость донного таяния составила 29 Гт/год.

Ключевые слова: Задача Стефана, трёхфазная задача Стефана, MATLAB, метод конечных разностей, ледяной щит Антарктиды, донное таяние

Estimation for the basal melt of Antarctica based on one-dimensional multiphase model

A.A. Tarasov*, M.M. Stepanova

*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia
sternpasserby@gmail.com*

Abstract. In this paper, we have carried out numerical simulation of the basal melt of the entire Antarctic ice sheet. For this, a three-phase model was developed based on the one-dimensional one-phase Stefan problem. For discretization, an implicit finite difference scheme is used on a non-uniform grid of first order accuracy. Numerical simulation is implemented and carried out in parallel in the MATLAB environment. Rates of basal melt were obtained. The average basal melt rate is estimated at 29 Gt/year.

Keywords: Stefan problem, three-phase Stefan problem, MATLAB, finite difference method, Antarctic ice sheet, basal melting

Введение

В последние годы возросло количество исследований, направленных на оценку баланса массы ледниковых покровов и подледного таяния. Вода в ледниках и под ними занимает сравнительно небольшой объем относительно льда (1-2%), но именно она влияет на динамику изменения климата. Согласно современным представлениям, антарктический ледниковый покров скрывает около пятисот подледных водоёмов. Изучение жизненного цикла подледниковых водоёмов, включающего их формирование и последующее развитие вплоть прорыва, либо замерзания, становится особенно актуальным в свете наблюдаемых глобальных климатических изменений и повышения уровня моря. Кроме того, исследование субгляциальных гидрологических процессов дает понимание не только состояния и динамики ледника, но и формирования современного подледного рельефа. Наряду с данными полевых исследований все большее значение приобретают результаты численного моделирования.

Компьютерное моделирование является одним из способов определения вероятных местоположений подледниковых озёр. Чаще всего в качестве математической модели используются либо уравнение Навье-Стокса, либо его приближения [1; 2]. Они позволяют описывать движение ледника как текучей непрерывной среды, но при этом не учитывают наличие фазового перехода лёд-вода. Для учёта последнего можно использовать математическую модель на основе краевой задачи Стефана с подвижной границей - задачи определения температурного распределения в каждой фазе вещества и положения межфазной границы.

В данной работе представлена численная модель донного таяния антарктического ледника на основе одномерной мультифазной задачи Стефана, которая описывает появление, эволюцию и вырождение под- и надледниковой жидкой фазы. Модель учитывает ряд конкретных условий протекания процесса. В частности, учитывалась аккумуляция, поверхностный температурный режим, вертикальное движение ледника.

Трёхмерное представление ледяного щита Антарктиды было построено на основе топографических данных из базы международного проекта Vedmap2 [3]. Данные содержат три топографические характеристики: рельеф ложа ледника, рельеф поверхности ледника и толщина льда. Характеристики определены на равномерной сетке с шагом 1 км в декартовой системе координат и измеряются в метрах над уровнем моря. В каждом узле данной сетки независимо друг от друга решались одномерные трёхфазные задачи Стефана вдоль вертикального направления, где первая и третья фазы вещества – подледниковая и надледниковая вода соответственно, а вторая фаза – ледник.

В данной работе не учитывались горизонтальное распространение тепла, перераспределение талой воды, взаимодействие с океаном, растекание ледника вследствие его аморфности.

Математическая модель

Одномерная задача Стефана формулируется следующим образом: для j -той ($j = 1, 2, 3; x \in \mathbb{R}^1$) фазы вещества с распределением тепла u_j , занимающей объем пространства $s_{j-1}(t) \leq x \leq s_j(t)$, необходимо определить u_j в каждый момент времени и координаты границ $s_{j-1}(t)$ и $s_j(t)$ фазы в каждый момент времени.

Ось X направлена от ложа ледника вверх. Фазы вещества расположены вдоль оси X в следующем порядке: подледниковая вода ($s_0 \leq x \leq s_1(t)$, $s_0 = const$), ледник ($s_1(t) \leq x \leq s_2(t)$), надледниковая вода ($s_2(t) \leq x \leq s_3(t)$).

Для каждой фазы вещества записывается краевая задача вида

$$\begin{cases} c_j \rho_j \frac{\partial u_j}{\partial t} = \lambda_j \frac{\partial^2 u_j}{\partial x^2}, & s_{j-1}(t) \leq x \leq s_j(t), \\ \alpha_{00} u_j + \alpha_{01} \frac{\partial u_j}{\partial x} = g_j^b(t), & x = s_{j-1}(t), \\ \alpha_{10} u_j + \alpha_{11} \frac{\partial u_j}{\partial x} = g_j^t(t), & x = s_j(t), \\ u_j = f(x), & t = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где c_j – удельная теплоёмкость, ρ_j – плотность, λ_j – коэффициент теплопроводности воды.

Для подледниковой воды $\alpha_{00} = \alpha_{11} = 0$, $\alpha_{01} = -\lambda_j$, $\alpha_{10} = 1$, $g_1^b(t) = g_0$ – геотермический поток от ложа горных пород, $g_1^t(t) = U_F(H)$ – линейная зависимость температуры плавления льда от толщины льда [1]. Для ледника $\alpha_{00} = \alpha_{10} = 1$, $\alpha_{01} = \alpha_{11} = 0$, $g_2^b = U_F(H)$, $g_2^t = U_F$ – температура плавления льда. Для надледниковой воды

$\alpha_{00} = \alpha_{10} = 1$, $\alpha_{01} = \alpha_{11} = 0$, $g_3^b = U_F$, $g_3^t = g_3(t)$ – температурный режим на поверхности ледника.

Движение границ фаз определяется условием Стефана [2]:

$$q\rho \frac{ds_1}{dt} = \lambda_i \frac{\partial u_2}{\partial x} \Big|_{x=s_1(t)} - \lambda_w \frac{\partial u_1}{\partial x} \Big|_{x=s_1(t)}, \quad (2)$$

$$v_2 = \frac{\lambda_i}{q\rho} \frac{\partial u_2}{\partial x} \Big|_{x=s_1(t)} - \frac{\lambda_w}{q\rho} \frac{\partial u_1}{\partial x} \Big|_{x=s_1(t)}, \quad (3)$$

где q – удельная теплота плавления льда, v_2 – скорость движения границы s_2 без учёта проседания ледника. Одна и та же масса льда занимает больше объема, чем та же самая масса воды, и это влияет на движение поверхности ледника. Скорректированная скорость даётся выражением:

$$\frac{ds_2}{dt} = \frac{ds_1}{dt} \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_i}\right) + v_2 \frac{\rho_w}{\rho_i} + \zeta, \quad (4)$$

где ζ – поправка, связанная с аккумуляцией осадков на поверхности ледника.

Уравнение для границы s_3 :

$$\frac{ds_3}{dt} = \left(\frac{ds_1}{dt} - v_2\right) \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) + \zeta, \quad (5)$$

Таким образом, получена замкнутая система уравнений для краевой задачи.

Перед дискретизацией задачи была проведена процедура обезразмеривания, заключающаяся в переходе от размерных координат x , температуре u и времени t к безразмерным координатам \tilde{x} , \tilde{u} и \tilde{t} следующими преобразованиями: $x = x_0 \tilde{x}$, $u = u_0 \tilde{u}$, $t = t_0 \tilde{t}$. В качестве характерного размера x_0 выбрана начальная толщина льда в данной точке континента. В качестве характерной температуры используется температура плавления льда $u_0 = 273.15$ К. Характерное время выбрано таким, чтобы максимально упростить вид уравнения теплопроводности: $t_0 = c_w \rho_w x_0^2 / \lambda_w$

Существенную сложность для численного решения представляет подвижность границ. Для решения этой проблемы был применён метод выпрямления фронта [3]. Он заключается в переходе от нестационарной области $s_{j-1}(t) \leq x \leq s_j$ к стационарной $0 \leq x \leq 1$ путём применения преобразования:

$$\xi(x) = \frac{x - s_{j-1}(t)}{s_j(t) - s_{j-1}(t)}, \quad (6)$$

Дискретизация задачи

После перехода к новым координатам задачу можно решать любыми сеточными методами. В данной работе для дискретизации задачи применялась неявная конечно-разностная схема на равномерной и неравномерной сетке. Введение неоднородной сетки, сгущающейся у фазовых границ, позволяет уменьшить количество узлов, что существенно снижает время расчётов. Для неоднородной сетки использовалась неявная разностная схема с первым порядком точности по времени и по координате, сводящая задачу Стефана к системе линейных уравнений с трёхдиагональной матрицей.

Вырождение и появление фаз вещества

Математическая формулировка задач Стефана никак не учитывает возможность появления/исчезновения фаз. Границы разных фаз вещества не знают друг о друге, и при совпадении их координат в условии Стефана появляется деление на ноль. Поэтому, данная ситуация требует отдельной обработки на уровне численного решения.

В случае трёхфазной задачи Стефана реализована возможность исчезновения и появления водных фаз. Вырождение фазы льда не предусмотрено, поскольку характерная толщина ледника значительно больше уровня талой воды под или над ним.

Механизм вырождения фаз следующий: если в ходе эволюции координат оказывается, что $s_{j-1} \geq s_j$, то граница s_{j-1} устанавливается на координату s_j , и заменяются краевые условия. Если исчезла верхняя фаза, то её краевое условие с границы s_3 приписывается границе верхней кромки ледника s_2 . Аналогично в случае исчезновения нижней водной фазы.

Механизм появления фазы был реализован на основе закона сохранения энергии. При формальном вычислении распределения температуры никак не обрабатывается состояние переохлаждённой воды или перегретого льда. Поэтому, возможна такая ситуация, когда часть узлов фазы льда, находящихся у границы фазы, имеет температуру выше температуры плавления льда. В этом случае происходит вычисление количества «лишней» энергии путём численного интегрирования методом трапеций, и эта энергия направляется на зарождение новой фазы.

Условия и результаты моделирования

На поверхности задан синусоидальный режим изменения температуры:

$$U(t) = \bar{U} + \Delta U \sin(2\pi t), \quad (7)$$

где t – время, \bar{U} – среднегодовая температура, $\Delta U = (\max(U) - \min(U))/2$ – годовая амплитуда температуры. Две последние величины получены из [4].

Данные по аккумуляции осадков в Антарктиде и по геотермическому потоку взяты из [5] и [6] соответственно.

Топографические характеристики ледника (рельеф ложа, рельеф поверхности и толщина льда) получены из базы Vedmap2. Моделирование производилось на разреженной сетке с шагом 10 км. Также были отброшены точки с ненулевым расстоянием между горными породами и нижней кромкой ледника. Под данный критерий попали все шельфовые ледники и подледниковое озеро Восток. В итоге, расчёт был проведён для 118 453 точек континента.

Параметры моделирования: шаг по времени $\tau = 4$ месяца, $t_{max} = 1000$ лет, на фазу льда 5000 узлов расчётной сетки, на водные фазы по 500 узлов. В качестве начального распределения температуры в толще ледника выбрана функция $U_F(H)$ [4].

Моделирование было выполнено в пакете MATLAB. Расчет проводился в параллельном асинхронном режиме для всех узлов сетки Антарктиды.

Расчёты проводились на ресурсах РЦ ВЦ СПбГУ, использовался вычислительный узел с процессором Intel Xeon E5-2690 v4 с 14 ядрами (28 потоков) и 250 GB RAM. Расчёт занял 12 ч 55 мин. После оптимизации кода удалось сократить это время до 1 ч 42 мин.

Результаты моделирования представлены на Рис. Наблюдается скорость донного таяния в пределах от 0 до 15 мм/год (Рис., слева) с наибольшей интенсивностью в районе Западной Антарктиды и Антарктического полуострова. Наблюдается проседание ледника, связанное с ненулевой скоростью донного таяния и различными плотностями воды и льда. (Рис., справа)

Обсуждение результатов

В двух районах Антарктиды (Антарктический полуостров и Западная Антарктида) наблюдается интенсивное донное таяние (порядка 10 – 15 мм/год). В обоих случаях это объяснимо крайне высоким тепловым потоком порядка 120-150 мВт/м² при норме для остального континента около 50 мВт/м². На полуострове толщина льда не превышает 500 метров, что также могло повлиять на результат.

В реальности, как правило, вода не скапливается под ледником, а движется по системе каналов, которая в свою очередь также меняется со временем. Полноценный учёт перераспределения воды представляет из себя отдельную непростую задачу.

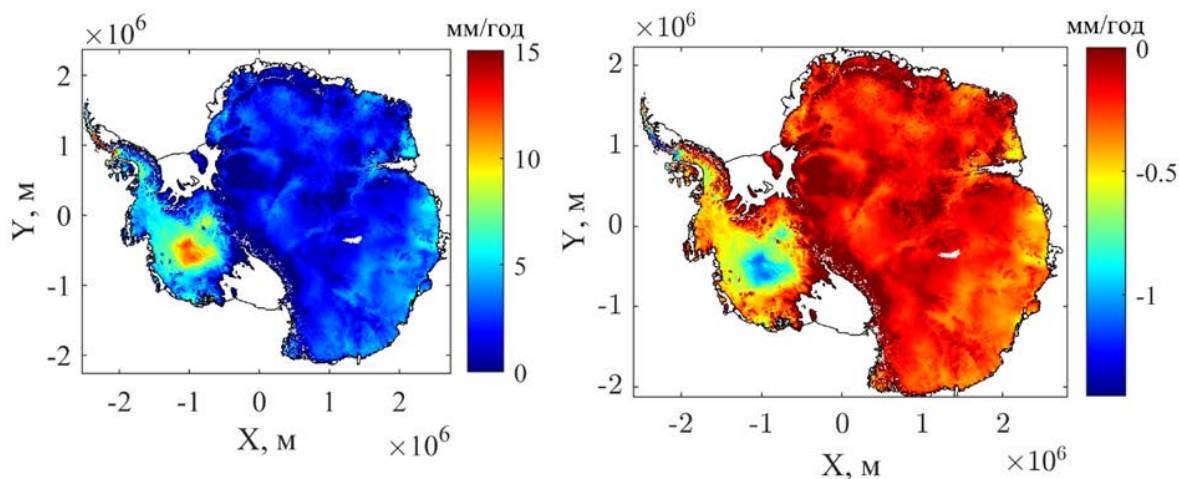


Рис. Слева: средняя скорость донного таяния. Справа: изменение высоты поверхности за вычетом вклада аккумуляции.

В пересчёте на массу талой воды в единицу времени для всей Антарктиды скорость таяния составила 29 Гт/год (усредненное значение для континента 2,5 мм/год). Для сравнения, в [10] приведены скорости донного таяния для различных моделей, где значения достигают 4000 Гт/год. Столь существенное расхождение в первую очередь связано с шельфовыми ледниками, которые не учитываются в данной работе. Например, в [11] приводятся данные по средней скорости таяния на шельфовом леднике Туэйтса, которая составляет 10 - 30 м/год. Такое большое число обусловлено откалыванием айсбергов от шельфовых ледников и обменом тепла с океаном.

Выводы

Получена средняя скорость таяния для ледяного щита Антарктиды в 29 Гт/год. Для сравнения, в работе [2] приводится значение 65 Гт/год, причем авторы не рассматривают обмен тепла с океаном и откалывание шельфов, но в их модель включена динамика льда как аморфного целого. В работе [10] сравниваются результаты приблизительно десятка моделей, где скорости донного таяния варьируются от 100 до 4000 Гт/год. В эти модели включены шельфовые ледники с учётом взаимодействия льда с океаном и откалыванием айсбергов, чем объясняется расхождение с настоящей работой на два порядка.

Список литературы

1. Blatter H., Greve R., Ayako A.-O. Present State and Prospects of Ice Sheet and Glacier Modelling // *Surveys in Geophysics*, 2011, vol. 32, p. 555-583
2. Pattyn F. Antarctic subglacial conditions inferred from a hybrid ice sheet/ice stream model // *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, p. 451-461
3. Fretwell P., Pritchard H.D., Vaughan D.G., et al. Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica // *Cryosphere*, 2013, vol. 7, p. 375–393.
4. Paterson W.S.B. *Fizika lednikov. The physics of glaciers*. Moscow: Mir, 1984: 472 p. [In Russian].
5. Stefan Condition // *Encyclopedia of Mathematics* URL: https://encyclopediaofmath.org/index.php?title=Stefan_condition (дата обращения: 01.05.2022).
6. Furzeland R.M. A Comparative Study of Numerical Methods for Moving Boundary Problems // *IMA Journal of Applied Mathematics*, 1980, vol. 26, p. 411–429
7. Атлас Океанов. Антарктика. / под ред. В. И. Куроедова. - СПб: Главное Управление навигации и океанографии Министерства обороны РФ, 2005.

8. Arthern R., Winebrenner D., Vaughan D. Antarctic Snow Accumulation Mapped Using Polarization of 4.3-cm Wavelength Microwave Emission // Journal of Geophysical Research, 2006, vol.111, p. D06108.

9. Martos Y.M., Catalán M., Jordan T.A., Golynsky A., Golynsky D., Eagles G., Vaughan D.G. Heat flux distribution of Antarctica unveiled // Geophys. Res. Lett., 2017, vol. 44, p. 11417– 11426.

Гидрологические наблюдения на четкообразных степных реках севера Волгоградской области

А.М. Тарбеева*, И.В. Крыленко, В.В. Сурков, Н.М. Михайлова

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
amtarbeeva@yandex.ru*

Аннотация. Четкообразные, четковидные или бочажинные реки, характеризующиеся чередованием озеровидных расширений (четок) и узких протоков, широко распространены в степной зоне Евразии. Существуют разные предположения о механизмах их образования, однако детальные исследования четковидных русел в степях не проводились. В статье приводятся первые результаты гидрологических исследований, проведенных в 2022-2023 гг. на реках Кардаил и Купава. Они включали промеры глубин, определение скоростного поля потока, расходов, электропроводности и мутности воды. Исследованные реки имеют максимальные глубины, достигающие 5-5.5 м, которые наблюдаются в расширениях русел – четках, шириной от 15 до 30 м. В сужениях, где ширина русла уменьшается до 1-5 м, глубины составляют 0.5-1 м. Во время половодья максимальные скорости потока достигаются в сужениях русла и составляют 0.7-1 м/с, тогда как в расширениях русла скорости потока падают ниже 0.3 м/с и, несмотря на образование водоворотных зон, их недостаточно для размыва берегов и дна. Содержание взвешенных веществ в воде на спаде половодья имеет линейную связь с расходом воды и изменяется от 10 до 35 мг/л при расходах от 1.7 до 6.1 м³/с. Удельная электропроводность речной воды изменяется от 830 до 4300 мкСм/см, что соответствует минерализации 530-2750 мг/л. Полученные данные помогут понять современные процессы в четковидных руслах и внесут вклад в понимание их генезиса.

Ключевые слова: малые реки, озеровидные расширения русла, скоростное поле потока, мутность, батиметрия, степь.

Hydrological observations on the beaded-shape steppe rivers in the north of the Volgograd region

A.M. Tarbeeva*, I.V. Krylenko, V.V. Surkov, N.M. Mikhailova

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
amtarbeeva@yandex.ru*

Abstract. Bead-shaped or chain-of-ponds rivers, characterized by the alternation of lake-like extensions (beads) and narrow runs, are widespread in the steppe of Eurasia. There are different assumptions about the mechanisms of their formation, however, detailed studies of beaded channels in the steppes have not been carried out. The article presents the first results of hydrological studies conducted in 2022-2023 on the Kardail and Kupava Rivers. They included bathymetry, determination of the velocity fields, water discharges, electrical conductivity and turbidity of the water. The studied rivers have maximum depths reaching 5-5.5 m, which are observed in the beads, with a channel width of 15 to 30 m. In the runs, where the channel width decreases to 1-5 m, the depths are 0.5-1 m. During spring high water, the maximum flow velocities are achieved in the runs and amount to 0.7-1 m/s, while in the channel expansions, the water flow velocities fall below 0.1-0.2 m/s and, despite the formation of

whirlpool zones, they are not enough to erode the channel bed and banks. The suspended sediment concentration in the water at the recession of the flood has a linear relationship with the water flow and varies from 10 to 35 mg/l at water discharges from 1.7 to 6.1 m³/s. The specific electrical conductivity of water varies from 830 to 4300 µS/cm, which corresponds to a mineralization of 530-2750 mg/l. The obtained data will help to understand modern processes in beaded channels and will contribute to the understanding of their genesis.

Keywords: small rivers, lake-like extensions, velocity fields, turbidity, bathymetry, steppe.

Введение

Четкообразные или бочажинные реки, характеризующиеся чередованием озеровидных расширений (четок или бочагов) и узких протоков, широко распространены в степной зоне Евразии. Они имеют важное сельскохозяйственное значение, так как обеспечивают места для водопоя скота даже в самые засушливые периоды года, однако механизмы их образования до сих пор не установлены.

Чаще всего формирование таких русел считают одной из стадий антропогенного заиления рек степной зоны, а расширения русел (четки или бочаги) – остатками бывших плёсов [1; 5]. Но описаны и другие механизмы их образования, такие как разгрузка подземных вод [2], суффозионно-карстовые процессы [4]. В том числе существует версия о реликтовой термокарстовой природе четковидных русел степи, где перигляциальные условия наблюдались в позднем неоплейстоцене [3].

Детальные исследования четковидных русел в степях не проводились, но они могли бы помочь понять генезис таких русел и обосновать мероприятия по их сохранению в меняющихся природных условиях. В 2022-2023 гг. были проведены первые комплексные исследования современных гидрологических процессов на ключевых участках четковидных русел малых рек Кардаила (приток р. Бузулук) и Купавы (приток р. Кардаил), расположенных в пределах Хопёрско-Бузулукской ледниково-эрозионной равнины на севере Волгоградской области.

Материалы и методы исследования

Ключевые участки русел расположены вблизи хут. Верхнекардаильского (Новониколаевский район Волгоградской области), где реки имеют хорошо выраженное четковидное строение. Река Кардаил на исследованном участке имеет площадь водосбора 572 км², Купава – ее правый приток – 367 км². Протяженность ключевого участка р. Кардаил составляет около 2.9 км, р. Купавы – 1.5 км.

В 2022-2023 гг. была проведена аэрофотосъемка ключевых участков рек с квадрокоптера, получены ортофотопланы и цифровые модели рельефа русла и прилегающей поймы, организованы временные гидрологические посты для измерения расходов и уровней воды, установлена автоматическая фотокамера для наблюдения за прохождением половодья на р. Кардаил.

При помощи эхолота *Lowrance LMS-525C DF* на ключевых участках были проведены промеры глубин, а в половодье измерено скоростное поле потока и расходы воды при помощи акустического доплеровского измерителя скоростей течения воды *ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)* модели «*Sontek River Surveyor M9*». В межень расходы воды измерялись при помощи поплавков или гидрологической вертушки. Поверхностные скорости течения определялись поплавками. Также определялась мутность воды оптическим турбидиметром *AMT27 (AMTAST)* и содержание взвешенных веществ фильтрованием через мембранные фильтры с порами 45 мкм. Удельная электропроводность и температура воды определялись при помощи кондуктометра *HM-200 (Hydro Master)*.

Результаты и их обсуждение

Исследуемые реки характеризуются хорошо выраженным половодьем с расходами воды до нескольких кубических метров в секунду и низкой летней и зимней меженью с расходами воды в первые литры в секунду (Табл.). Измеренная удельная электропроводность речной воды изменялась от 830 мкСм/см при разбавлении тальми водами до 4300 мкСм/см в зимнюю межень, что соответствует минерализации 530-2750 мг/л. Содержание взвешенных веществ в воде на спаде половодья имеет линейную связь с расходом воды и изменяется от 10 до 35 мг/л при расходах от 1.7 до 6.1 м³/с. Существенных изменений мутности воды по длине реки между сужениями и расширениями русла не наблюдается.

Табл. Физико-химические характеристики воды на реках Кардаил и Купава в даты проведения наблюдений: расходы воды (Q), удельная электропроводность (SPC), температура (T), содержание взвешенных веществ (SSC) и мутность.

Река	Дата	Q, м ³ /с	SPC, мкСм/см	T, °C	SSC, мг/л	Мутность, NTU
Кардаил	03.05.2022	-	2620	13.4	-	-
Кардаил	04.05.2022	0.577	2610	15.4	-	-
Кардаил	16.03.2023	6.1	837	0.9	34.9	51.87
Кардаил	18.03.2023	4.21	1020	1.5	23.6	31.11
Кардаил	23.02.2023	-	3570	0.3	-	-
Купава	03.05.2022	-	3850	14.2	-	-
Купава	17.03.2023	1.74	1030	12.9*	12.8	20.58
Купава	18.03.2023	1.66	1140	2.9	9.9	16.34
Купава	24.02.2023	0.0098	4280	0.3	-	-

- нет данных, * измерения производились в пробе воды в помещении

Реки на исследуемых участках имеют извилистое русло, осложненное глубокими озеровидными расширениями округлой, овальной, каплевидной или сложной формы (Рисунок). Излучины сформированы в бровках высокой поймы, высотой до 4-5 м, а низкая пойма высотой до 1,5-2 м, протягивается вдоль сужений русла. Ширина русла изменяется от 1.5-2 м в сужениях до 25-30 м в расширениях. Наибольшие глубины в расширениях русла достигают 5.5 м. Минимальные глубины наблюдаются в сужениях и составляют 0.5-1 м.

Во время половодья максимальные скорости потока достигаются в сужениях русла и составляют 0.7-1 м/с, тогда как в расширениях русла скорости потока падают ниже 0.3 м/с (Рис.) и, несмотря на образование водоворотных зон, их недостаточно для существенного размыва берегов и дна.

В межень русла зарастают водной растительностью, а на низкой пойме вырастают густые заросли тростника. В зимний период на реках формируется ледовый покров мощностью до 40-50 см. Поток половодья и льдом тростник ломается. Наблюдается локальный ледоход, приводящий к нагромождению льда на поворотах и в сужениях русла, и частичному разрушению берегов.

Выводы

Роль эрозионной деятельности потока в формировании расширений русла маловероятна из-за низких скоростей потока в расширениях русла. Современная динамика русла незначительна и связана, главным образом, с ледоходом. Малый сток взвешенных наносов во время половодья также свидетельствует об отсутствии существенных переформирований русла в настоящее время. Более детальная обработка полученных данных о глубинах русла совместно с данными морфометрического анализа

русел и геологического строения пойм помогут понять происхождение четковидных русел степи и причины длительной устойчивости их формы.

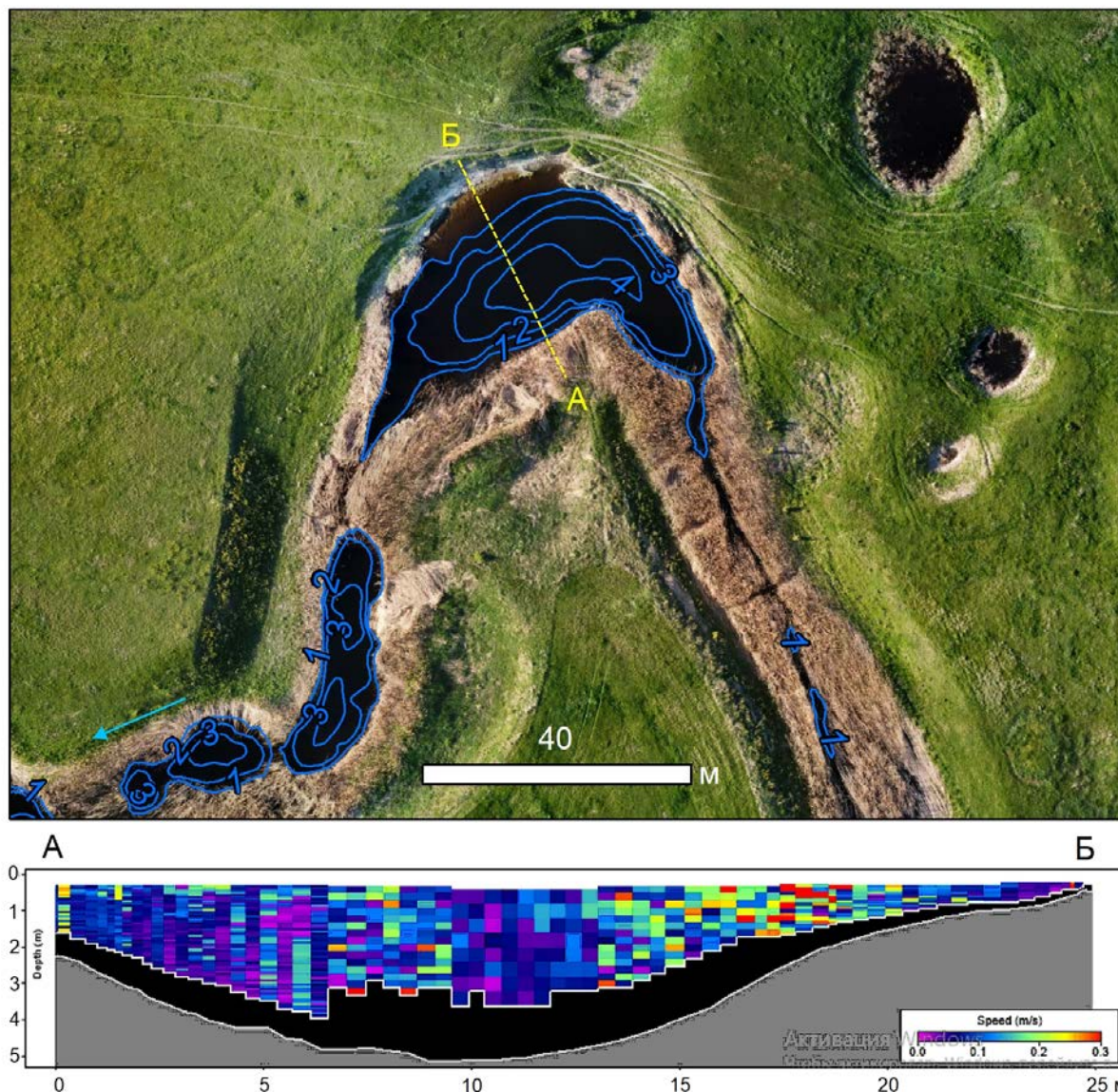


Рис. Четковидное русло р. Купавы: сверху - фрагмент ортофотоплана с изобатами через 1 м (синие линии) в начале мая 2022 г., желтый пунктир – положение поперечного профиля; внизу - поперечный профиль по линии АБ с распределением глубин и скоростного поля потока на спаде половодья 17.03.2023.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00008, <https://rscf.ru/project/23-27-00008/>

Acknowledgments

The work was supported by. Russian Science Foundation, project № 23-27-00008, <https://rscf.ru/en/project/23-27-00008/>.

Список литературы

1. Иванова Н.Н., Голосов В.Н., Панин А.В. Земледельческое освоение территории и отмирание рек Европейской части России. // Геоморфология. 1996. №4. С. 53-60.
2. Кичигин А.Н. Причины деградации русел малых рек Вологодской области // Геоморфология. 1992. №1. С. 56-62.

3. Рябуха А.Г., Поляков Д.Г. Особенности распространения, морфологическое строение и механизмы формирования четковидных русел малых рек степной зоны Оренбургской области // Успехи современного естествознания. 2020. № 4. С. 146-150.

4. Тарбеева А.М., Крыленко И.В., Сурков В.В. Озеровидные расширения русел рек степной зоны и возможные причины их формирования (бассейн р. Урал в районе г. Орска) // Геоморфология. 2016. № 1. С. 73-81.

5. Чернов А.В. Современное развитие малых рек центральных районов Европейской части СССР // Малые реки Центра Русской равнины, их использование и охрана. М.: МО ГО СССР. 1988. С. 17–25.

Расчет многолетних характеристик речного притока к эстуариям рек Большая-Быстрая и Авьеваям для разработки стратегии защиты инфраструктуры поселков Октябрьский и Корф на Камчатке

Терский П.Н.^{1,2}, Жбаков К.К.¹, Землянов И.В.¹, Горелиц О.В.¹, Мигунов Д.А.^{1,3}, Панасенкова И.И.¹, Фатхи М.О.¹, Фомин В.В.¹

¹ Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва, Россия

² Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Россия

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия
pavel_tersky@mail.ru

Аннотация. На побережье Камчатки комплекс речных и морских факторов приводят к разрушению инфраструктуры, в особенности на территории важных для хозяйства региона поселков Октябрьский и Корф. Проблема анализа и прогноза опасных морских и гидрологических процессов состоит в слабой гидрологической изученности территории, пропусках в данных наблюдений, отсутствии репрезентативных метеонаблюдений, сильной расчлененности рельефа и неоднородности ландшафтов водосборов, непрерывной и опасной для поселков деформации кос в эстуариях рек. Работа выполнена на основе комбинации методических подходов, включающих в себя: гидрологические расчеты (нормативный подход СНиП), гидрологическое моделирование (модель HBV), географическое обобщение, гидродинамическое моделирование с использованием МОЦАО. Результат работы – вычисленные ряды речного стока и уровней воды в эстуарии р. Большой и их статистические характеристики, использованные для моделирования частоты перелива воды через Октябрьскую и Корфскую косы.

Ключевые слова: Водный режим, река, гидрологическое моделирование, эстуарий, морская коса, Корф, Октябрьский, Камчатка

Inflow calculations for the estuaries of Bolshaya-Bystraya and Aveyevayam rivers with the aim of safeguarding the infrastructure of Oktyabrsky and Korf settlements (Kamchatka, Russia)

Terskii P^{1,2*}, Zhbakov K¹, Zemlyanov I¹, Gorelits O¹, Migunov D³, Panasenkov I¹, Fatkhi M¹, Fomin V¹

¹ Zubov State Oceanographic Institute, Moscow, Russia

² Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

pavel_tersky@mail.ru

Abstract. The stability of spits in river estuaries is influenced by a variety of river and marine processes, as well as industrial activities, on the coastal areas of Kamchatka in Russia. There has been a risk of breaking through these spits and overflowing from the river and the sea. Infrastructure is destroyed as a result of coastal erosion and abrasion, particularly in the area around the communities of Oktyabrsky and Korf settlements. The problem of analyzing

and forecasting dangerous marine and hydrological processes consists of insufficient hydrological knowledge of the area, gaps in the observational data on river runoff, low representativeness of meteorological observations, the dissected relief and heterogeneity of landscapes in river catchments, and the continuous and dangerous deformation of the spits in river estuaries. Hydrological calculations (based on Russian regulatory documents), hydrological modeling (using the HBV model), geographic approach, and hydrodynamic modeling using the Ocean and Atmosphere circulation models were some of the methodological approaches used in this work. The outputs of the research are calculated time series of river discharge and water levels in the river's estuaries. These results were used to simulate the frequency of water overflow over the Oktyabrsky and Korf Spits.

Keywords: Water regime, river, hydrological modeling, estuary, sea spit, Korf, Oktyabrsky, Kamchatka

Введение

Морские косы в эстуариях рек на побережье Камчатки подвержены влиянию комплекса речных и морских факторов, а также хозяйственной деятельности, что оказывает влияние на их устойчивость. Такие факторы, как подмыв берегов и абразия приводят к поступательному разрушению инфраструктуры, на территории рассматриваемых населенных пунктов – Октябрьский и Корф, которые являются чрезвычайно значимыми для экономического развития региона.

Ежегодные, преимущественно осенние, переливы с одной стороны являются одним из основных рельефообразующих процессов на Октябрьской косе, а с другой стороны – постоянной угрозой для единственной автодороги, связывающей пос. Октябрьский с районным центром. Полностью устранить негативное влияние переливов на дорогу невозможно, поскольку небольшая ширина косы не позволяет перенести дорогу на безопасное расстояние от моря. [1].

Необходимость проведения регулярных ремонтно-восстановительных работ и значительные текущие затраты на поддержание дороги в рабочем состоянии явились главным мотивом проведения серии научно-прикладных и проектно-изыскательских работ, проводившихся в исследуемом районе и имевших своей целью подготовить информационную базу для разработки системы мероприятий по защите сооружений от воздействия морских и речных вод.

Затопления и переливы через Корфскую косу в основном происходят в первую очередь вследствие нагонных ветров, сопровождаемыми ледовыми явлениями. Учитывая долгосрочное повышение уровня мирового океана, целесообразность сохранения инфраструктуры, в первую очередь аэропорта, поселка Корф в будущем ставится под вопрос.

Цель работы – расчет многолетних характеристик речного притока к эстуариям рек Большая-Быстрая и Авъеваям, оценка частоты переливов воды через Октябрьскую и Корфскую косы.

Характеристика объектов

Район 1: Октябрьская коса

Район 1 находится на западном побережье полуострова Камчатка и включает северный участок Октябрьской косы, примыкающей к акватории Охотского моря и эстуарию реки Большой, отделяющей косу от материка (Рис.1а).

Эстуарий реки Большой включает Микояновский лиман и озеро Большое, связанные с Охотским морем через эстуарный водоток. Глубина водоемов составляет 1-2 метра с максимальной глубиной 5-7 метров. Устье эстуарного водотока преграждается баром с глубиной над ним в отлив меньше 0.5 м. Октябрьская коса непрерывно

удлинняется в южном направлении с интенсивностью около 150 м/год, что обусловлено стоково-отливным потоком, морскими приливами и волнением.

Река Большая – крупнейшая в регионе, берущая начало на склонах Срединного хребта. Длина реки составляет 275 км, площадь водосборного бассейна – 10 800 км². Она относится к группе рек с весенне-летним паводком и паводками в теплое время года. Средний годовой расход воды около 320 м³/с.

Гидрометеорологическое обслуживание территории осуществляется Камчатским УГМС, расположенным в Петропавловске-Камчатском. Наблюдения за уровнем воды в бассейне реки Большой проводятся с 1936 года, хотя большинство гидрологических постов имеют период наблюдений менее 15 лет.

Метеостанция М2 Большерецк расположена близко к побережью и недостаточно репрезентативна для территории водосбора реки Большой. Наблюдается значительный недоучет сумм осадков на береговых и равнинных станциях, что влияет на характеристики водного баланса бассейнов, частично расположенных в горных районах Камчатки [1; 2; 3].

Район 2: Корфская коса

Район 2 находится на северо-восточном побережье полуострова Камчатка и включает в себя северо-восточный участок косы Корф и акваторию залива Корфа вплоть до изобаты 20 м, а также эстуарий реки Авъеваям, отделяющий косу от материка (Рис.1б). Коса Корф, узкая и длинная песчаная коса-пересыпь, протянулась на северо-восток на протяжении 18 км с максимальной шириной 650-800 м.

Район исследований достаточно хорошо освещен данными наблюдений за метеорологическими характеристиками. В поселке расположена метеостанция Корф/Тилички. Однако, отличается слабой гидрологической изученностью, что в целом характерно для территории Камчатки.

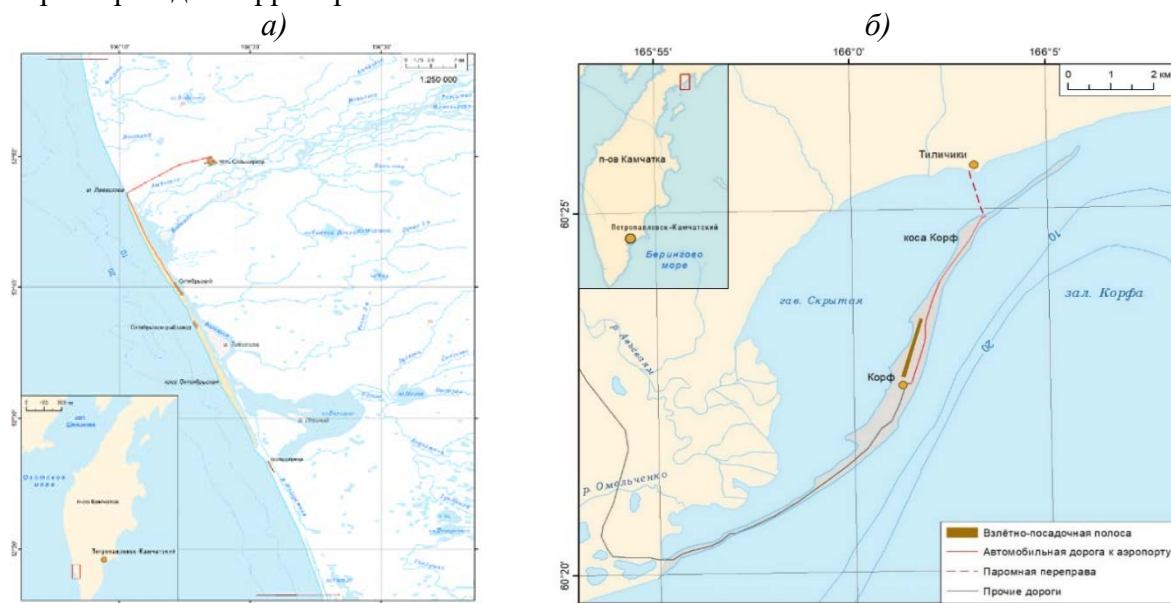


Рис. 1 Схемы расположения Октябрьской (а) и Корфской (б) кос.

Материалы и методы

Район 1. Водосбор эстуария р. Большой разделен на бассейны по данным о рельефе SRTM. Корреляционный анализ среднесуточных расходов воды позволил выделить следующие районы: 1 - реки заболоченной равнины (Западно-Камчатская низменность); 2 - водосборы рек, берущих начало в горах и выходящих на равнину; 3 - высокогорные расчлененные водосборы.

Приток к эстуарию р. Большой формируется реками Большая, Амчигача, Первая речка, Вторая речка и Удочка (Рис. 2). Используя четыре гидрологических поста с продолжительными рядами наблюдений (р. Быстрая, р. Плотникова, р. Начилова и р. Амчигача), произведен расчет притока за период 1987-2022 гг.

Расчет проводился в два этапа. Первый этап – восстановление пропусков в рядах гидрологических и метеорологических наблюдений, вычисление стока воды р. Большой методами линейной регрессии. Вычислены среднемесячные расходы воды на посту Малки по уравнению связи с постом Дальний. Далее расходы воды р. Большой (свх. Большерецкий) восстановлены по уравнению связи измеренных расходов с уровнями воды. Расходы воды р. Большой на участке от свх. Большерецкий до устья (отдельно от р. Амчигача) без учета р. Плотникова восстановлены с использованием модели HBV с параметрами бассейна р. Амчигачи (18 км от устья). HBV – концептуальная емкостная гидрологическая модель с сосредоточенными параметрами [5]. Качество модели проверялось с использованием критерия Нэша-Сатклиффа, критерия Клинг-Гупты, объемной ошибки годового водного баланса, адекватностью соотношения подземного и поверхностного стока. Результаты считаются хорошими и удовлетворительными (Табл. 1). Восстановление стока р. Плотникова в устье производилось, опираясь на данные эпизодических наблюдений на р. Плотникова (дрп. Апача), выполненных Камчатским УГМС по уравнению связи расходов воды р. Плотникова (пос. Дальний) и р. Плотникова (Апача).

Второй этап - вычисление расходов воды рек Западно-Камчатской низменности с использованием модели HBV. Входные данные: ряд среднесуточной температуры воздуха, суточных сумм осадков (ERA-5-Land). Ежедневные значения испаряемости рассчитаны методом Oudin [4]. Сток рек Первая речка, Вторая речка, Начилова (от с. Карымай до устья), Амчигача (устье) вычислен по модели аналога - р. Амчигача (18 км от устья). Для р. Удочка и р. Большая (ниже свх. Большерецкий) за аналог принята модель р. Начилова (Карымай).

Район 2. Расчет расходов воды р. Авъеваям, ручья Широкий и ручьев пос. Корф, а также р. Талалаевки (Рис.2), за период 1987-2022 гг. производилось на основе моделирования (модель HBV) стока реки-аналога – р. Тылговаям (пос. Хаилино, площадь водосбора 2180 км²) за период имеющихся данных наблюдений 1967-1989 гг. и р. Большая Медвежка (пос. Медвежка, площадь водосбора 36.6 км²) за период 1981-1988 гг. и 2001-2004 гг. Исходные метеоданные были получены аналогично Району 1.

Табл. 1 Оценка качества моделирования (HBV).

Критерий		Район 1		Район 2	
		р.Амчигача	р.Начилова	р.Медвежка	р.Тылговаям
NSE	Нэша-Сатклиффа	0.73	0.62	0.65	0.72
KGE	Клинг-Гупты	0.79	0.75	0.82	0.82
Vol err	Объемная ошибка	0.98	1.00	0.99	0.98
Mean diff mm	Абс. ошибка годового слоя стока, мм/год	-11.4	0.00	-1.54	7.15
Качество моделирования (по наилучшему значению критерия)		Хор.	Удовл.	Удовл.	Хор.

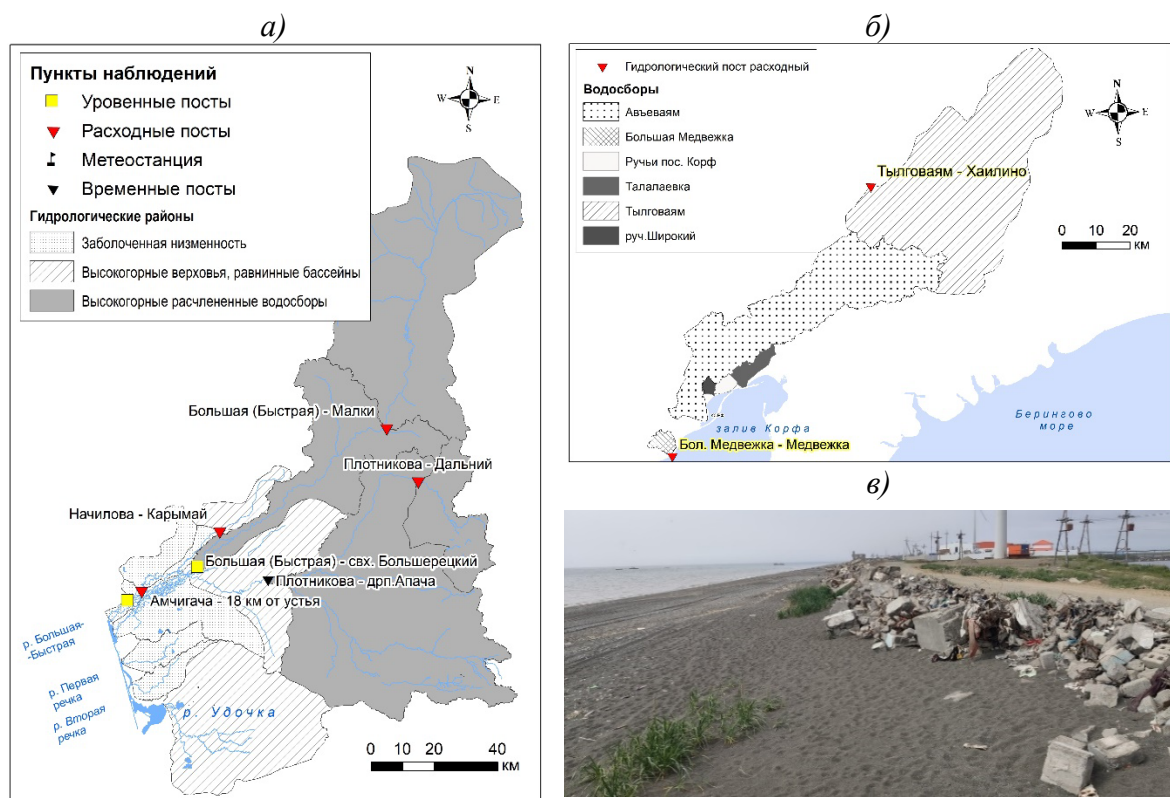


Рис. 2 Водосборы притоков эстуариев р. Большой (а) и гавани Скрытой (б), фото берегоукрепления на Октябрьской косе (в).

Результаты и их обсуждение

Район 1. В результате выполненной работы вычислены многолетние характеристики водного режима и баланса эстуария р. Большой за период 1987-2021 гг. Почти 90% стока приносит р. Большая без учета р. Амчигачи и 7% - р. Удочка (Табл. 2). Остальной приток приходится на р. Первая речка, Вторая речка и Амчигача. При этом необходимо рассматривать совокупный приток р. Большой и р. Амчигачи, поскольку в нижнем течении у них общая русловая сеть, и в разные сезоны соотношение стока этих рек может меняться. Годовой объем притока к эстуарию меняется от 10 до 17 км³, в среднем составляет 12.6 км³/год. Среднемесячные расходы суммарного притока к эстуарию р. Большой изменяются от 100-120 м³/с в зимние месяцы до 1100-1300 м³/с в летние.

Район 2. Водный режим гавани Скрытая определяется объемом и внутригодовым распределением стока р. Авьеваам, имеющей долю более 98% в притоке к бухте (95%, если считать р. Талалаевку притоком гавани Скрытая). Остальной приток приходится на руч. Широкий и другие ручьи пос. Корф (Табл. 3). Наиболее значительная часть стока проходит в июне и составляет почти половину годового стока, а в холодный период сток практически отсутствует. Река Бол. Медвежка показывает весьма значительный недоучет наблюдаемого стока, особенно в зимний период, либо ее подземный водосбор значительно отличается от поверхностного, и часть осадков, проникая в подземные воды, покидает речной бассейн и до замыкающего створа не доходит. Поэтому, к результатам расчета стока и водного баланса ручьев нужно относиться с большой осторожностью.

Заключение

Вычислены многолетние характеристики водного режима и баланса эстуария р. Большой и гавани Скрытой за период 1987-2021 гг. В Районе 2 (Корф), р Бол.

Медвежка (на примере которой можно составить представление о малых реках и ручьях района), показывает весьма значительный недоучет наблюдаемого стока, особенно в зимний период, либо ее подземный водосбор значительно отличается от поверхностного, и часть осадков, проникая в подземные воды, покидает речной бассейн и до замыкающего створа не доходит.

Табл. 2 Среднегодовое количество притока воды к эстуарию р. Большой за период 1987-2021 г.

Река	Большая	Амчигача	Первая	Вторая	Удочка
Среднегодовое количество расхода воды, м ³ /с	355	7.1	4.6	3.9	29.5
Годовой объем стока, км ³	11.2	0.22	0.14	0.12	0.93
Доля от притока к эстуарию, %	88.7	1.8	1.1	1.0	7.4

Табл. 3 Среднегодовое количество притока воды к гавани Скрытая за период 1987-2021 г. (отдельно приведена р. Талалаевка).

Река	Авьеваям	Ручей Широкий	Ручьи пос. Корф	Суммарный приток	Талалаевка
Среднегодовое количество расхода воды, м ³ /с	23.6	0.18	0.30	24.0	0.74
Год. объем стока, млн.м ³	743	5.82	9.32	758	23.3
Доля от общего притока к бухте Скрытая, %	98.0	0.8	1.2	100	-

Несмотря на удовлетворительную оценку качества моделирования, не рекомендуется использовать результаты расчета в качестве реанализа ежедневных расходов воды. Результаты моделирования можно считать наиболее приемлемыми для восстановления среднемесячных расходов и воднобалансовых расчетов.

Результаты сценарных расчетов показывают, что в течение года возможно от 1 до 15 дней, когда может наблюдаться перелив через Корфскую косу и от 3 до 8 дней через Октябрьскую. Для наиболее неблагоприятного года с высокой частотой возникновения штормовых ситуаций, число дней с переливом может увеличиваться до 2 – 25 на отдельных участках Корфской косы и до 6 – 13 на Октябрьской. Повышение среднего уровня моря приведет к увеличению частоты возникновения переливов.

Список литературы

1. Горин С. Л. Гидролого-морфологические процессы в эстуариях Камчатки // Дисс... канд. геогр. наук. М.: ВНИРО. – 2009.
2. Терский П.Н. Особенности формирования стока р. Большая (Западная Камчатка). Курсовая работа, Москва, МГУ, 2005.
3. Терский П. Н., Жбаков К. К., Михеева А. И. Связь морфометрических характеристик водосборов и ландшафтных условий в бассейне р. Авачи (Камчатка) с характеристиками среднегодового и максимального стока рек // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и Северо-Западной части Тихого океана. — 2017. — № 46. — С. 51–65.
4. Oudin L. et al. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling // Journal of hydrology. – 2005. – Т. 303. – №. 1-4. – С. 290-306.
5. Seibert J. HBV light version 2, User's manual // Stockholm University-available at http://people.su.se/~jseib/HBV/HBV_manual_2005.pdf. – 2005.

Эмиссия метана из Зейского водохранилища в маловодных и многоводных условиях по данным натурных исследований 2021-2022 гг.

П.Н. Терский^{1,2*}, С.Л. Горин^{1,3}, С.А. Агафонова^{1,4}, И.А. Репина^{1,5}

¹Институт физики атмосферы им А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Россия

³Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Москва, Россия

⁴Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

⁵Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия
pavel_tersky@mail.ru

Аннотация. На основе полевых измерений концентрации метана в воде и удельных потоков метана с поверхности воды впервые оценена эмиссия метана в теплое время года из Зейского водохранилища. Полевые данные были получены в ходе экспедиций, проведенных в сентябре 2021 и июле 2022 года, и включали в себя информацию о термической, кислородной и гидрохимической структуре водохранилища. Установлено, что основными источниками органического вещества и метана являются прибрежные зоны водохранилища, получающие органический сток с побережья и заболоченные притоки. Выброс метана во время сработки воды через сооружения гидроузла зависит от того, работают ли поверхностные водосбросы. Эмиссия метана с поверхности Зейского водохранилища значительно выше в летние месяцы, когда прогрев воды на мелководье достигает максимума, чем осенью, когда запас теплоты максимален. Коэффициенты эмиссии метана из Зейского водохранилища (8.6 – 17.2 кг СН₄/га) соответствуют коэффициентам, представленным в Дополнении к Руководящим принципам МГЭИК 2019 года для бореальных водоемов.

Ключевые слова: эмиссия парниковых газов, метан, гидрологическая структура водоема, водохранилище, Зейское, полевые исследования.

Methane emissions from the Zeya reservoir (Russia) in low-water and high-water conditions according to field surveys in 2021-2022

P. Terskii^{1,2*}, S. Gorin^{1,3}, S. Agafonova^{1,4}, I. Repina^{1,5}

¹ Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

² Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119333 Russia

³ Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Moscow, 105187 Russia

⁴ Faculty of Geography, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

⁵ Russia Research Computing Centre, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia
pavel_tersky@mail.ru

Abstract. For the first time estimates of methane emissions in the warm season from the Zeya reservoir were obtained. In-situ measurements were gathered throughout the expeditionary surveys that were carried out in September 2021 and July 2022. Based on hydrological and chemical measurements, it was possible to develop the aquatory zoning. A digital elevation model was created, enabling the calculation of the total methane emissions.

The main sources of organic matter and methane are marshy tributaries and shallow aquatories, where organic matter comes from the banks. The release of methane during the water drawdown through the hydroelectric power plant depends on whether the surface spillways work. The total methane emissions from the reservoir's surface are substantially higher in the summer, when shallow waters are heated. The Zeya Reservoir's methane emission coefficients (8.6–17.2 kg CH₄/ha) are consistent with those from boreal reservoirs that are listed in the IPCC Guidelines.

Keywords: Greenhouse gas emission, Methane, Hydrological structure, Reservoir, Zeya, Field survey.

Введение

Эмиссия парниковых газов (ПГ), и прежде всего метана (CH₄) с поверхности водохранилищ происходит на протяжении всего срока их жизни. Помимо своего фундаментального значения, исследование данного процесса имеет и практический аспект, важный для России - в настоящее время отсутствует определенность в отношении углеродной нейтральности водохранилищ и ГЭС [1]. Удельные потоки ПГ из водохранилищ часто имеют суточную и синоптическую изменчивость - в масштабе времени от минут до часов и даже в течение отдельных дневных и ночных циклов. Также велика изменчивость этих потоков на сезонном масштабе - в зависимости от активности продукционно-деструкционных процессов, речного притока, колебаний уровня воохранилища, величины и динамики слоя перемешивания.

Зейское водохранилище - один из 9 водоемов, объектов трехлетнего исследования по теме «Измерение выбросов парниковых газов и оценка поглощающей способности гидроэнергетических объектов», которое выполняется ИФА им. А.М. Обухова РАН по заказу ПАО «РусГидро» с 2021 г. Оно имеет характерные черты водохранилищ умеренного пояса. Но при этом ему свойственны и уникальные черты, благодаря сочетанию морфологических особенностей (обширная часть с глубинами до 50 м и каньонообразная часть с глубинами до 100 м), значительной площади и объема, высокой проточности и выраженной сезонности в гидрологическом режиме. Заполнение чаши Зейского вдхр. началось в 1974 г., а до нормального подпорного уровня (НПУ) водоем наполнился в 1985 г. [2]. Водный режим Зейского водохранилища определяется, главным образом, р. Зея и ее крупнейшими притоками. По характеру внутригодового распределения стока эти реки относятся к Дальневосточному типу водного режима, которому присуща высокая водность в теплую часть года: весенне-летнее половодье, переходящее в высокие паводки во второй половине лета и в начале осени.

Цель работы - дать количественную характеристику гидрологических условий, как основы формирования эмиссии CH₄, в водной толще Зейского водохранилища в теплый период, показать их связь с удельными потоками CH₄ в относительно многоводных и маловодных условиях, дать оценку полной эмиссии CH₄ из водоема.

Материалы и методы исследования

Полевые работы на Зейском водохранилище были выполнены 17-23 сентября 2021 г. (19 станций) и 25-31 июля 2022 г. (22 станции) (Рис. 1). Гидрологические условия работ в теплый период 2021 и 2022 гг. значительно различались. Теплый период 2021 г. был экстремально многоводным, приток к водохранилищу значительно превышал многолетнюю норму, сработка происходила через турбины и поверхностные водосбросы. В 2022 г период полевых работ 26-31 июля 2022 г. соответствовал стадии начала летнего наполнения водохранилища (начало паводочного периода), уровень воды был ниже многолетней нормы и на 3.4 м ниже НПУ, сработка происходила только через турбины.

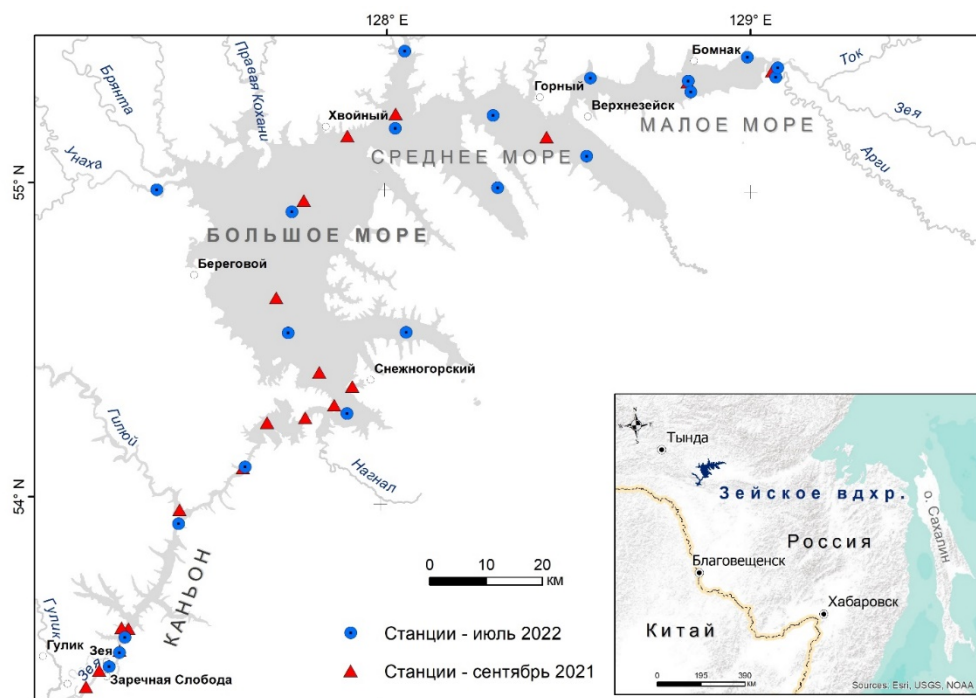


Рис. 1 Карта-схема Зейского водохранилища с местоположением станций полевых работ в 2021 и 2022 гг.

Натурные исследования имеют экспедиционный формат, поэтому в данной работе не учитывается изменчивость удельных потоков CH_4 в масштабах времени меньше сезона (например, суточная и синоптическая). Все работы проводились с борта катера и включали в себя измерения гидрологических характеристик воды (температуры, электропроводности и содержания растворенного кислорода), отбор проб воды и воздуха для оценки концентраций CH_4 и величин его удельного потока на границе вода/атмосфера, а также отбор проб воды на химический состав.

Гидрологические характеристики измерялись с помощью зонда YSI 6600, дискретность зондирования по глубине составила от 1 до 5 м. Пробы воды на CH_4 и химический состав отбирались батометром системы Нискина. Пробы на концентрацию CH_4 отбирались в двух повторностях во флаконы объемом 20 мл. Измерения удельных потоков CH_4 выполнены методом плавучих камер (2 камеры из пластика, объемом 7-10 л). Характеристики камер соответствуют методике ЮНЕСКО по измерению эмиссии CH_4 из водных объектов [5]. Время экспонирования (1 час) разбивалось на две серии по 30-40 минут. Метеонаблюдения выполнялись с помощью портативной метеостанции Kestrel 5000.

Определение концентрации CH_4 в пробах воздуха и водной вытяжки выполнялись в лаборатории ИФА РАН методом «headspace» на газовом хроматографе. Выброс CH_4 в результате дегазации воды при сбросах воды через Зейский гидроузел оценивался с учетом расхода воды через плотину и разницы концентраций CH_4 в воде верхнего и нижнего бьефа. Методика вычисления эмиссии CH_4 с поверхности Зейского водохранилища опирается на результаты натурных измерений удельных потоков CH_4 с учетом площадей, занятых мелководьями. Для этого в рамках настоящей работы построена цифровая модель рельефа (ЦМР) ложа Зейского водохранилища [3]. Вегетационный период в районе Зейского заповедника составляет 130-140 дней, для расчета коэффициента эмиссии CH_4 его продолжительность принята 135 суток.

Результаты натуральных наблюдений

В 2021 г. в период экспедиции (17-23 сентября) температурная стратификация водохранилища и слой температурного скачка (СТС) были хорошо выражены, он залегал на глубинах ниже 20-30 м и, в целом, заглублялся по мере приближения к плотине. Средневзвешенная температура воды по профилю +9.4°C. Водохранилище было насыщено кислородом по всей глубине, зон аноksии не выявлено. Средневзвешенная величина насыщения - 74%. Наиболее минерализованная вода наблюдалась в р. Зее (36.1 мг/дм³), ниже Бомнака минерализация менялась в пределах 26-29 мг/дм³. Концентрации СН₄ наблюдались от 2-3 мкл/л (в нижнем бьефе ГЭС) до 4-5 мкл/л на большей части акватории. Концентрация СН₄ в воде в целом растёт от дна к поверхности. Повышенные концентрации СН₄ наблюдаются в зоне выклинивания подпора (при впадении р. Арги до 50 мкл/л). Самые низкие концентрации СН₄ в воде наблюдаются на открытых пространствах Большого моря (до 1-2 мкл/л) (Рис. 2). Величины удельного потока СН₄ были в пределах 0.5-5.2 мгСН₄/м²/сут, до 36-56 мгСН₄/м²/сут (в устье р. Арги) и до 30-245 мгСН₄/м²/сут в мелководном заливе.

В 2022 г. в период экспедиции (25-31 июля) температурная стратификация водохранилища была также хорошо выражена, СТС был на глубинах ниже 15-20 м и занимал относительно постоянное положение. Средневзвешенная температура воды по профилю составляла 8.5°C. Наиболее высокая температура на поверхности достигала 26°C высокая температура была в р. Зее и р. Арги во время дождевого паводка – до 23°C. Водохранилище было насыщено кислородом по всей глубине, зон аноksии не выявлено. Средневзвешенная по продольному профилю величина насыщения 71%. Концентрации СН₄ в воде до 5 мкл/л. Максимум СН₄ в воде р. Арги 12.5 мкл/л. Низкие значения СН₄ – в Каньоне, в центре широкой акватории и у плотины (0.1-1.0 мкл/л) (Рис. 2). В заливах концентрация СН₄ в воде выше, чем на глубоких станциях. В сентябре 2021 г в верховьях концентрации СН₄ в воде на порядок больше, чем в 2022 г (в котором речной приток был значительно ниже). Удельный поток СН₄ был в пределах 1.2-56 мгСН₄/м²/сут. По сравнению с осенью 2021 г., величины удельного потока метана в Большом море систематически не отличались.

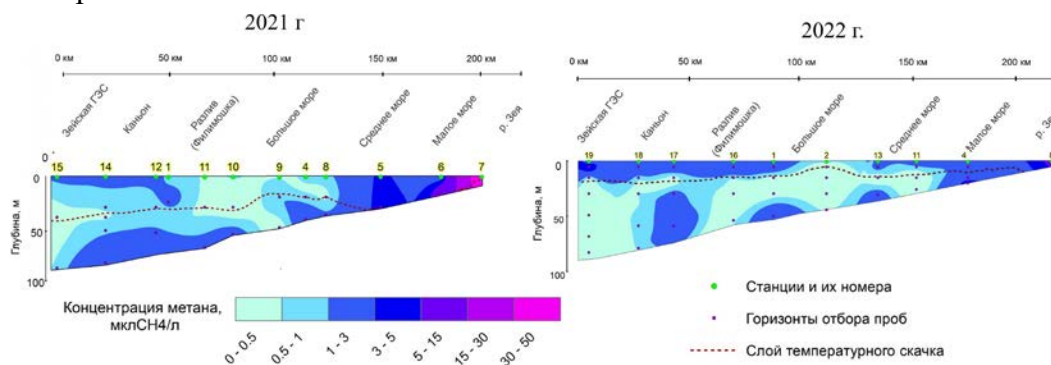


Рис. 2 Содержание СН₄ в воде по продольному профилю Зейского водохранилища по данным полевых работ 16-23 сентября 2021 г. и 27-31 июля 2022 г.

Выводы

Содержание СН₄ в воде и удельные потоки СН₄ уменьшаются от берегов и заливов к центру водоема. Мелководные заливы, заполненные регулярно поступающим древесным материалом с берегов (такой вывод сделан по наличию органической взвеси и древесных остатков в таких заливах), распространены на отдельных участках береговой линии, и, по-видимому, не являются площадным источником СН₄, а скорее точечным в масштабе всего водоема. По-видимому, основными источниками

органического вещества и метана являются заболоченные притоки и прибрежные участки акватории, куда поступает сток органики с берегов.

Основной автохтонный источник CH_4 в Зейском водохранилище – донные отложения мелководной части акватории, поскольку прослеживается закономерность уменьшения удельных потоков метана от берегов к центру водоема. Главный аллохтонный источник CH_4 – это р. Арги – крупный болотный приток водохранилища в его верховьях.

Оценки удельных потоков CH_4 ($0.1\text{--}56 \text{ мгCH}_4/\text{м}^2\text{сут}$), полученные по результатам натуральных измерений, в целом согласуются с мировыми данными. В работе [4] для водохранилищ бореальной зоны приведен диапазон эмиссии $1\text{--}100 \text{ мгCH}_4/\text{м}^2\text{сут}$. В Зейском водохранилище присутствуют зоны как с очень небольшим удельным потоком CH_4 , так и отдельные «горячие точки» с удельным потоком, превышающим верхнюю границу этой оценки.

Эмиссия CH_4 осенью 2021 г., несмотря на многоводные условия, была заметно ниже, чем летом 2022 г. Коэффициент эмиссии CH_4 за вегетационный период составил $8.6\text{--}11.1 \text{ кг CH}_4 \text{ га/год}$ и $13.2\text{--}17.2 \text{ кг CH}_4 \text{ га/год}$ в 2021 и 2022 гг. соответственно. Наименьший вклад в эмиссию CH_4 дает глубоководная узкая приплотинная часть Каньона, а наибольший – обширное Большое море, особенно в условиях небольшого притока в маловодный теплый период 2022 г. Коэффициенты эмиссии CH_4 из Зейского водохранилища в 2021 и 2022 гг. ($8.6\text{--}17.2 \text{ кг CH}_4/\text{га}$) соответствуют представленным в дополнениях к руководящим принципам МГЭИК 2019 года с поверхности водохранилищ [6].

Благодарности

Авторы выражают благодарность В.П. Шестеркину (ИВЭП РАН, г. Хабаровск) за участие в полевых работах и помощь в гидрохимических исследованиях; Т.Е. Самсонову, М.В. Зимину и Ф.А. Щекотихину (МГУ имени М.В. Ломоносова, Географический факультет) за помощь в разработке ЦМР.

Работа выполнена при финансовой поддержке и по заказу ПАО «РусГидро» (Договор № 1010-416-2021 от 27 апреля 2021 года) в рамках НИОКР, выполняемой в ИФА им. А.М. Обухова РАН.

Acknowledgments

The authors thank V.P. Shesterkin (IVEP RAS, Khabarovsk) for participation in field work and assistance in chemical studies; T.E. Samsonov, M.V. Zimin and F.A. Shchekotikhin (Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography) for assistance in developing the DEM.

The work was supported by RusHydro Company (Contract No. 1010-416-2021, April 27, 2021) as the R&D work at the A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences.

Список литературы

1. Репина И.А., Терский П.Н., Горин С.Л., Агафонова С.А., Ахмерова Н.Д., Василенко А.Н., Гречушникова М.Г., Григорьев В.Ю., Казанцев В.С., Лисина А.А., Ломов В.А., Мишин Д.В., Сазонов А.А., Степаненко В.М., Соколов Д.И., Тимошенко А.А., Фролова Н.Л., Шестеркин В.П. Натурные измерения эмиссии метана на крупнейших водохранилищах России в 2021 г. Начало масштабных исследований // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 6. С. 713–718.

2. Схема комплексного использования и охраны водных объектов по бассейну реки Амур (российская часть). Проект. Книга 1. Владивосток. ДальНИИВХ. 2010. 175 с.

3. Терский П.Н., Горин С.Л., Репина И.А., Агафонова С.А., Зимин М.В., Шестеркин В.П., Щекотихин Ф.А. Эмиссия метана и гидрологическая структура Зейского водохранилища в теплый период года по данным натуральных измерений в

сентябре 2021 и июле 2022 гг. // Известия РАН (Физика атмосферы и океана). 2023 – в печати.

4. Varis O. et al. Greenhouse Gas Emissions from Reservoirs // Impacts of Large Dams: A Global Assessment Water Resources Development and Management. / под ред. С. Tortajada, D. Altinbilek, A. K. Biswas. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. P. 69–94.

5. World Bank Group. (2017). Greenhouse gases from reservoirs caused by biogeochemical processes: World Bank <http://hdl.handle.net/10986/29151>

6. Zhongming Z. и др. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories // 2019 <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>

Оценка уязвимости карстовых подземных вод к загрязнению: сравнительный анализ результатов применения различных методик на примере массива Ай-Петри (Горный Крым)

С.В. Токарев

*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь
tokcrimea@list.ru*

Аннотация. Оценка уязвимости подземных вод к загрязнению – эффективный инструмент для научного обоснования зон санитарной охраны источников питьевого водоснабжения. В работе представлены результаты апробации на примере горного массива Ай-Петри таких методов оценки уязвимости карстовых подземных вод, как «ЕРІК» и «СОР», а также Горно-Крымской методики. Результаты использования европейских методик «ЕРІК» и «СОР» демонстрируют значительно завышенную оценку уязвимости в сравнении с результатами применения Горно-Крымской методики. Метод «ЕРІК» относит к категориям «высокой» и «очень высокой» уязвимости соответственно 35% и 51% оцениваемой площади, метод «СОР» – 23% и 22% площади, Горно-Крымская методика – 19% и 7% площади соответственно. Разработка региональной методики оценки уязвимости карстовых вод для условий Горного Крыма видится оправданным решением, поскольку она дает более адекватные и применимые на практике результаты.

Ключевые слова: карстовые подземные воды, уязвимость к загрязнению, метод оценки, Горно-Крымская методика, массив Ай-Петри.

The assessment of karst groundwater vulnerability to contamination: comparative analysis of different methods application at the Ai-Petri massif (Mountainous Crimea) as example

S.V. Tokarev

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia
tokcrimea@list.ru*

Abstract. Assessment of groundwater vulnerability to contamination is an effective tool for scientific substantiation of the sanitary protection zones for drinking water sources. The paper presents the results of application of the European methods EPIK and COP, as well as the Mountain-Crimean method on the Ai-Petri massif as example. The results of European methods application showed a significantly overestimated vulnerability in comparison with the results of using the Mountain-Crimean method. The EPIK method identified 35% and 51% of the assessed area as the "high" and "very high" vulnerable, the COP method – 23% and 22% of the area, and Mountain-Crimean method - 19% and 7%, respectively. The development of a regional method for karst waters vulnerability assessment seems to be an appropriate solution, since it gives more adequate and practice applicable results.

Keywords: karst groundwater, vulnerability to contamination, assessment method, Mountain-Crimean method, Ai-Petri massif.

Введение

Согласно глобальным оценкам [5], около четверти населения Земли в значительной мере или полностью зависит от ресурсов карстовых подземных вод. На Крымском полуострове карстующиеся карбонатные породы залегают под 84% его площади [1]. Они содержат подавляющую часть всех ресурсов пресных подземных вод Крыма, а карстовые источники играют ведущую роль в питании большинства рек полуострова и устроенных на них водохранилищ. Таким образом, в Крымском регионе карстовые воды являются основой водоснабжения населения.

Подземные воды в закарстованных породах характеризуются рядом гидродинамических особенностей (очаговый характер питания и разгрузки, узкая концентрация подземного стока, высокие скорости движения вод), что сильно ограничивает применимость к ним традиционных гидрогеологических подходов и методов. В связи с этим в последние десятилетия получили развитие специальные методы оценки уязвимости подземных вод карстового типа, учитывающие их особенности. К таковым относятся европейские методы «ЕРІК», «СОР» и Словенский, получившие широкую популярность. На их основе была разработана Горно-Крымская методика оценки уязвимости карстовых вод, методологически усовершенствованная и адаптированная к региональным условиям карста Горного Крыма.

Целью данной работы является выполнение оценки уязвимости карстовых подземных вод к загрязнению на примере массива Ай-Петри в Горном Крыму с использованием различных методов («ЕРІК», «СОР» и Горно-Крымского) с последующим сравнительным анализом полученных результатов.

Материалы и методы исследования

Для целей оценки и картирования уязвимости подземных вод карстового типа широкую популярность приобрели индексно-рейтинговые методы. Эти методы созданы на основе простых алгоритмов суммирования (умножения) факторных показателей защитной способности геологической среды и гидрологических (гидрогеологических) условий территории. Примерами таких методов, получивших широкое применение во многих регионах мира, являются методы «ЕРІК» и «СОР».

Метод «ЕРІК» (производное от Epikarst, Protective cover, Infiltration condition, Karst development), разработанный группой швейцарских исследователей [4], предназначен для оценки уязвимости карстовых водоносных систем к загрязнению. В нём учтены четыре фактора уязвимости: проявление эпикарста (Е), эффективность защитного покрова (Р), условия фильтрации (І) и развитие карстовой сети (К). Среди преимуществ данного метода можно отметить простоту оценочной процедуры, отсутствие потребности в точных количественных данных, возможность оценки полной уязвимости (результаты оценки напрямую приводят к водоохранному зонированию). Разработчики метода рекомендуют использовать его для картирования уязвимости карстовых вод в крупном масштабе (1:10 000 – 1:5 000).

Метод «СОР» был разработан на основе общей Европейской методологии оценки уязвимости карстовых подземных вод [8]. Оценка уязвимости производится по трем группам факторов: 1 – перекрывающие слои (Overlying layers), 2 – концентрация стока (Concentration of flow) и 3 – режим атмосферных осадков (Precipitation regime), от аббревиатуры которых и происходит название метода. Главным преимуществом метода видится его гибкость и простота, поскольку он не требует детальных исследований и большого массива количественных данных, а может обходиться вполне доступными и легко картируемыми данными. Апробация метода показывает его высокую эффективность и достоверность, главным образом в районах открытого и раскрытого карста средиземноморского типа [6; 8]. Однако, как показала работа [7], в условиях

альпийского типа карста использование метода «СОР» приводит к переоценке реальной уязвимости.

Схема Горно-Крымской методики оценки уязвимости карстовых вод основана на общей Европейской методологии и частных методах «СОР» и Словенском. Однако, набор оцениваемых факторов и оценочные шкалы по сравнению с базовыми методами существенно изменены с учетом региональных особенностей развития карста Горного Крыма и уровня его изученности. Усовершенствование и адаптация методики заключается во введении в оценочную схему дополнительных факторов, в том числе защитной функции эпикарста, факторов концентрации подземного стока, линейной инфильтрации руслового стока, питания карстовых вод за счет твердых (снеговых) атмосферных осадков. Методика рекомендуется для оценки и картирования уязвимости карстовых подземных вод в масштабе 1:50 000 – 1:100 000. Апробация методики проводилась на примере массива Ай-Петри [2, 3].

Следует отметить, что в данной работе мы ограничиваемся оценкой «уязвимости ресурса» подземных вод, т.е. всего водоносного горизонта карстовых вод массива, в отличие от уязвимости конкретных точек выхода подземных вод, которая называется «полной уязвимостью» подземных вод. В качестве тестового района выбран Ай-Петринский массив площадью 237 км², расположенный в юго-западной части Горного Крыма. Район характеризуется сложностью геологического строения, разнообразием условий развития карста, высокой изученностью и хозяйственной освоенностью, а также большой значимостью в обеспечении региона водными ресурсами.

Процедура оценки выполнялась в программном пакете ArcGIS 10 и включала сбор данных по отдельным факторам уязвимости, перевод их в формат пространственных данных ГИС, создание отдельных векторных слоев по каждому из факторов с их атрибутизацией (присвоение оценочных индексов), оверлейные и арифметические операции между ними, ранжирование индексов производных слоев, картографическое представление результатов оценки.

Результаты и выводы

Полученные карты уязвимости подземных вод Ай-Петринского массива представлены на Рис. 1.

Использование Горно-Крымской методики показало, что в категорию «высокой» и «очень высокой» уязвимости попадают соответственно 18,6% и 7,1% площади оцениваемого района (Рис. 2). К ним относятся прирусловые участки крупных эрозионных и карстово-эрозионных форм рельефа (с максимальной степенью уязвимости для тех, которые развиваются на слабопроницаемом основании); участки высокой поверхностной и подземной закарстованности, сосредоточенные преимущественно в центральной части плато Ай-Петри; линейные зоны вдоль тектонических разрывов; русла периодических водотоков, замыкающихся на поноры-поглотители и разрывные нарушения.

Результаты применения метода «ЕРІК» показали резкое площадное преобладание категорий очень высокой (около 51 % площади тестового района) и высокой уязвимости (около 35 % площади). Практически вся территория, где наблюдаются хоть какие-либо поверхностные или подземные проявления карста, попала в категорию очень высокой уязвимости. В категорию средней и низкой уязвимости подземных вод (соответственно всего около 10% и 4% площади района) попали лишь территории, сложенные с поверхности слабопроницаемыми, слабо- или некарстующимися породами. Очевидно, что в пределах площадей, попавших в категорию очень высокой уязвимости, по факту наблюдаются резкие различия в условиях питания подземных вод, а, следовательно, и в возможности их загрязнения, которые на итоговой карте не получили отражения.

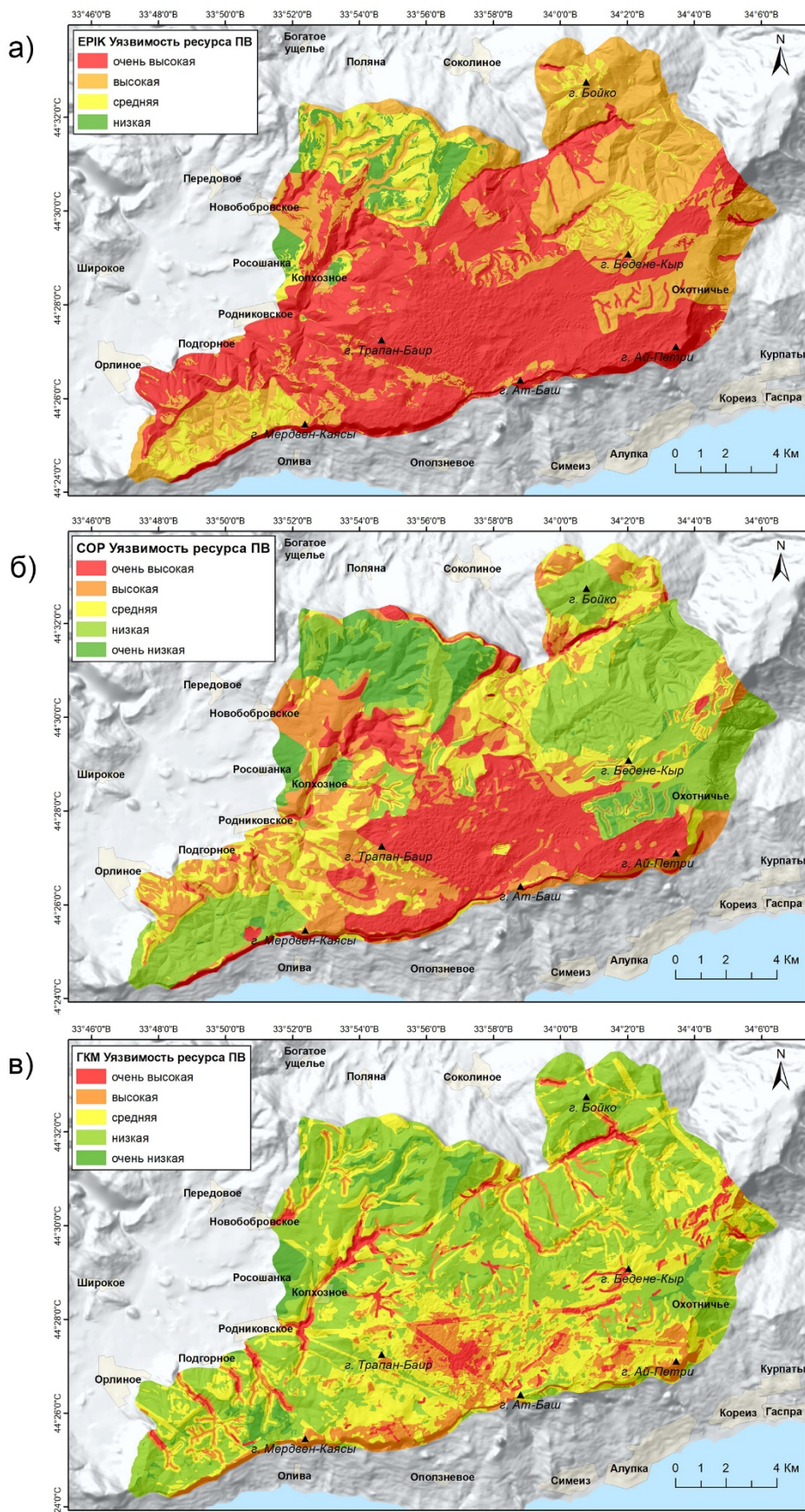


Рис. 1 Карты уязвимости подземных вод Ай-Петринского массива, полученные с использованием методов: а – «ЕРІК», б – «СОР», в – Горно-Крымской методики.

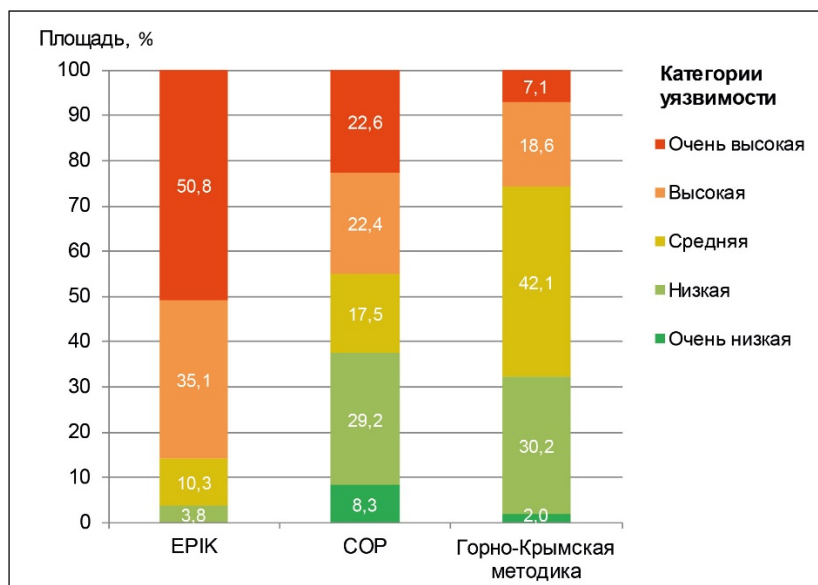


Рис. 2 Соотношение площадей категорий уязвимости подземных вод Ай-Петринского массива, полученных с использованием различных методов.

Причина этой проблемы нами видится в весовых коэффициентах оцениваемых факторов. Так, для фактора защитного покрова он является минимальным («1») на фоне высоких весов факторов условий инфильтрации и фактора эпикарста (по «3»). Кроме того, отсутствует учет буферной функции эпикарста по отношению к подземным водам. Очевидно, что фактор защитного покрова оценивается недостаточным образом, несоответствующем его реальной защитной функции. Вероятно, использование метода «ЕРИК» при оценке и картировании уязвимости подземных вод в более крупном масштабе даст более адекватные результаты. Однако для целей картирования уязвимости в избранном масштабе этот метод видится нами малоприменимым.

Согласно результатам использования метода «СОР» участки высокой и очень высокой категории уязвимости занимают довольно значительную долю площади оцениваемого района – примерно по 22,5 %. В категорию очень высокой уязвимости, как и в случае с «ЕРИК», попала бóльшая часть плато массива, где наблюдается хорошо выраженная закарстованность. К этой же категории оказались отнесены и участки обнажений известняков на обрывистых склонах массива и в речных каньонах, что также наблюдается и на картах, полученных с использованием Горно-Крымского подхода. Крупные воронки и котловины в пределах интенсивно закарстованной части плато получили меньшую степень уязвимости, чем окружающая территория. Участки массива со слабопроницаемым покровом практически полностью оказались в низкой и очень низкой категории уязвимости. Исключением стали водосборы активных поноров и узкие прирусловые зоны замыкающихся на них периодических водотоков, получившие категорию очень высокой уязвимости.

Полученное площадное распределение категорий уязвимости подземных вод объясняется гораздо более значительным весом факторов защитного покрова, в частности, почвенного слоя, чем у метода «ЕРИК». Отсутствие в оценочной схеме учета защитной функции эпикарста приводит к более высокой категоризации уязвимости всех интенсивно закарстованных территорий, за исключением участков с мощным почвенным покровом. Оценка фактора руслового стока ограничивается только водосборами активных поноров, которые в пределах оцениваемой территории практически не отмечаются.

Как видно из вышеизложенного, результаты оценки уязвимости карстовых подземных вод, проведенной на одной территории с использованием одного и того же набора данных, но разными методами, имеют довольно сильные различия. Для выяснения того, какой из методов является наиболее применимым и эффективным, необходима верификация полученных результатов, в качестве которой предлагаются систематические эксперименты по трассированию подземных вод, имитирующие различные сценарии попадания загрязнителя. С учетом имеющейся информации о карстолого-гидрогеологических условиях Ай-Петринского массива, наиболее адекватные реальности и применимые на практике результаты дает Горно-Крымская методика. Исходя из этого, разработка региональных методик для оценки уязвимости карстовых вод видится более оправданным решением, чем использование существующих методов, разработанных для условий других регионов.

Благодарности

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-10045, <https://rscf.ru/project/23-27-10045/>.

Acknowledgments

The work was supported by Russian Science Foundation project № 23-27-10045, <https://rscf.ru/project/23-27-10045/>.

Список литературы

1. Дублянский В.Н., Дублянская Г.Н. Карстовая республика (Карст Крыма и его проблемы). Симферополь, 1996. 88 с.
2. Токарев С.В. Оценка уязвимости карстовых подземных вод к загрязнению на примере массива Ай-Петри // Вопросы географии. Сб. 147. Спелеология и карстоведение. 2018. С. 143–160.
3. Токарев С.В. Уязвимость карстовых подземных вод Горного Крыма к загрязнению: выявление, оценка и картирование. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Симферополь: КФУ, 2020. 26 с.
4. Doerfliger N., Jeannin P.-Y., Zwahlen F. 1999. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method) // Environmental Geology. 1999. 39(2). P. 165–176.
5. Ford D., Williams P. Karst Hydrogeology and Geomorphology. – Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2007. 562 pp.
6. Marin A.I., Dorfliger N., Andreo B. Comparative application of two methods (COP and PaPRIKa) for groundwater vulnerability mapping in Mediterranean karst aquifers (France and Spain) // Environ. Earth Science. 2011 (Spec. Iss.). P. 1–15.
7. Plan L., Decker K., Faber R., Wagreeich M., Grasemann B. Karst morphology and groundwater vulnerability of high alpine karst plateaus // Environ Geol. Iss. 58. 2009. P. 285–297.
8. Vias J. M., Andreo B., Perles M. J., Carrasco F., Vadillo I., Jim'enez P. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method // Hydrogeology Journal. 2006. № 14. P. 912–925.

Установление границ подземно-карстовых водосборов в верховьях р. Бельбек (Горный Крым) методом трассерных экспериментов

С.В. Токарев*, Г.Н. Амеличев, А.И. Серeda, Е.В. Брага

*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь, Россия
tokcrimea@list.ru*

Аннотация. Бельбек – самая полноводная река Крымского полуострова – берет свое начало на северном склоне Ялтинского массива Главной гряды Крымских гор. Основными истоками реки являются крупные карстовые источники Биюк-Узенбашский, Кучук-Узенбашский и Тюллюк. Для выяснения границ водосборов карстовых источников на вершинной платообразной поверхности Ялтинского массива в марте 2023 г. был выполнен мультитрассерный эксперимент. Результаты эксперимента позволили отнести юго-западную часть Ялтинской яйлы к водосбору источника Тюллюк, центральную часть – к водосбору Кучук-Узенбашской группы источников, северо-восточную часть – к водосбору источника Биюк-Узенбаш. Также в условиях паводка выявлена бифуркация подземно-карстового стока из водоносной системы Кучук-Узенбашских источников в водоносную систему источника Биюк-Узенбаш.

Ключевые слова: карстовая водоносная система, карстовый источник, р. Бельбек, Ялтинский массив, трассерный эксперимент.

Determination of the karst underground watersheds boundaries in the upper reaches of the Belbek river (Mountainous Crimea) by tracing experiments

S.V. Tokarev*, G.N. Amelichev, A.I. Sereda, E.V. Braga

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia
tokcrimea@list.ru*

Abstract. Belbek – the most abundant river of the Crimean Peninsula – originates on the northern slope of the Yalta massif of the Main Crimean Range. The main sources of the river are large karst springs Biyuk-Uzenbashsky, Kuchuk-Uzenbashsky and Tyullyuk. To determine the boundaries of the karst springs catchment areas on the plateau surface of the Yalta massif, a multi-tracing experiment was carried out in March 2023. The results of the experiment made it possible to attribute the southwestern part of the Yalta Yayla to the catchment area of Tullyuk spring, the central part - to the catchment area of the Kuchuk-Uzenbash group of springs, the northeastern part - to the catchment area of the Biyuk-Uzenbash spring. Also, under flood conditions, a bifurcation of underground karst runoff from the aquifer system of the Kuchuk-Uzenbash springs to the aquifer system of the Biyuk-Uzenbash spring, which were previously considered as hydraulically unconnected.

Keywords: karst aquifer system, karst spring, Belbek river, Yalta massif, tracing experiment.

Введение

Горный Крым является областью интенсивного развития и широкого распространения карстовых явлений. Верхний структурный этаж Главной гряды Крымских гор практически повсеместно сложен закарстованными известняками верхнеюрского возраста. Обширные платообразные водосборы горно-крымских массивов аккумулируют атмосферные осадки, переводя их в подземно-карстовый сток, который сосредотачивается и проводится карстовыми водоносными системами (КВС). Разгрузка их стока производится у подножья массивов крупными источниками, дающими начало большинству крымских рек. Таким образом, возникает проблема выделения подземных водосборов верхних звеньев речных систем, формирующих основную долю речного стока Крымского полуострова. Выделение границ карстовых водосборов по поверхностным водоразделам не дает положительного результата, поскольку распределение подземно-карстового стока имеет преимущественно тектонический и литолого-стратиграфический контроль. Несмотря на многочисленные усилия, предпринятые в направлении изучения карстовой гидрогеологии Горного Крыма [1], проблема определения границ подземно-карстовых водосборов на большинстве горных массивов региона до сих пор далека от разрешения.

Целью данной работы является выяснение границ подземных водосборов крупных карстовых источников, расположенных на северном склоне Ялтинского массива Главной гряды Крымских гор, которые являются основными истоками реки Бельбек. В качестве главного метода используется эксперимент по мультитрассированию подземных карстовых вод с использованием флуоресцентных красителей.

Материалы и методы исследования

Принято считать, что р. Бельбек берет начало со слияния ручьев Биюк-Узенбаш и Манаготра [2]. Однако, по нашему мнению, правильнее было бы определять началом р. Бельбек слияние ручьев Кучук-Узенбаш и Биюк-Узенбаш, как самых полноводных водотоков в верховье речного бассейна. Подавляющую долю стока этих ручьев обеспечивают крупные карстовые источники, расположенные на северном склоне Ялтинского массива: Кучук-Узенбашский (в литературе известен также под названием Карстовый), Биюк-Узенбаш и Тюллюк. Средний расход каждого из них превышает 100 л/сек [4]. Источники дренируют обводненные зоны крупных тектонических нарушений, вскрытых глубокими эрозионными врезами в водоносных породах верхней юры вплоть до их контакта с подстилающими слабопроницаемыми преимущественно песчано-глинистыми отложениями средней юры.

Гидрогеологические условия Ялтинского массива детально изучались в 60-х гг. прошлого столетия в ходе изысканий, связанных со строительством тоннельного водовода сквозь Главную гряду. Выполненная при этом сотрудниками Института минеральных ресурсов серия индикаторных экспериментов позволила установить связь участков поглощения поверхностного стока на северном склоне Ялтинского массива с указанными карстовыми источниками [3]. Эти результаты позволили наметить границы подземно-карстовых водосборов склоновой части массива. Позже (в 1975 г.) Ялтинской инженерно-гидрогеологической партией (ЯИГПП) выполнены два запуска флуоресцентного красителя на западной окраине плато Ялтинского массива. Согласно результатам тех экспериментов, выход красителя среди прочих был выявлен в источниках Кучук-Узенбашском и Биюк-Узенбаш [1].

Для выяснения контуров подземных водосборов указанных карстовых источников на бессточном плато Ялтинского массива в марте 2023 г. был выполнен трассерный эксперимент. В качестве индикаторов использовались флуоресцентные красители уранин-А, эозин-Н и родамин-В. Запуск трассеров осуществлялся в точках,

примерно равноудаленных друг от друга на расстояние 3.2–3.3 км (Рис. 1). В западной части плато краситель эозин-Н был запущен в карстовой полости Эндек (глубина 37 м, высотная отметка входа 1315 м н.у.м.). В центральной части плато в карстовой полости Ялтинская (глубина 31 м, высотная отметка входа 1280 м н.у.м.) был введен уранин-А. В восточной части плато в понор-поглотитель между г. Оксек-Бурун и г. Лапата (высотная отметка 1350 м н.у.м.) был введен родамин-В. Масса введенного красителя в каждом случае составила 0.5 кг. Начало эксперимента, состоявшееся 11 марта, сопровождалось дождями (15 мм за сутки) и таянием снега, что позволило ввести красители в мелкие временные водотоки с расходом 0.1-0.5 л/сек. В ночь после запуска эксперимента дождь усилился, что вызвало на следующий день паводок с резким подъемом уровня карстовых вод и увеличением расходов источников примерно на порядок.

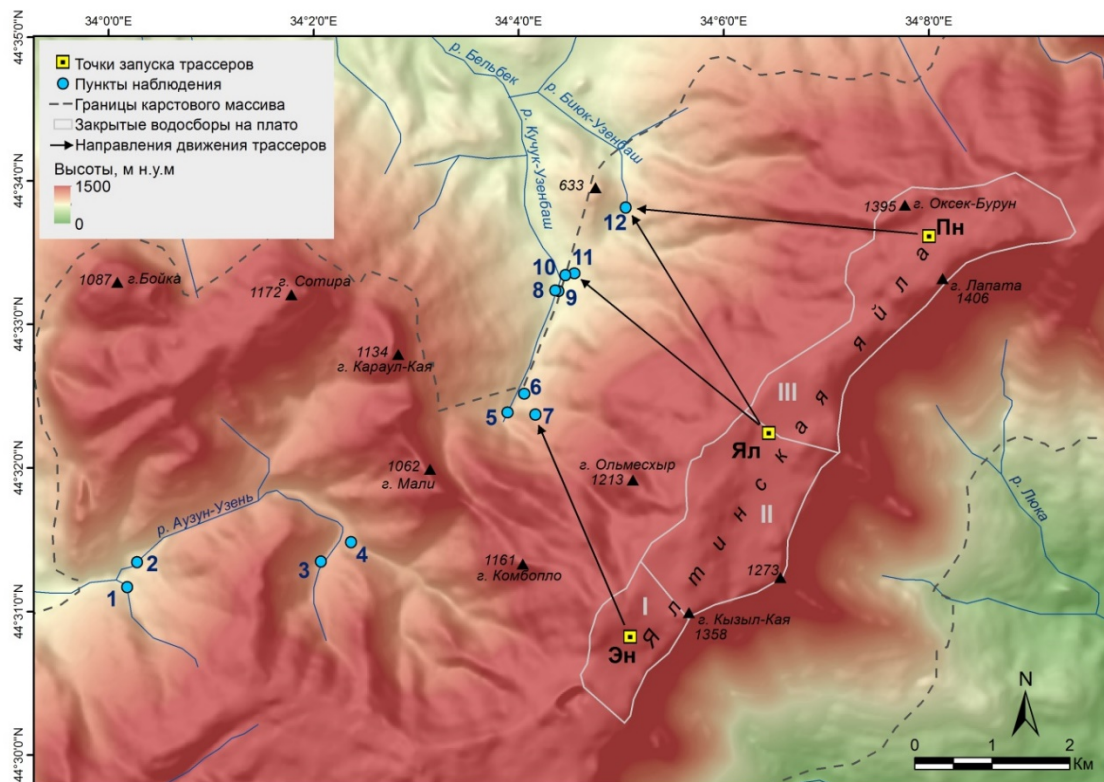


Рис. 1 Схема трассерного эксперимента 2023 г. на Ялтинском карстовом массиве.

Точки запуска трассеров: Эн – пещера Эндек, Ял – пещера Ялтинская, Пн – понор у дороги. Пункты наблюдения за выходом трассеров: 1 – ист. Яуз-Чокрак, 2 – ист. Пания, 3 – ист. Баш-Дере, 4 – ручей Куру-Узень, 5 – верхний ручей Кучук-Узенбаш, 6 – правый родник, 7 – ист. Тюллюк, 8 – ист. Азменын-Чокрак левый, 9 – ист. Азменын-Чокрак правый, 10 – ист. Сухой балки, 11 – ист. Кучук-Узенбашский, 12 – ист. Буюк-Узенбаш. Подземные водосборы на карстовом плато Ялтинского массива: I – ист. Тюллюк, II – ист. Кучук-Узенбашского, III – ист. Буюк-Узенбаш.

Отслеживание выхода красителей проводилось на 12 пунктах посредством ловушек с активированным углем и отбора проб воды. Перед запуском эксперимента для определения фоновой флуоресценции были отобраны контрольные пробы. Частота смены ловушек и отбора проб в течение первой недели после запуска красителей составляла 1–2 дня, в последующее время – 3–4 дня. Определение красителей в ловушках и пробах воды проводились в лабораторных условиях с использованием спектрофлуориметра Horiba Fluoromax 4 согласно методике [5].

Результаты и выводы

Наступление паводка сразу после запуска эксперимента способствовало быстрому прохождению трассеров. Красители были обнаружены в водах карстовых источников уже на вторые сутки после запуска, демонстрируя при этом максимальную концентрацию (Рис. 2). Выход эозина-Н зафиксирован в единственном источнике Тюллюк, расположенном в верховьях р. Кучук-Узенбаш. Уже на 5-е сутки после запуска интенсивность флуоресценции здесь снизилась до фоновых значений. Уранин-А обнаружен в Кучук-Узенбашской группе источников (правый приток р. Кучук-Узенбаш), включая родник в балке ниже основного выхода (источник Сухой балки), а также, со значительно меньшей концентрацией, в источнике Биюк-Узенбаш. Выход красителя перестал фиксироваться на 7-е сутки после запуска. Родамин-В выявлен в водах источника Биюк-Узенбаш и перестал обнаруживаться на 5-е сутки после запуска. В остальных точках наблюдения следов запущенных красителей не зафиксировано.

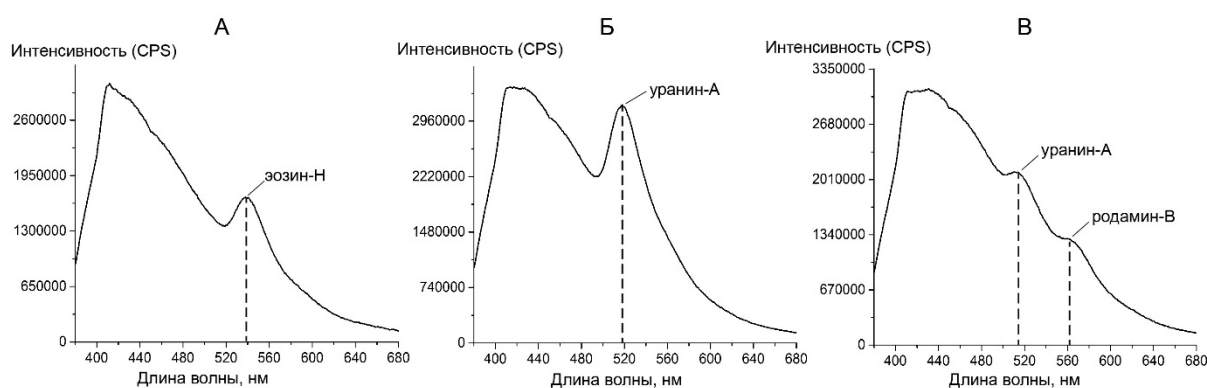


Рис. 2 Спектры люминесценции, полученные из ловушек: А – ист. Тюллюк, Б – ист. Кучук-Узенбашский, В – ист. Биюк-Узенбаш (дата снятия 13 марта 2023 г.).

Расстояния по прямой, пройденные трассерами, составили от 3.1 км (пещ. Эндек – ист. Тюллюк) до 3.9 км («понор у дороги» – ист. Биюк-Узенбаш), а вертикальные амплитуды – от 650 м до 815 м, соответственно (Табл.). С учетом коэффициента извилистости карстовых полостей «1,3», предложенного В.Н. Дублянским, расчетные скорости продвижения трассеров составили от 2550 м/сут до 3290 м/сут. Это примерно соответствует значению средней скорости движения карстовых вод для Горного Крыма, полученной по результатам прошлых трассерных экспериментов [1]. Быстрое затухание флуоресценции в водах источников говорит о высокой плотности прохождения «пакетов» трассеров, что указывает на хорошую проработанность подземной карстово-канальной сети в недрах массива, а также является следствием высокой концентрации подземного стока и значительной вертикальной амплитуды водоносных систем.

Результаты выполненного эксперимента позволяют наметить границы областей питания исследуемых карстовых источников в пределах бессточного плато Ялтинского массива (Рис. 1). К водосборной площади источника Тюллюк нами отнесена юго-западная часть Ялтинской яйлы, ограниченная тектоническим нарушением, обозначенным на государственных геологических картах 1985-1986 гг. как Ялтинский сбросо-сдвиг. Центральная часть Ялтинской яйлы относится к водосбору Кучук-Узенбашской группы источников. Его восточная граница на плато условно проведена нами через карстовую пещеру Ялтинскую, поскольку запущенный в ней краситель вышел также в источнике Биюк-Узенбаш. Однако обнаруженная бифуркация подземно-карстового стока между двумя КВС могла произойти в результате разноса красителя в условиях паводка вдоль тектонического нарушения, к которому

приурочены выходы указанных источников. Северо-восточная часть Ялтинской яйлы, соответственно, отнесена нами к водосбору источника Биюк-Узенбаш.

Табл. Результаты трассерного эксперимента.

Точка запуска	Краситель	Выход	Расстояние по прямой, км	Время добегания (мин-макс), ч	Расчетная скорость (средняя), м/сут*	Перепад высот, м
Пещера Эндек	эозин-Н	ист. Тюллюк	3.1	24-52	2550	650
Пещера Ялтинская	уранин-А	ист. Кучук-Узенбашский	3.2	24-48	2770	800
		ист. Биюк-Узенбаш	3.5	24-51	2870	765
Понор у дороги	родамин-В	ист. Биюк-Узенбаш	3.9	24-50	3290	815

* с учетом коэффициента извилистости карстовых полостей, равного 1.3

Сравнивая полученные данные с результатами эксперимента, проведенного ЯИГПИ, обнаруживаем их существенные различия. Краситель, запущенный в 1975 г. в понор Яузлар, расположенный недалеко от пещеры Эндек, как указывается в [1], был выявлен в 8 источниках (4 из них на южном склоне массива), среди которых источники Пания, Кучук-Узенбашский и Биюк-Узенбаш. Такой широкий разнос красителя предположительно мог произойти в трещинной среде эпикарстовой зоны массива, поскольку, по имеющимся сведениям, понор Яузлар не имеет прямой связи с каналами КВС.

Полученные в результате проделанной работы данные существенно проясняют карстово-гидрогеологические условия Ялтинского массива и представляют большой интерес для дальнейших гидрологических работ в верховьях р. Бельбек.

Благодарности

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00236, <https://rscf.ru/project/23-27-00236/>.

Acknowledgments

The work was supported by Russian Science Foundation project № 23-27-00236, <https://rscf.ru/project/23-27-00236/>.

Список литературы

1. Дублянский В.Н., Кикнадзе Т.З. Гидрогеология карста Альпийской складчатой области юга СССР. М.: Наука, 1984. 128 с.
2. Олиферов А.Н., Тимченко З.В. Реки и озёра Крыма. Симферополь: Доля, 2005. 214 с.
3. Шутов Ю.И. Взаимосвязь поверхностных и подземных вод на склонах Главной гряды Крымских гор // Информ. Бюл. "Метеорология и гидрология". 1967. №12. С. 167–171.
4. Шутов Ю.И. Обводненность и типы вод Ялтинского горного массива // Комплексные изыскания при строительстве гидротоннеля в карстовой области Горного Крыма. Симферополь, 1971. С. 124–151.
5. Aley T. Ozark Underground Laboratory's Groundwater Tracing Handbook. Protem: Ozark Underground Laboratory, 2002. 44 p.

Моделирование речной сети на основе цифровой модели рельефа (на примере Черноморского побережья Кавказа)

В.Ф. Толкачева*, Б.И. Гарцман

*Институт водных проблем РАН, Москва, Россия
vasilisa.tolkachevag@yandex.ru*

Аннотация. Представлено обоснование выбора адекватной методики автоматизированной оцифровки речной сети по цифровым моделям рельефа на основе поиска оптимального набора индексов, позволяющего отдельно параметризовать климатические и геоморфологические условия бассейнов. Рассмотрены результаты сравнения ручной и автоматической оцифровки речной сети по вариантам критериальных индексов трех рек бассейнов трех рек черноморского побережья Кавказа: Псеуапсе, Шахе и Адерба.

Ключевые слова: моделирование, речная сеть, цифровая модель рельефа, критериальные индексы, структурно-гидрографический анализ.

Modeling of the river network based on a digital relief model (by the example of the Black Sea coastline of the Caucasus)

V.F. Tolkacheva*, B.I. Gartsman

*Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
vasilisa.tolkachevag@yandex.ru*

Abstract: The study justifies the choice of an adequate method of automated digitization of a river network using digital elevation models based on searching for the optimal form of the index which enables separate parameterization of climatic and geomorphological conditions of basins. The article considers results of comparison of manual and automatic digitization of the river network of the Psezuapse, Shakhe and Aderba river basins for variants of criteria indices.

Keywords: modeling, river network, digital relief model, criteria indexes, structural and hydrographic analysis.

Введение

Отсутствие надежных фактических данных о моделируемом объекте является специфической проблемой моделирования речной сети, не возникающей, например, при моделировании речного стока. Все данные по речным сетям, которые имеются в нашем распоряжении, должны рассматриваться как модели, лишь приблизительно отражающие реальные объекты. Карты, аэрофото- и космоснимки, справочники – все они очень по-разному воспроизводят состав, структуру и морфологию речной сети в зависимости от масштаба, технических и методических аспектов съемки, способов обработки первичных материалов. Велика также динамичность самой сети в разных масштабах времени, отраженная в данных в виде статичных неоднородных временных срезов. Проблема создания адекватных моделей речной сети сегодня достаточно остра, поскольку совершенствование ГИС-технологий формирует новую цифровую реальность в науках о Земле. Как можно судить о реалистичности различных методов

моделирования речных систем, если реальность в данном случае настолько слабо поддается наблюдению и анализу?

Данная работа выполнена в рамках сформулированной проблематики и является продолжением исследований [2-6]. Исследуются возможности развития методических подходов к моделированию речных систем, переноса ранее разработанной методики в новые регионы с существенно отличающимися физико-географическими условиями, возможности регионального обобщения полученных параметров и сопоставление параметров, обобщенных в различных регионах.

Целью работы является разработка оптимальной методики оцифровки речной сети по цифровым моделям рельефа, которая, при устойчивых значениях заданных параметров, давала бы реалистичные результаты на обширных территориях [3]. Объектом исследования является территория черноморского побережья Кавказа – одного из регионов альпийского складчатого пояса, характеризующегося геологической «молодостью» рельефа и явно неравновесным характером речных систем на этапе активного врезания при интенсивных восходящих тектонических движениях.

Материалы и методы

Исследование выполнено на примере бассейнов трех рек черноморского побережья Кавказа: Псецуапсе, Шахе, Адерба.

Реки Псецуапсе и Шахе протекают в Лазаревском районе города Сочи, Краснодарского края. Площадь бассейна Псецуапсе – 290 км², рельеф – горный с наибольшими высотами (1400-1800 м) в верховьях реки, на преобладающем протяжении долина реки V-образная. Площадь водосборного бассейна Шахе – 553 км². Рельеф бассейна горный, изрезанный долинами многочисленных притоков и оврагами, характеризующийся большими относительными высотами, достигающими 800-1000 м в верховьях и в среднем течении, и до 200 м в нижнем течении. Долина в верховьях V-образная, а ниже до устья ящикообразная. Адерба – река в Краснодарском крае, берёт своё начало у перевала Бабича, на территории Крымского района, далее течёт по территории города Геленджик, имеет широкую пойму. Площадь бассейна – 73,5 км², максимальные высоты достигают 600-750 м. Преобладающим элементом режима перечисленных рек являются дождевые паводки в течение всего года, для Псецуапсе и Шахе существенна также доля снегового питания [7; 8].

В качестве топографической основы были использованы карты масштаба 1:100 000, оцифрованные и привязанные в единой системе координат с цифровой моделью рельефа (ЦМР). Условно за фактическую принимается та речная сеть, которая отрисована на топографических картах «голубыми линиями». Основой методики исследования является экспертное сопоставление результатов ручной и автоматизированной оцифровки речной сети.

Используемая ЦМР из открытых источников – FABDEM (Forest And Buildings removed Copernicus DEM). Данная ЦМР, на сегодняшний день, первая глобальная цифровая модель рельефа, где удалены лесные массивы и здания [1]. Вся обработка цифровых пространственных данных велась на базе ArcMap10.6 по методике описанной в [3] с изменениями, связанными с представлением цифрового рельефа в виде покрытия с квадратным пикселем размера 22,5×22,5 м.

Из работ [2-6] известны варианты критериальных индексов (функции инициации), превышение пороговых значений которых интерпретируется как точка начала первичного элемента речной сети. В качестве индексов используются площадь водосбора (A), индекс энергии рельефа (zA), индекс напряжения сдвига ($zA^{0.5}$), объем климатического стока (Q), комплексный энергетический индекс (zQ) и напряжения сдвига с использованием климатического стока ($zQ^{0.5}$), а также величина эрозионного вреза бассейна.

Калибровка для всех индексов производилась методом экспертного выбора оптимальных значений параметров для получения наилучшего, т.е. максимально приближенного к «истинному», значения. Критерием подбора параметров служило количество водотоков – притоков первого порядка по Хортону – в близком совпадении в сравниваемых речных сетях. Обоснование выбора данного метода приведено в [4; 6].

Так же с помощью авторских инструментов-надстроек для ГИС велась работа по установлению минимальной длины водотока. Инструменты задают минимальное число ячеек, из которых должен состоять сегмент первого порядка, чтобы не считаться «артефактным», а также автоматизирует построение речной сети по функциям инициации. На данный момент инструменты проходят апробацию, поэтому в научных публикациях еще не представлены реализуемые ими алгоритмы.

Результаты и обсуждения

При калибровке полуавтоматическим способом, которая велась исключительно по числу водотоков первого порядка в бассейнах рек, остальные показатели довольно существенно разнились. В частности, все варианты функции инициации существенно занижают длину реки, а это один из ключевых факторов, по которому мы можем проверить адекватность модели (Табл. 1). Возможно, это объясняется тем, что построение по ЦМР автоматическим способом дает короткие притоки, т.е. только намечает истоки водотоков, а в реальности происходит развитие попятной эрозии с образованием полноценных длинных водотоков.

Табл. 1 Сопоставление вариантов оцифрованной речной сети по различным критериальным функциям с картографическим изображением.

	Псезуапсе		Шахе		Адерба	
	Кол-во водотоков I порядка (шт.)	Общая длина водотоков (м)	Кол-во водотоков I порядка (шт.)	Общая длина водотоков (м)	Кол-во водотоков I порядка (шт.)	Общая длина водотоков (м)
Топокарта	131	268482,5	351	668780,1	62	180011,8
A	131	238050,7	351	527213,1	63	161161,1
zA	131	214865,2	351	493543,3	62	158291
zA ^{0,5}	132	201433,6	352	448913,2	62	151745,7
Q	131	232457,3	351	526949,1	62	163148,5
zQ	131	214161,7	351	491279,3	62	158776,2
zQ ^{0,5}	130	198799,1	351	447708,4	62	158866,3
По врезу	132	168007,9	351	382458,2	62	109564,9

Сравнивая результаты, невозможно однозначно сказать, что индексы дают реалистичную картину по речной сети в целом. Именно для решения этой проблемы применялся один из авторских инструментов-надстроек для ГИС, который задает минимальное число ячеек, составляющих сегмент первого порядка. Его применение обусловлено необходимостью выделения потоков по пороговым значениям длины для более четкой дифференциации речной сети по ее главному свойству – изменению густоты по площади в зависимости от рельефа и уровня увлажнения.

Результаты автоматической оцифровки речной сети по наиболее значимым функциям инициации с выделением притоков первого порядка по пороговым значениям длины представлены в Табл. 2. Даже с неточным «попаданием» в общее количество водотоков, почти всегда, оцифрованная по индексам речная сеть очень близка условной фактической, т.е. снятой с топокарт.

Табл. 2 Результаты автоматической оцифровки речной сети по вариантам функций инициации с выделением притоков первого порядка по пороговым значениям длины.

	Кол-во водотоков I порядка (шт.)	Минимальная модельная длина водотока I порядка, пиксел	Общая длина водотоков (м)	Изменение общей длины водотоков, %, по сравнению с данными табл. 1.
Бассейн реки Псезуапсе				
Топокарта	131	-	268482,5	-
A	131	12	252983,4	+5,6
$zA^{0,5}$	131	12	236664,0564	+13,1
zQ	131	11	238016,6	+8,9
Бассейн реки Шахе				
Топокарта	351	-	668780,1	-
A	351	12	570911,3	+6,5
$zA^{0,5}$	351	12	555121,0	+15,9
zQ	350	12	557738,1	+9,9
Бассейн реки Адерба				
Топокарта	62	-	180011,8	-
A	62	12	165059,0	+2,2
$zA^{0,5}$	62	12	166470,2	+8,2
zQ	62	12	176967,8	+10,1

Об адекватности методики автоматизированной оцифровки речной сети по цифровым моделям рельефа говорит то, что практически по всем функциям инициации (Табл. 2) общая длина рек приближается к «истине» и попадает в 15% допустимую ошибку. При этом, снижается пороговое значение индексов при калибровке по всем вариантам функции инициации. Видно также, что результаты для бассейна р. Адербы отличаются от других двух бассейнов. Здесь комплексный энергетический индекс (zQ) дает наилучшее и очень близкое к фактической значение длины речной сети. Для других бассейнов длины модельных сетей в целом значительно занижены по сравнению с фактом, при этом наилучшее приближение дает индекс площади (A). Хотя индекс напряжения сдвига ($zA^{0,5}$) бассейнов Шахе и Псезуапсе больше реагируют на изменение количества пикселей длины притоков первого порядка. Объяснением этому может служить, что бассейн реки Адерба, в отличие от других, располагается в северной части черноморского побережья Кавказа, в условиях относительно спокойной тектоники, что подчёркивает необходимость поиска оптимального набора индексов, позволяющего раздельно параметризовать климатические и геоморфологические условия бассейнов

Модельные построения по индексам, дающим наилучший показатель изменения общей длины водотоков, и фактическая речная сеть представлены на Рис. На Рис. б,г,д уже достаточно отчетливо видно попятную эрозию водотоков первого порядка, а также отсутствие множества коротких притоков, которые изначально затрудняли работу корректного построения модели. В первом приближении смоделированные речные сети похожи на «истинные».

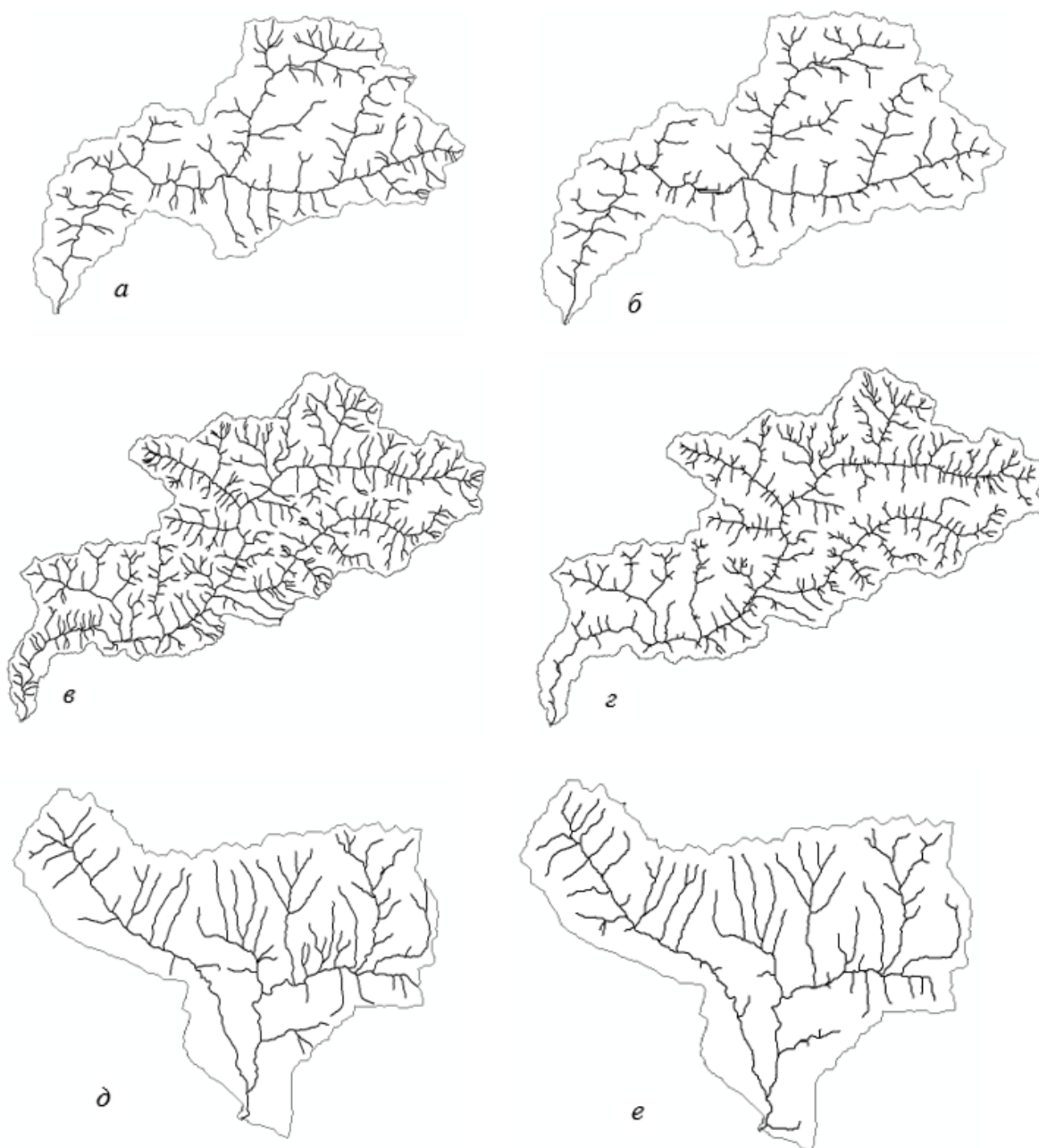


Рис. Речные сети моделируемых бассейнов: *a* – Псезуапсе по топокарте; *б* – напряжения сдвига $zA^{0,5}$ Псезуапсе; *в* – Шахе по топокарте; *г* – напряжения сдвига $zA^{0,5}$ Шахе; *д* – Адерба по топокарте; *е* – комплексный энергитический индекс zQ Адерба.

Выводы

Работа направлена на развитие методов моделирования речной сети по ЦМР с использованием климатических геоданных. Выполнено обобщение методик автоматической оцифровки речной сети на основании набора 7 индексов (функций инициации), и их сравнительное тестирование на примере трех небольших речных бассейнов черноморского побережья Кавказа, характеризующихся различными общими высотными характеристиками рельефа и интенсивностью тектонического воздымания.

Рассматриваемая методика в совокупности с возможностями ГИС и новых инструментов-надстроек может значительно улучшить работу по моделированию речной сети на территориях с недостаточной гидрологической изученностью.

Предварительно можно говорить о применимости упомянутых методик и соответствии результатов работы полученным в ранее выполненных исследованиях.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0001 Государственного задания ИВП РАН.

Acknowledgments

This study was carried out within the framework of the State Assignment of the Water Problems Institute Russian Academy of Sciences (subject no. FMWZ-2022-0001)

Список литературы

1. Laurence Hawker et al. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. 2022 Environ. Res. Lett. 17
2. Rodrigues-Iturbe I., Rinaldo A. Fractal River Basin. Chance and self-organization //Cambrige Univ. Press, - 1997. 547 p.
3. Гарцман Б.И. Анализ геоморфологических условий формирования первичных водотоков на основе цифровых моделей рельефа // География и природные ресурсы». 2013. №1. С. 136-147.
4. Гарцман Б.И. Шекман Е.А. Возможности моделирования речной сети на основе ГИС-инструментария и цифровой модели рельефа. Речные систем Дальнего Востока России: четверть века исследований/ Б.И. Гарцман, В.В. Шамров, Т.С. Гурарева и др. – Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 357-370
5. Гарцман Б.И., Бугаец А.Н., Тегай Н.Д., Краснопеев С.М. Анализ структуры речных систем и перспективы моделирования гидрологических процессов // География и природные ресурсы. - 2008. - № 2. - С. 116-123.
6. Гарцман Б.И., Галанин А.А. Структурно-гидрографический и морфометрический анализ речных систем: теоретические аспекты // География и природные ресурсы. 2011. №3. С. 27-37.
7. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 9. Закавказье и Дагестан. Вып. 1. Западное Закавказье / под ред. Т. Н. Джапаридзе. – Л.: Гидрометеиздат, 1964. – 224 с.
8. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 9. Закавказье и Дагестан. Вып. 1. Западное Закавказье / под ред. Т. Н. Джапаридзе. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. —23 с.

Результаты изучения состава и свойств грунтов селевых отложений в зоне многолетнемерзлых пород

Н.Н. Ухова^{1*}, Ю.В.Генсиоровский²

¹ФГБУН Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

²ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Сахалинский филиал, г. Южно-Сахалинск, Россия,
nat_ukhova@crust.irk.ru

Аннотация. В данной работе, которая является продолжением цикла исследований селевых процессов (2010-2022 гг.) на территории России, сделано обобщение результатов изучения состава и свойств селевых отложений районов, где имеют распространение многолетнемерзлые породы: Кодарский хребет, р.Быйики, басс. р. Чара (Становое нагорье, Забайкальский край); Баджальский хребет, басс. р. Урми (Сихоте-Алинь, Хабаровский край); хребет Искатень, Чукотка. В ходе лабораторных исследований получены данные по минеральному и гранулометрическому составу, некоторые физические и физико-химические параметры грунтов, которые позволили выявить особенности грунтов в селевых массивах.

Ключевые слова: селевой поток, гранулометрический состав, глинистые минералы, многолетнемерзлые породы.

Results of the study of composition and properties of soils of mudflow deposits in the cold climate zone

N. N. Ukhova^{1*}, Yu. V. Gensiorovskiy²

¹Institute of the Earth's Crust of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

²Far East Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation
nat_ukhova@crust.irk.ru

Abstract. This paper, which is a continuation of the cycle of studies of debris flows (2010-2022) in Russia, summarises the results of the study of the composition and properties of debris deposits in the areas where permafrost is widespread: Kodar Ridge, Byiki River, Chara River bas. (Stanovoe Plateau, Transbaikal Territory) and Bajalsky Ridge, and Bajalsky Ridge, bas. of the Urmi River (Sikhote-Alania), Iskaten Ridge, Chukotka. In the course of laboratory studies, data on mineral and granulometric composition, some physical and physicochemical parameters of soils were obtained, which made it possible to identify the peculiarities of soils in mudflow massifs.

Keywords: debris flow, granulometric composition, clay minerals, permafrost.

Введение

Исследования опасных экзогенных геодинамических процессов, одними из которых являются сели, на территории горных систем Восточной Сибири, Хабаровского края и Чукотки получили новый этап развития за счет активного освоения их ресурсного потенциала и расширения хозяйственной деятельности. Распространение селевых процессов в зоне многолетнемерзлых пород (ММП) гораздо

шире, чем было принято считать. В связи с этим возникает необходимость комплексного подхода к изучению селевых потоков в зонах природно-техногенных комплексов с расширением лабораторных работ по изучению состава и свойств пород, которые являются средой возникновения и развития процесса. По селевому районированию эта территория отнесена к холодной селевой зоне, где на активность селей оказывает влияние повсеместное распространение многолетнемерзлых пород (ММП), которые, ограничивают вовлечение в сель горных пород из потенциальных селевых массивов (ПСМ). Однако, мониторинговые наблюдения, выполняемые в рамках Международной программы по циркумполярному мониторингу деятельного слоя (CALM) и Международного проекта по термическому состоянию мерзлоты (GTN-R), показывают опускание кровли ММП [1] и увеличение мощности сезонно-талого слоя. Оттаивание мерзлоты приводит к появлению в селевых бассейнах дополнительного источника воды. Накопление влаги в грунтах ПСМ и в оползневых массивах снижает их несущую способность, что приводит к селевым и оползневым явлениям, а также к изменению их физических характеристик.

Целью данной работы стало обобщение аналитических данных по составу и свойствам селевых отложений горных районов, где распространены многолетнемерзлые породы: хребет Искатень басс. р.Эрвыкыннотвеем, Анюйский хребет басс. р. Бол. Анюй (Чукотский полуостров), Кодарский хребет, басс. р. Чара (Становое нагорье, Забайкальский край) и Баджалский хребет, басс. р. Урми (Сихотелинь, Хабаровский край).

Материалы и методы исследования

В период 2012-2022 гг. во время полевых работ специалистами Сахалинского филиала ДВГИ ДВО РАН выполнялись описание селевых бассейнов, оценка характеристик селей, уточнение карт селеопасных районов с учетом геологических, геоморфологических, климатических и ландшафтных факторов, полученных дистанционными и полевыми методами исследования [3; 4; 7; 10].

Чукотский полуостров. Хребет Искатень имеет абсолютные отметки, превышающие 1300 м. Характер рельефа – альпинотипный, вершины острые, а гребень хребта скалистый и узкий. Характерными чертами горного рельефа района является распространение процессов криогенной денудации: морозного выветривания и смещения чехла рыхлых отложений вниз по склонам в виде курумов, солифлюкционных потоков и др., а также наличие моренных отложений. Разлит водно-эрозионный рельеф с узкими поперечными профилями речных долин, на склонах - большое количество денудационных воронок, широко распространены склоны крутизной 30-35°. Рельеф осложнен многочисленными ледниковыми карами, озерными котловинами, трогами и цирками. В геологическом строении территории распространены породы мелового возраста (К), представленные андезитами дацитовыми порфиритами, их лавобрекчиями и туфами, алевролитами, гравелитами, встречаются интрузии нижнемеловых гранитов. Четвертичные отложения (Q) представлены песками, супесями, глинами, суглинками, галечниками, валунниками.

Хребет Кодар имеет высокогорный альпинотипный рельеф. Основой рельефа создан нивально-экзарационными процессами, приведшими к образованию скульптурных и аккумулятивных гляциальных форм. Глубина расчленения рельефа достигает 1500–1670 м. Центральная часть хребта подвержена современному оледенению. Геологическое строение района отличается большой сложностью, что определяется распространением разновозрастных комплексов горных пород с преобладанием докембрийских.

Четвертичные отложения (Q) представлены песками, супесями, глинами, суглинками, галечниками, валунниками. На склонах гор и их водоразделах сплошным

чехлом залегают элювиальные и делювиальные отложения. В гольцовых зонах развиты осыпи и курумы.

Баджальский хребет имеет среднегорный альпинотипный рельеф. Как и в случае с хребтом Кодар, основные черты рельефа созданы нивально-экзарационными процессами. Глубина расчленения достигает 800-1200 м. В геологическом строении территории, основные горные породы представлены: гранитоидами, порфиридные гранитами и гранит-порфирами мелового возраста (К). Так же, как и в Кодарском хребте, четвертичные отложения (Q) представлены песками, супесями, глинами, суглинками, галечниками, валунниками. На склонах гор и их водоразделах сплошным чехлом залегают элювиальные и делювиальные отложения. В гольцовых зонах развиты осыпи и курумы.

В ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН (г. Иркутск, Россия) были выполнены просмотр и описание образцов с нарушенной структурой, отложения представленных различными дисперсными разновидностями, отобранными в руслах селевых водотоков, на селевых террасах конусов выноса: Чукотское нагорье – 5 обр. (Хребет Искатень 3 обр., Анойский хребет – 2 обр.), Хребет Кодар – 5 обр., Баджальский хребет – 3 обр.

По стандартным методикам определены гранулометрический состав [5] (рассев и метод пипетки), минералогический состав образцов был определен методом порошковой дифракции на рентгеновском дифрактометре «ДРОН – 3.0» [8]. Для песчаного заполнителя из селевых отложений определялись: плотность минеральной части грунта (плотность частиц грунта, масса грунта в единице объема без учета его природной влажности и пористости (ГОСТ 30416-2020, 2021)), плотности при рыхлом и плотном сложении (метод цилиндра) [5], углы естественного откоса на воздухе и под водой, коэффициент фильтрации (ГОСТ 30416-2020, 2021) и седиментационный объем. Получены данные по составу водорастворимых солей, общему содержанию карбонатов, содержание подвижных форм оксида алюминия и кремния по методикам [6, 9].

Результаты и выводы

Свойства селевых отложений. При сравнительном анализе физических свойств отложений селевых потоков горных регионов Восточной Сибири, Хабаровского края и Чукотки можно сказать следующее (Табл.).

Значения плотности минеральной части (ρ_s) песчаного заполнителя образцов Чукотского нагорья и Баджальского хр. оказались почти одинаковыми 2,74–2,86 г/см³ и, вероятно, связаны со значительным количеством солей железа в песчано-глинистом заполнителе и тяжелой минеральной фракции, в то время как значения плотности минеральной части образцов бассейна р. Чары – 2,65–2,69 г/см³ (видимо, тяжелых минералов здесь мало).

Степень увеличения плотности отложений при уплотнении для чукотских образцов изменяется 0,13–0,19 г/см³, для части образцов Бассейна Чары 0,10–0,11 г/см³ и Урми – 0,06–0,08 г/см³. Песчаный заполнитель селевых отложений также обладает признаками плавунности – угол естественного откоса под водой снижается на 11–13° для бассейна Чары и 6–9° – для бассейна Урми, и 7–12° для образцов Чукотки, структурная связность отсутствует (седиментационный объем < 3,3 см³, кроме образцов I-Чукотки и Урми 1). Образцы имеют и неоднородный коэффициент фильтрации (12,7–44,3 м/сут), степень уменьшения угла откоса под водой ($\Delta\phi$) снижается на 6–13,0°, что способствует плавунности грунтов при водонасыщении и вовлечению этого материала в твердую составляющую селевого потока.

Табл. Показатели физических свойств селевых отложений

№ образца	ρ_{\min}	ρ_{\max}	$\Delta \rho$	φ_1	φ_2	$\Delta \varphi$	K_{ϕ}	V	ρ_s
Чукотка, Хребет Искатень, Анюйский хребет									
I – конус выноса склон. селя, выс. 1020 м, slQ ₄ cr	1,24	1,41	0,17	36	24	12	31,6	3,6	2,82
II – конуса выноса селя, русло ручья, выс. 880 м, slQ ₄ cr- ps	1,31	1,44	0,13	37,5	26	11,5	27,7	2,9	2,86
III – конуса выноса селя, русло ручья, выс. 790 м, slQ ₄ - cr- ps	1,32	1,49	0,17	33	26	7	н/о	2,9	2,74
IV – селевые отл., среднее течение р. Эрвыкыннотвеем, slQ ₄ - cr- ps	1,45	1,59	0,14	34,5	24	10,5	44,3	2,9	2,84
V – селевые отл., среднее течение р. Эрвыкыннотвеем, приустьевая часть slQ ₄ - cr- ps	1,36	1,55	0,19	34,5	23	11,5	н/о	2,8	2,84
Бассейн р. Урми, Баджалский хребет (ограниченная выборка)									
Урми 1 – зона транзита селевого потока, slQ ₄ cr	1,37	1,45	0,08	34	27	7	36,9	3,2	2,82
Урми 2 – конус выноса селевого потока, slQ ₄ cr	1,40	1,46	0,06	31	25	6	24,6	2,8	2,82
Бассейн р. Чара, Кодарский хребет (ограниченная выборка)									
1б- селевые отл., ниже уступа поймы р. Быйики slQ ₄ -ps	1,43	1,53	0,10	34	21	13	12,7	1,9	2,65
1в – селевые отл., на высоте 1,4 м от уреза воды, р. Быйики slQ ₄ cr	1,44	1,55	0,11	35	24	11	-	2,4	2,69

Примечание, ρ_{\min} , ρ_{\max} – плотность песка рыхлого и плотного сложения, г/см³; $\Delta \rho$ – степень увеличение плотности при уплотнении; φ_1 , φ_2 – углы естественного откоса на воздухе и под водой; $\Delta \varphi$ – степень уменьшения угла под водой; K_{ϕ} – коэффициент фильтрации, м/сут; V – седиментационный объем, см³; ρ_s – плотность минеральной части, г/см³.

Данные по рассеву образцов Чукотского нагорья не позволяют выделить значимые различия между образцами, в них присутствуют все фракции, отмечается значительное количество материала с размерностью <1,0 мм, из материала этой размерности формируется селевая суспензия [2]. Материал с размерностью <0,5 мм, может иметь агрегированные частицы, в состав которых входят глинистые минералы. Гранулометрический анализ этой фракции методом пипетки показал, что при агрегатном способе пробоподготовки, образцы селевого заполнителя представлены песчаным материалом, в котором преобладают крупно-среднепесчаная и мелко-тонкопесчаная фракции, пылеватые частицы присутствуют в значительно меньшем количестве, а глинистые в незначительном. Однако, при дисперсном способе подготовки образцов к анализу, с полным разрушением агрегатов при кипячении с пирофосфатом натрия, реальное содержание глинистых частиц увеличивается от 0,1 % до 9,4–11,4 % (Рис.).

Полученные данные говорят о нахождении глинистых частиц в составе агрегатов. Освобождение глинистой фракции происходит за счет уменьшения крупно-среднепесчаных и мелко-тонкопесчаных фракций (образец I, III, IV). Для образца II идет обогащение, как пылеватых, так и глинистых фракций за счет уменьшения количества крупно-среднепесчаных и мелко-тонкопесчаных фракций. В образце V

процент глинистых частиц увеличивается за счет уменьшения содержания крупно-среднепесчаной и мелкопылеватой фракции.

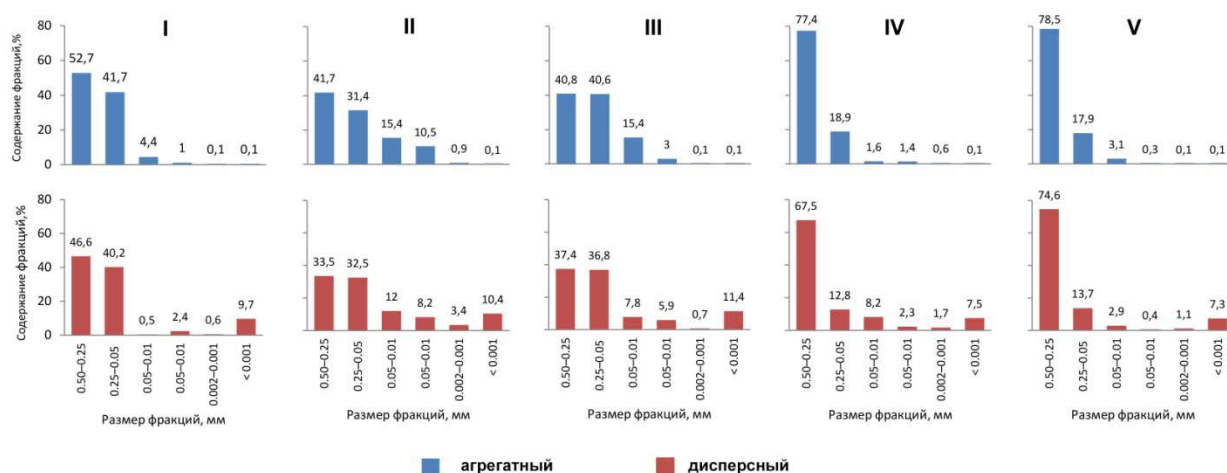


Рис. Чукотское нагорье, образцы (I-V). Результаты гранулометрического анализа фракции селевого заполнителя размерностью <0,5 мм – метод пипетки с двумя способами подготовки образца к анализу.

Минералогический анализ глинисто-песчаного заполнителя селевых отложений показал преобладание кварца (40–45 %), полевых шпатов (25–50 %), глинистых минералов (13–30 %) в составе породообразующих минералов, и присутствие небольшого количества кальцита и амфибола. Среди глинистых минералов в образцах выявлены смектит, гидрослюда, хлорит, каолинит и смешанослойные образования хлорит-смектит и гидрослюда-смектит.

По данным стандартной гранулометрии образец из конуса выноса селя Урми-2 (slQ4 ps, Баджальский хребет) представлен песком, в котором преобладают крупно-среднепесчаная (0,50–0,25 мм) и мелко-тонкопесчаная (0,25–0,05 мм) фракции, а пылеватые и глинистые частицы присутствуют в небольшом количестве. При дисперсной подготовке образцов к анализу с полным разрушением агрегатов песок «превратился» в суглинок, так как реальное содержание глинистых частиц составило 15,1–17,5 %.

Аналогичная ситуация отмечается для всех исследуемых образцов бассейна рек Урми и Быйики. Появление агрегатов в заполнителе селевых отложений является результатом постдиагенетических преобразований под воздействием криогенных процессов сезонного промерзания-оттаивания, с участием тонкоглинистой составляющей селевого материала, которая вместе с песчаными и пылеватыми частицами являлась продуктом транзита и аккумуляции селевого потока.

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Для изученных горных регионов Восточной Сибири, Хабаровского края и Чукотки с суровым резко континентальным климатом и районами распространения многолетнемерзлых пород свойственно развитие процессов облессования, при котором песчано-глинистые отложения различного генезиса (аллювий, делювий, пролювий и др.) под воздействием криогенных процессов (сезонное промерзание-оттаивание или многолетнее промерзание толщи) приобретают агрегированную микроструктуру, агрегаты при этом становятся хранилищем тонкоглинистой (< 0,001 мм), мелко-тонкопесчаной (0,25-0,05 мм) и мелкопылеватой (0,010-0,002) фракций, присутствие, которых способствует проявлению пльвинности водонасыщенных масс.

2. Частицы крупностью $< 0,5$ мм агрегированы и содержат скрытую глинистую компоненту. В составе глинистых минералов присутствуют смектит, гидрослюда и смешанно-слоистые минералы, имеющие возможность, в силу своих структурных особенностей, поглощать значительное количество воды активно участвовать в ионнообменных процессах и влиять на процессы набухания, усадки, проявление липкости. При этом меняется структура водного раствора, увеличивается доля взвеси и мути, раствор в этом случае получает форму суспензии, когда твердые частицы перемешаны с молекулами воды, селевой поток переходит в связное состояние.

3. Высвобождение глинистых частиц из агрегатов, по нашему мнению, происходит при турбулентном перемещении селевой массы, в ходе которого идет дробление части перемещаемых горных пород и их истирание. В этот процесс так же включаются породы на бортах и в русле, на которые оказывает воздействие движущийся сел. Это способствует разрушению агрегатов и появлению селевой суспензии, что подтверждается визуально при полевых работах.

Список литературы

1. Circumpolar Active Layer Monitoring.
<https://www2.gwu.edu/~calm/data/north.htm>.
2. Виноградов Ю.Б. Основные свойства селевой массы. Селевые потоки, Сб.3. под ред. Ю.Б. Виноградова. М., Гидрометеиздат, 1978, с.3-17.
3. Генсировский Ю. В., Лобкина В. А., Музыченко А. А., Музыченко Л. Е., Михалев М. В., Ухова Н. Н. Влияние климатических изменений на условия формирования селей в районах распространения многолетнемерзлых пород на примере Чукотки //Лед и снег, 2023. Т. 63. № 2, с. 271–282.
4. Генсировский Ю.В., Лобкина В.А., Музыченко Л.Е., Музыченко А.А., Михалев М.В., Степнова Ю.А. Условия формирования селей на Северо-Востоке России. Геориск. Т. XIV. № 3/2020, с. 68-76.
5. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология, Инженерная петрология. – Л.: Недра,1984, – 527 с.
6. Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород / Под ред. Е.М. Сергеева и др. М.: Изд-во МГУ. 1968. Т.2, 369 с.
7. Музыченко А.А., Генсировский Ю.В., Музыченко Л.Е. Распространение селевых процессов на территории Хабаровского края / Труды 6-й Международной конференции, Таджикистан). Т. 1. Душанбе: ООО «Промоушн». 2020, с. 491-497.
8. Ревенко А.Г. Физические и химические методы исследования горных пород и минералов в Аналитическом центре ИЗК СО РАН //Геодинамика и Тектонофизика. 2014. Т. 5(1), с. 101–114.
9. Рященко Т.Г. Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь). Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 2010 – 287 с.
10. Ухова Н.Н., Генсировский Ю.В., Казаков Н. А., Рященко Т.Г. Физико-химические свойства селевых отложений в различных горных районах России //Труды Третьей международной конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита», Южно-Сахалинск, 22-26 сентября 2014 г. с. 123-127.

Методика георадиолокационного исследования ледяного покрова различного строения на затороопасных участках северных рек

М.П. Фёдоров*, Л.Л. Федорова

*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск, Россия
mpfedoroff@gmail.com*

Аннотация. В работе представлена разработанная методика георадиолокационных исследований состояния ледяного покрова рек, включающая планирование маршрутов на участках работ, выбор оптимальных параметров полета воздушного судна и георадиолокационных измерений, оригинальный алгоритм обработки и интерпретации результатов измерений. Методика апробирована при изучении характеристик ледяного покрова р. Лена на затороопасных участках в районе сел Сырдах и Партизан в апреле 2023 г. По результатам исследований построена карта пространственного распределения толщины и строения ледяного покрова на исследуемых участках реки Лена.

Ключевые слова: толщина льда, строение льда, ледяной покров, река Лена, георадиолокация.

Method of GPR research of ice cover of different structure at flood-prone areas of northern rivers

M.P. Fedorov*, L.L. Fedorova

*Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia
mpfedoroff@gmail.com*

Abstract. The paper presents the developed method of GPR studies of the river ice cover condition, including route planning at the work sites, selection of optimal parameters of aircraft flight and GPR measurements, original algorithm of processing and interpretation of measurement results. The methodology was tested during the study of the Lena River ice cover characteristics in the flood-prone areas near the villages of Syrdakh and Partizan in April 2023. Based on the results of the research, a map of the spatial distribution of ice cover thickness and structure in the studied areas of the Lena River was constructed.

Keywords: ice thickness, ice structure, ice cover, Lena River, ground penetrating radar (GPR).

Введение

Образование и разрушение ледяного покрова на северных реках приводят к возникновению опасных ледовых явлений, часть которых может вызвать чрезвычайные ситуации, угрожающих безопасности населения и хозяйственной деятельности предприятий, расположенных вблизи рек. Отметим, что организованные систематические наблюдения требуют большой трудоемкости наземных наблюдений в сложных погодных условиях. Масштабность исследований, ограниченность наземных наблюдений и высокая опасность проведения полевых работ в весенний период

приводит к необходимости поиска дистанционного инструмента для получения информации о состоянии ледяного покрова северных рек.

Обзор трудов российских и зарубежных исследователей [1-4] свидетельствуют об успешном решении методом георадиолокации следующих задач – мониторинга толщины ледовой переправы, определения толщины льда при инженерно-исследовательских работах. Также в работах отмечено, что в исследованиях недостаточно изучается вопрос определения строения ледяного покрова. При этом оценка строения льда на затороопасных участках реки позволяет скорректировать расчёты сроков вскрытия рек.

Метод исследований

Разработанная и применяемая нами методика георадиолокационных исследований состояния ледяного покрова рек включает в себя планирование маршрутов на участках исследований, выбор оптимальных параметров полета воздушного судна и георадиолокационных измерений, применение алгоритма обработки и интерпретации полученных результатов измерений.

Планирование маршрута исследований на масштабных участках осуществляется с помощью спутниковых снимков Sentinel-2, полученных в период замерзания реки, на которых хорошо прослеживаются незамерзшее основное русло реки и осушенные прирусловые отмели. До полетов модернизированный антенный блок АБ-400 крепится на самолёте EuroStar SLW – к днищу фюзеляжа при помощи стальных стяжек, которые фиксируются за стойки шасси. Управление работой георадара «ОКО-2», ввод оптимальных параметров измерений, визуализация процесса измерений, запись полевых материалов осуществляется в программе «GeoScan32» (группа компаний «Логис-Геотех»).

Следование по запланированному маршруту осуществляется при помощи бортового GPS-навигатора. Привязка данных георадиолокации в процессе измерений по маршруту выполняется GPS-приёмником георадара. Рекомендуемая скорость и высота полёта самолёта при исследовании ледяного покрова составляет 100-150 км/ч и 20-30 м, соответственно. Указанные летные параметры основаны на требованиях безопасности полёта самолёта и экономии топлива при выполнении исследований.

Для обработки и интерпретации данных георадиолокации предложен алгоритм, позволяющий производить оценку толщины и различного строения ледяного покрова рек, и включающий в себя 4 этапа [5]. На первом этапе при обработке полевых данных в программе «GeoScan32» производится повышение качества отображения георадиолокационных сигналов, отраженных от границ льда, с помощью следующих процедур: редактирование радарограмм (удаление трасс-радиопомех, реверсирование); вычитание среднего значения для удаления сигнала прямого прохождения, который не несет полезной информации; восстановление разрешения искаженных осей синфазности отраженных волн от границ ледяного покрова с помощью модуля «Пиковая деконволюция»; привязка данных георадиолокации к данным GPS-приёмника.

На втором этапе выполняется визуальный анализ структуры волновой картины на радарограммах с применением установленных георадиолокационных моделей основных типов строения ледяного покрова рек: береговой лёд; монолитный лёд; торосовый лёд; ледяной покров, на поверхности которого вода; наледный лёд; шуговой лёд. Эти модели были разработаны по результатам компьютерного моделирования и экспериментальных георадиолокационных исследований [5]. В процессе анализа выполняются следующие действия: на радарограмме оценивается конфигурация (фрагментность, симметричность/асимметричность, субгоризонтальность, нарушенность) и фазовая корреляция осей синфазности отраженных и

дифрагированных волн в соответствии с типом строения льда; по амплитудной выраженности и смене фазы сигналов, отраженных от границ ледяного покрова, оценивается наличие воды подо льдом и контакта льда с мерзлым аллювием (дном).

На третьем этапе обработка радарограмм представляет собой процесс выделения максимальных значений амплитуд с учетом фазы сигналов, отраженных от границ льда с помощью модуля «Слои на профиле» в программе «GeoScan32». При сложном характере осей синфазности отраженных сигналов от торосового льда данная операция осуществляется в ручном режиме. Полуавтоматическое выделение применяется в случае прослеживания относительно прямолинейных осей синфазности отраженных волн от границ монолитного льда. В выделенном слое ледяного покрова осуществляется ввод диэлектрической проницаемости льда $\epsilon' = 3.2$ для корректировки шкалы толщины льда. Также модуль включает опцию выпрямления волнообразной формы верхней границы ледяного покрова на радарограммах, возникающей вследствие изменения высоты полета воздушного судна. Результат обработки интерпретированных радарограмм – текстовый файл, содержащий информацию о толщине и строении льда с географической привязкой.

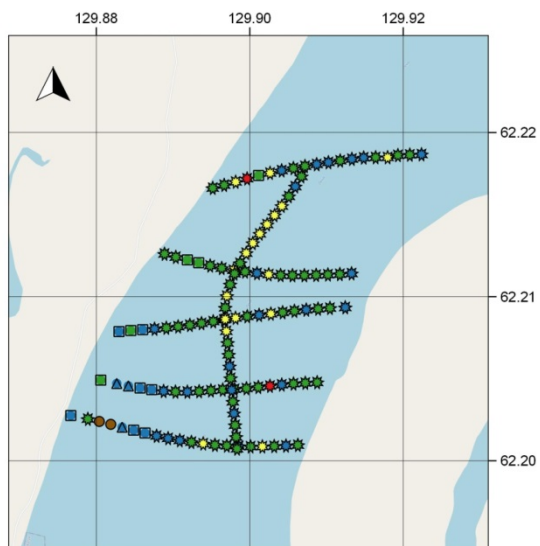
Визуализация текстовых данных георадиолокации осуществляется в геоинформационной системе QGIS, которая позволяет отображать, редактировать данные, управлять ими, а также создавать информационные продукты. По данным георадиолокации создается карта с маршрутом георадиолокационных исследований в геоинформационной системе QGIS с отображением цветовой шкалы толщин льда и строения ледяного покрова различными символами.

Результаты и выводы

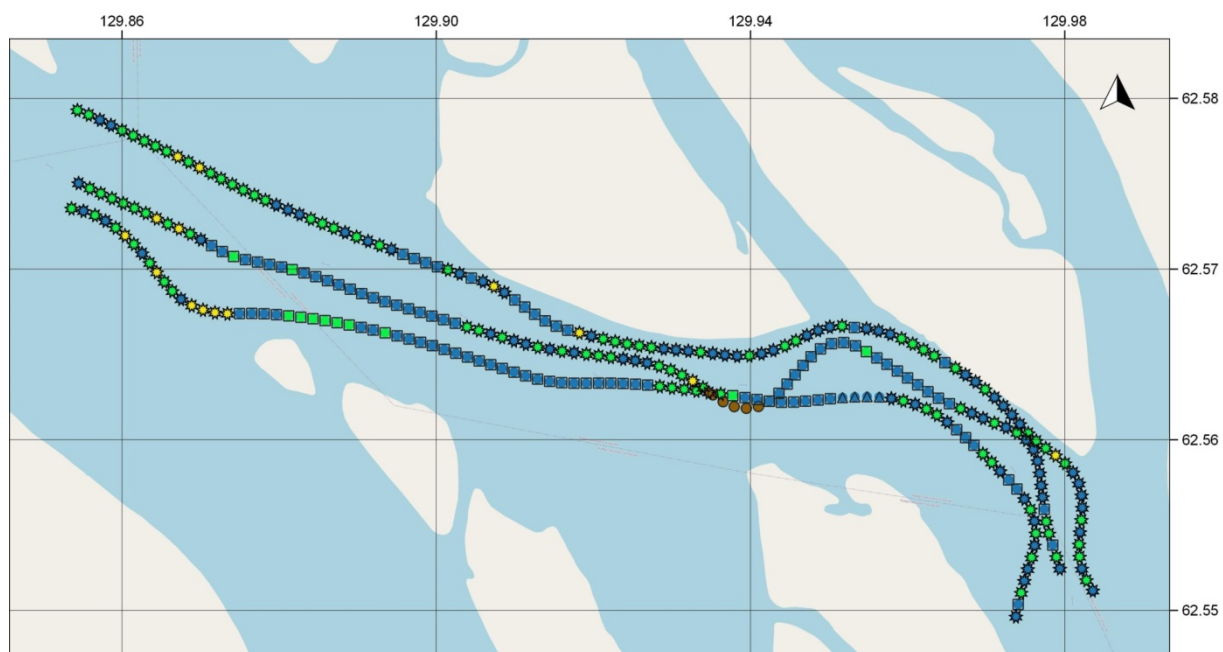
Изложенная методика проведения натуральных исследований применялась при изучении характеристик ледяного покрова р. Лена на затороопасных участках в районе сел Сырдах и Партизан в апреле 2023 г. На широком участке 1 в районе села Сырдах выполнены исследования по поперечным маршрутам. В районе села Партизан на узком участке 2 исследования выполнены по продольным маршрутам. Разработанный алгоритм обработки и интерпретации данных георадиолокации [6] позволил представить полученные результаты полевых исследований в виде карт (Рис.). На рисунке представлены данные георадиолокации с шагом 80 м для лучшей визуализации значительной пространственной изменчивости толщины и строения льда. На участке 1 преобладает ледяной покров толщиной 100-150 см. На участке 2 преобладает ледяной покров толщиной 50-100 см. Также на рисунке локализованы массивы ледяного покрова повышенной толщины в пределах 150-250 см. На исследуемых участках выделены три типа строения ледяного покрова – монолитный, береговой и торосовый лёд. Пространственное распределение установленных типов строения льда вдоль георадиолокационных маршрутов отображены на картах в виде символов. В основном на этих участках распространён торосовый лёд.

Разработанная методика георадиолокационных исследований состояния ледяного покрова рек, включающая непрерывное профилирование протяженных и площадных участков исследований с географической привязкой с помощью системы спутникового позиционирования, позволяет получить оперативную информацию о характеристиках льда. Предложенный алгоритм обработки и интерпретации данных георадиолокации, полученных с борта воздушного судна, позволяет определить толщину и строение ледяного покрова рек.

Информация о толщине и строении ледяного покрова может быть использована при планировании превентивных мероприятий по разрушению толстых льдов с целью безопасного пропуска весеннего половодья. Также на основе полученной информации можно уточнить краткосрочный прогноз вскрытия рек на затороопасных участках.



а)



б)

Условные обозначения:

Тип строения льда: □ - монолитный лёд * - торосовый лёд △ - береговой лёд

Толщина льда: ● - 0 см (остров) ■ - 50 - 100 см ■ - 100 - 150 см ■ - 150 - 200 см ■ - 200 - 250 см

Рис. Карта распределения толщины и строения льда в районе сел Сырдах (а) и Партизан (б) по данным георадиолокации, полученных в апреле 2023 г.

Благодарности

«Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-27-00751, <https://rscf.ru/project/22-27-00751/>». Полевые исследования проводились на оборудовании ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант №13.ЦКП.21.0016).

Acknowledgments

“This work has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF 22-27-00751, <https://rscf.ru/project/22-27-00751/>”. The field studies were carried out using the equipment of the Shared core facilities of the Federal Research Center ‘YSC SB RAS’ (grant No. 13.SCF.21.0016).

Список литературы

1. Ермаков А.П., Старовойтов А.В., Владов М.Л. Георадиолокационные исследования верхней части разреза при проектировании сейсмических работ в зимнее время // Технологии сейсморазведки. 2012. № 2. С. 89–97.
2. Annan A.P., Diamanti N., Redman J.D., Jackson S.R. Ground-penetrating radar for assessing winter roads // Geophysics. 2016. 81. P. 101–109.
3. Kämäri M., Alho P., Colpaert A., Lotsari E. Spatial variation of river-ice thickness in a meandering river // Cold Regions Science and Technology. 2017. 137. P. 17–29.
4. Kemp J.E., Davies E.G.R., Loewen M.R. Spatial variability of ice thickness on stormwater retention ponds // Cold Regions Science and Technology. 2018. 159. P. 106–122.
5. Fedorov M.P., Fedorova L.L. Identification of River Ice Cover Structure by Ground Penetrating Radar Data // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2022. doi: 10.1109/LGRS.2022.3225560. Доступна online: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9966564>. Дата обращения: 20 мая 2023.
6. Фёдоров М.П., Федорова Л.Л. Исследование строения ледяного покрова на затороопасных участках р. Лена методом георадиолокации // Успехи современного естествознания. 2022. № 10. С.130–135.

Гидроэкологическое состояние озер национального парка «Русский Север» весной 2023 г.

И.В. Фёдорова^{1,2}, Л.В. Кузнецова³, М.Р. Кузнецова², А.В. Шорникова⁴, А.Е. Оразалин²,
У.В. Гусельникова⁵, С.С. Свирепов², А.А. Землянскова², П.С. Зеленковский²

¹*Институт ботаники им. А.Л. Тахтаджяна Национальной академии наук Республики Армения, г. Ереван, Республика Армения*

²*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия*

³*Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение "Национальный парк "Русский Север", г. Вологда, Россия*

⁴*ГУП Водоканал, г. Санкт-Петербург, Россия*

⁵*Общество с ограниченной ответственностью «Экопромсервис», г. Санкт-Петербург, Россия
i.fedorova@botany.am, umnichka@mail.ru*

Аннотация. В рамках проекта Экологической клиники СПбГУ весной 2023 года было выполнено гидроэкологическое обследование озер национального парка «Русский Север». Изучались фоновые и антропогенно измененные озёра парка: Бородаевское, Ферапонтовское, Долгое, Аристово, Егорьевское, Сиверское, Покровское, Зауломское, Вазеринское. Анализ полученных результатов по гидрохимии и гидроэкологии озер указывает на эвтрофикацию водоемов на территории парка «Русский Север». Для озер Долгое, Вазеринское, Зауломское обнаружено превышение ПДК по значению перманганатной окисляемости в поверхностном слое, и в придонном слое Бородаевского и Сиверского. В Вазеринском озере загрязнение воды и донных отложений сопровождается зимним замором рыбы. Поверхностные воды озер Бородаевское и Ферапонтовское испытывают антропогенную нагрузку, но по концентрациям биогенных элементов больше других приближены к эталонным показателям хозяйственно-питьевого водоснабжения. Наиболее загрязненным можно назвать оз. Долгое, расположенное в г. Кириллове и испытывающее сильнейшее антропогенное воздействие.

Ключевые слова: национальный парк «Русский Север», озера, ООПТ, гидроэкологический статус, гидрохимия, загрязнение.

Hydroecological state of lakes of the National Park “Russian North” in spring 2023

I.V. Fedorova^{1,2}, L.V. Kuznetsova³, M. P.Kuznetsova², A.V.Shornikova⁴, A.E. Orazalin², U.B.Guselnikova⁵, C.C. Svirepov², A.A. Zemlyanskova², P. S.Zelenkovskii²

¹*A.L. Takhtadzhyan Institute of Botany of the National Academy of Sciences of the Republic of Armenia, Yerevan, the Republic of Armenia*

²*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

³*Federal State Budgetary Institution "Russian North National Park," Vologda, Russia*

⁴*State Unitary Enterprise “Vodokanal”, St. Petersburg, Russia*

⁵*Limited Liability Company “Ecopromservice”, Saint Petersburg, Russia
i.fedorova@botany.am, umnichka@mail.ru*

Abstract. As part of the project of the Ecological Clinic of St. Petersburg State University, the hydroecological studies of the lakes of the Russian North National Park was carried out in spring 2023. The background and anthropogenic changed lakes of the park were

studied: Borodaevskoye, Ferapontovskoye, Dolgoe, Aristovo, Yegoryevskoye, Siverskoye, Pokrovskoye, Zaulomskoye, Vazerinsky. Analysis of the obtained results on hydrochemistry and hydroecology of lakes indicates aquatic ecosystems eutrophication in the territory of the Russian North Park. Increase of the maximum permissible concentration in terms of the permanganate oxidation value was found in the surface layer for lakes Dolgoe, Vazerinskoye, Zaulomskoye; in the bottom layer of Borodaevskoye and Siverskoye. Pollution of water and bottom sediments is accompanied by winter fish fumes was obtained in Vazerinskoye Lake. The surface waters of the Borodaevskoye and Ferapontovskoye lakes experience an anthropogenic load, but in terms of concentrations of biogenic elements, they are closer to the reference indicators of domestic and drinking water supply. Located in Kirillov town Dolgoe lake can be called the most polluted, it is strongest anthropogenically impacted.

Keywords: national Park “Russian North”, lakes, protected natural objects, hydroecological state, hydrochemistry, pollution.

Введение

В Национальном парке на площади 166.4 тыс. га расположено множество монастырей Русского Севера: Кирилло-Белозерский, Горицкий и Ферапонтов, а также Нило-Сорская пустынь. Всего зарегистрировано 72 памятника истории, архитектуры и инженерного искусства, некоторые из которых включены в список объектов Всемирного наследия ЮНЕСКО. Одной из задач национального парка является охрана уникального природного комплекса Вологодского Поозерья, на территории которого находится множество озер различного генезиса. Всего насчитывается 101 озеро, площадь которых в основном небольшая [1]. На территории Вологодской области в 1828 г. был открыт искусственный судоходный водный путь – Северо-Двинская гидротехническая система, соединяющая реки Шексна и Сухона и включающую изученные в рамках проекта озера Сиверское, Покровское, Зауломское, Вазеринское. В результате строительства инженерного сооружения был изменен гидрологический режим водных объектов, произошло повышение уровня в озерах и реках, а также подтопление и заболачивание прилегающих территорий [2].

В течение 1986-2006 гг. изучалось 16 озер национального парка. Хорошо исследована гидрофильная флора и растительность большинства озер. На водоемах Вологодскоо Поозерья отмечено 37 ассоциаций, относящимся к классам Lemnetaea (5 ассоциаций), Potametea (14), Phragmitetea (16), Lobelitea (1) и Charetea (1) [3]. Озера в течение долгого времени изучались гидробиологами [4; 5; 6] и др. Был обнаружен реликтовый вид ракообразных, сохранившийся в водоёмах Вологодской области, - *Limnocalanus macrurus* Sars, 1863 [6].

Большинство водоемов Поозерья можно отнести к мезотрофно мезогумозным водоемам транзитно-аккумулятивного типа [7]. Средняя глубина озер составляет менее 5 м, что способствует их интенсивному зарастанию. Работниками парка давно отмечены заморные явления в зимний период, для чего уже организовано ежемесячное измерение растворенного кислорода в озерах.

Представлены результаты работ проекта Экологической клиники СПбГУ весной 2023 года, основной целью которого было получение комплексной гидролого-гидрохимической характеристики озер национального парка «Русский Север» весной 2023 года в конце подледного периода для дальнейшей организации геоэкологического мониторинга.

Материалы и методы

В рамках проекта Экологической клиники СПбГУ 15-19 марта 2023 г. проводились обследования 9 озёр парка: Бородаевское, Ферапонтовское, Долгое, Аристово, Егорьевское, Сиверское, Покровское, Зауломское, Вазеринское. Были выбраны как фоновые водоемы, так и озера с выраженным антропогенным

воздействием. Работы проводились со льда на различном удалении от берега в конце зимнего периода, что позволяет в полной мере говорить о гидроэкологическом состоянии озер. В комплекс работ были включены измерения толщины льда, глубины озера, температуры воды, электропроводности (ЭП), pH, содержания растворенного кислорода (O_2) и углекислого газа (CO_2), анализ концентраций биогенных элементов, перманганатной окисляемости (ПО), отбор проб воды для последующего определения изотопного состава вод, содержания окрашенного растворенного вещества и состава зоопланктонного сообщества, отбор колонок донных озерных отложений для дальнейшего геохимического и палеоэкологического анализов.

Точки отбора проб в большинстве случаев были приурочены к участкам расположения точек мониторинга содержания растворенного кислорода в воде, проводимого Национальным парком. Мониторинг выполняется преимущественно в прибрежных зонах, поэтому были выбраны дополнительные точки для отбора проб – по направлению к центру акваторий. На озёрах Бородаевское и Ферапонтовское гидрохимические наблюдения парком не проводятся; точки отбора проб были назначены с учётом конфигурации акватории – в западной, центральной, восточной частях. Бурение льда в точках отбора проб осуществлялось с помощью ручного механического ледового бура. Толщина льда и высота снега на льду измерялись ледомерной крючковой рейкой.

Для гидрохимических измерений использовались портативный кондуктометр «Эксперт-002», pH-метр ST10C-A Ohaus. Для определения содержания растворенного кислорода применялось два метода: портативными приборами «Эксперт-009-1» и оксиметром STARTER 400D фирмы Ohaus, а также йодометрический метод Винклера. Концентрация углекислого газа выполнялась титрованием, перманганатная окисляемость - методом Кубеля. Содержание биогенных элементов в воде отобранных из озер проб проводилась в тот же день при помощи фотометра «Эксперт-003».

Результаты и выводы

Озёра, выбранные в качестве объектов проведения геоэкологических работ, относятся к Бородаевской и Сиверской группам. Озера Бородаевской группы имеют древние долины, межхолмные понижения. Их берега в основном высокие и крутые, изрезаны заливами, дно неровное. Озера Сиверской группы различны по гидробиологическим характеристикам, так площадь зеркала некоторых водных объектов покрыто высшей водной растительностью, а другие - мало зарастают макрофитами.

Глубина озер в местах отбора проб составляла от 1,5 м (оз. Долгое) до 26 м (оз. Сиверское). Средняя мощность льда составляет 0,5 м на всех озёрах, при минимальном 0,4 м (Ферапонтовское озеро) и максимальном 0,65 м (Зауломское озеро). На всех озерах отмечена обратная термическая стратификация.

Удельная электрическая проводимость (далее ЭП) изменялась от 8 до 613 мкСм/см при температуре воды 0,5-2°C. По значению ЭП к ультрапресным можно отнести озера Ферапонтовское, Бородаевское, Сиверское, Егорьевское. Наибольшие средние на вертикалях величины электропроводности зафиксированы на озере Долгое и составляли 420 мкСм/см и 448 мкСм/см соответственно (при пересчете температурного коэффициента ТК: 751 мкСм/см и 828 мкСм/см соответственно). На озере Покровское средняя по вертикали электропроводность составляла 248 мкСм/см (при ТК: 461 мкСм/см), чуть меньше ЭП была на озере Аристово – 240 мкСм/см (при ТК: 427 мкСм/см). На остальных водоёмах средние по вертикали значения электропроводности находятся в пределах 173-204 мкСм/см (324-380 мкСм/см). Наименьшая величина определена для вертикали озера Зауломское (166 мкСм/с, при ТК: 312 мкСм/см). Наибольшие величины электропроводности достигаются в придонных слоях, а наименьшие – в приповерхностном слое. Можно говорить об активных процессах поступления веществ из донных отложений в озеро. Исключением является точка на

озеро Долгое, где максимальная электропроводность зафиксирована в поверхностной толще воды (при глубине на вертикали 2.5 м), что, скорее всего, свидетельствует о наличии поверхностных источников загрязнений. Однородным распределением электропроводности, не имеющем выраженного увеличения по глубине, отличаются водоёмы Ферапонтовское, Бородаевское, Сиверское, Егорьевское. Наибольшее различие электропроводности в приповерхностных и придонных слоях зафиксировано для озера Долгое.

Значения водородного показателя варьировали от 5,8 (Вазеринское) в приповерхностном слое до 8,7 (Сиверское) у дна. Наименьшими зафиксированными величинами рН можно считать 6.79-6.8 на озёрах Ферапонтовское и Сиверское. Среднее значение рН составляет 7.6. Значения выше 8.0 преобладают на водоёмах Сиверское и Долгое. Нужно отметить возможные завышенные значения рН в связи со спецификой прибора, который при измерениях в поле при низких температурах (измерения были проведены в конце зимнего периода) дает иногда более высокие показания.

Значение растворенного в воде кислорода является важным гидроэкологическим фактором особенно в конце подледного периода водоемов. Содержание растворённого кислорода в обследованных озёрах варьирует от 1.8 до 12.9 мг/л (от 13 до 89 %) согласно результатам титрования и от 1.1 до 14.9 мг/л (от 8 до 107 %) - при инструментальных измерениях. Среднее содержание составляет 7.5-7.6 мг/л или 53-57 %, что выше ПДК, установленных для рыбохозяйственных водоемов (ПДК растворенного в воде кислорода – 6 мг/л для ценных пород рыбы, 4 мг/л для остальных пород). Наибольшее содержание кислорода отмечается в озёрах Бородаевское, Ферапонтовское, Сиверское (более 8 мг/л) – это самые крупные и более глубоководные из обследованных озёр. Наименьшее содержание обнаружено в придонных слоях озёр Аристово (1.8 мг/л или 13 %) и Вазеринское (2.9 мг/л или 21 %), что показывает наличие анаэробных условий в подледный период. Это подтверждают также и органолептические показатели, - часто на этих озерах отмечался затхлый запах сероводорода. Для всех озёр сохраняется закономерность: содержание кислорода в поверхностном слое выше, чем на глубине.

На всех обследованных озёрах выявлено увеличение концентрации углекислого газа CO_2 с глубиной до 1,5-2.0 раз. Эта закономерность обратна распределению кислорода по глубине. Наибольший градиент зафиксирован на озере Аристово: концентрация углекислого газа в придонном слое превышает концентрацию приповерхностного слоя в 5,5 раз. Величина содержания углекислого газа у поверхности воды варьирует в пределах от 4,8 до 18,1 мг/л, а в придонных горизонтах – от 5,7 до 55,3 мг/л.

Для озер была определена перманганатная окисляемость (ПО) – показатель, определяющий присутствие органических (бензин, керосин, фенолы, пестициды и др.) и минеральных элементов (соли Fe^{2+} , нитриты, сероводород). Она зависит от количества миллиграммов кислорода, необходимого для окисления 1 литра водного раствора, поэтому чем интенсивнее жидкость загрязнена сточными сливами, тем выше показатель окисления [8]. Согласно нормативу качества по СанПин 2.1.4107401 показатель не должен превышать более 5,0 мгО/л для вод питьевого водоснабжения, для вод рыбохозяйственного назначения данный показатель установлен Приказом Минсельхоза РФ № 552, ПДК не должна превышать 40 мгО/л. Величина перманганатной окисляемости в поверхностном слое воды (глубина 0,5 м) для изученных озер изменялась от 4 до 152 мгО/л, вода озер относятся к категории предельно чистой до категории грязная. Отмечается превышение значений величины ПО на поверхности оз. Долгое, оз. Вазеринское, оз. Зауломское. В придонном слое воды ПО изменялась от 4 до 204 мгО/л - от предельно чистой до категории грязной. Наибольшее превышение ПДК отмечены для озер Вазеринское, Покровское, Бородаевское и Сиверское. Стоит отметить, что самые

высокие значения отмечаются на оз. Вазеринском (Рис), где в последнее время начал происходить ежегодный процесс замора рыбы. Весной 2023 н. на оз. Вазеринское с уменьшением глубины на 0,5 м был отмечен резкий скачок величины ПО на 96 мгО/л. Такое внезапное повышение окисляемости воды может служить признаком точечного загрязнения бытовыми стоками: источником может служить деревня Вазеринцы, расположенная вдоль северо-западной части озера.

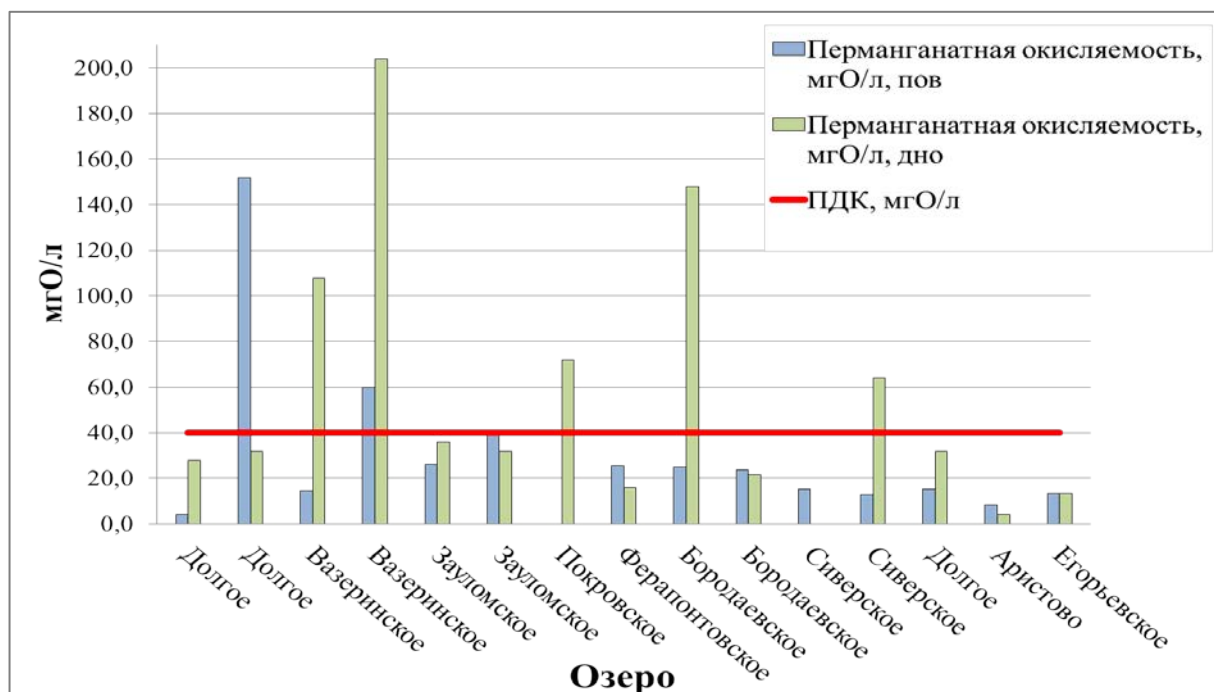


Рис. Значения перманганатной окисляемости мгО/л в поверхностном (глубина 0,5 м) и в придонном слоях воды озер в сравнении с показателем ПДК для объектов рыбохозяйственного значения.

Величина содержания углекислого газа у поверхности воды варьирует в пределах от 4,8 до 55,3 мг/л. Для озёр Аристово и Вазеринское отмечено наличие анаэробных условий в подледный период.

Следует отметить низкий уровень концентрации биогенных элементов в озерах Бородаевское, Ферапонтовское и Аристово. Озеро Аристово испытывает наименьшую антропогенную нагрузку в силу своего отдаления от селитебных территорий. В воде озера Долгое наблюдаются превышения предельно допустимых концентраций фосфатов, от 1,8 до 14,2 ПДК по нормативам вод рыбохозяйственного значения. Воды озера Вазеринское также имеют превышения по концентрациям биогенных элементов: повышенный уровень содержания фосфатов варьируются от 1,8 ПДК до 5,8 ПДК по нормативам вод рыбохозяйственного назначения; превышение в 5,69 раз выше ПДК содержания аммония по рыбохозяйственному нормативу и до 1,49 по нормативу питьевого водопользования. Поверхностные воды озера Зауломское по показателям концентраций наблюдаемых биогенных элементов полностью отвечают требованиям вод хозяйственно-питьевого водоснабжения, но, в тоже время, наблюдаются превышения фосфатов по рыбохозяйственному нормативу до 1,45 ПДК, аммония - до 3,58 ПДК. В воде озера Покровское есть превышения предельно допустимых концентраций по фосфатам до 10,6 ПДК и по аммоний до 5,02 ПДК согласно рыбохозяйственному нормативу и 1,26 ПДК - по хозяйственно-питьевому. Озера Бородаевское и Ферапонтовское отвечают нормативам хозяйственно-питьевого водоснабжения, однако есть превышения фосфатов до 1,5 ПДК, а по аммоний до 2,04 рыбохозяйственных ПДК. Озеро Сиверское имеет повышенные концентрации фосфатов до 3 ПДК и по аммоний - до 2,9 ПДК. В тоже время озеро соответствует требованиям вод хозяйственно-питьевого водоснабжения. В

поверхностных слоях озера Егорьевское наблюдалась повышенная концентрация нитритов – 1,05 ПДК, фосфатов – 1,95 ПДК и аммония – 1,38 ПДК. По нормативам хозяйственно-питьевого назначения в водах изучаемого озера превышения отсутствуют.

Анализ полученных результатов указывает на эвтрофикацию водоемов национального парка «Русский Север». Низкое содержание нитритов может быть обусловлено тем, что эти соединения быстро окисляются до нитратов или используются биологическими организмами в процессе дыхания. Однако высокие уровни аммония и фосфатов могут привести к развитию водной растительности и последующей гибели гидробионтов из-за нехватки кислорода, что вызовет деградацию экосистемы водоемов, а также может создать проблемы водопотребления для местных жителей.

Список литературы

1. <https://russever.region35.ru/professional/patrolling/general-info>
2. Электронный ресурс национального парка «Русский Север» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://russever.region35.ru/professional/patrolling/general-info> (дата обращения: 30.03.2023).
3. Кузьмичев А.И., Краснова А.Н., Кузнецова Л.В. Типологическая структура гидрофильной флоры и растительности техногенно-трансформированных озер Вологодского Поозерья. Биология внутренних вод. 2008. №4, с.54-62
4. Ривьер И. К. ОСОБЕННОСТИ ПЛАНКТОЦЕНОЗОВ ОЗЕР В РАЗНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПЕРИОДЫ (ПОДЛЕДНЫЙ И ОТКРЫТОЙ ВОДЫ). Труды ИБВВ РАН, вып. 74(77), 2016, с. 59
5. Жаков Л.А. Формирование и структура рыбного населения озер Северо-Запада СССР. М.: Наука, 1984. 144 с.
6. Лобуничева Е.В., Литвин А.И., Думнич Н.В., Борисов М.Я. РАСПРОСТРАНЕНИЕ LIMNOCALANUS MACRURUS SARS, 1863 (CENTROPAGIDAE, CALANIFORMES) В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ. Сборник тезисов научно-практической конференции «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ РАКООБРАЗНЫХ». Севастополь, 23-25 мая 2022.
7. «Озерные ресурсы Вологодской области». Под ред. А.А.Ляпкина. Вологодский государственный педагогический институт, 1981 г. 150 с.
8. ГОСТ 23268.12-78 Воды минеральные питьевые лечебные, лечебно-столовые и природные столовые. Метод определения перманганатной окисляемости.

Использование данных реанализа для восстановления характеристик стока таежных рек в бассейне Енисея

Е.В. Федотова^{1,2*}, И.В. Данилова^{1,2}, Т.А. Буренина¹

¹*Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия*

²*Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
elfed@ksc.krasn.ru*

Аннотация. Авторами данной работы предлагается при отсутствии наземных измерений на гидрологических постах или пропусках в рядах наблюдений использовать данные реанализа для восстановления характеристик стока. В работе проведено сравнение характеристик стока и согласованности его динамики по наблюдениям на гидропостах с данными реанализа ERA5-Land для семи рек Западной Сибири – левых притоков р. Енисей и тестовых водосборов в бассейне Подкаменной Тунгуски. Коэффициенты корреляции годового стока данных реанализа с фактическими данными составляют 0,57–0,95. Нормированная среднеквадратичная ошибка годового стока nRMSE данных реанализа лежит в интервале от 13% до 40%.

Ключевые слова: сток, водосбор, Сибирь, гидрографы, ERA5–Land, реанализ.

Using Reanalysis Data to Reconstruct the Characteristics of the Runoff of Taiga Rivers in the Yenisei Basin

E.V. Fedotova^{1,2}, I.V. Danilova^{1,2}, T.A. Burenina¹

¹*V.N. Sukachev Forest Institute of SB RAS - a separate subdivision of the FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia*

²*Siberian federal university, Krasnoyarsk, Russia
elfed@ksc.krasn.ru*

Abstract. In the absence of ground-based measurements at hydrological stations or gaps in observation series, the authors of this paper propose to use reanalysis data to restore runoff characteristics. Comparison of river flow values and correlations of runoff dynamics based on observations at hydrological stations with ERA5-Land reanalysis data for seven rivers of Western Siberia - left tributaries of the river Yenisei and test watersheds in the Podkamennaya Tunguska basin are shown in the paper. The correlation coefficients of the annual runoff of the reanalysis data with the actual data are 0.57–0.95. The normalized root-mean-square error of the annual runoff nRMSE of the reanalysis data lies in the range from 13% to 40%.

Keywords: runoff, watershed, Siberia, hydrographs, ERA5–Land, reanalysis

Введение

Для оценки и рационального использования водных ресурсов и мониторинга экологического состояния речных бассейнов необходимо иметь полные сведения о гидрологических характеристиках и режиме водных объектов. Фактические данные о гидрологических характеристиках и климатических показателях в основном получают со стационарных метеостанций и гидропостов. Но сеть метеостанций и постов в регионах Сибири очень редкая. На некоторых постах за прошедшие годы измерения расхода воды велись не регулярно, поэтому в рядах наблюдений присутствуют пропуски, которые не позволяют в полной мере проводить многолетние исследования.

Для восстановления рядов наблюдений за стоком рек и климатических показателей существует несколько способов [1; 2]. Авторы настоящей работы предлагают на примере нескольких сибирских рек рассмотреть возможность восстановления характеристик стока используя глобальные климатические и гидрологические базы данных. В этих базах данных на основе информации сети наземных наблюдений на метеостанциях, данных дистанционного зондирования и др., оцениваются параметры стока с разной степенью детальности в пространстве и времени. Преимущественно качественной характеристикой данных реанализа является их однородность, выровненность данных, достаточно длительный ряд данных.

Материалы и методы исследования

Для исследований были выбраны бассейны рек таежной зоны Сибири. Они находятся в Красноярском крае и охватывают бассейны Подкаменной Тунгуски и левых притоков Енисея: Турухан, Кас, Сым, Дубчес, Белая, Кемь, Елогуй. Левые притоки Енисея формируют свой сток в таежных районах Западно-Сибирской равнины. Территория водосборов равнинная, часто очень заболоченная. Исследуемые водосборы различаются по площади, лесистости и структуре растительного покрова.

Исследуемая часть бассейна Подкаменной Тунгуски простирается от истоков реки до д. Кузьмовка. Эта часть бассейна территориально находится в зоне средней тайги Средней Сибири. Значительная протяженность реки (1700 км) и ориентированность ее бассейна с юго-востока на северо-запад обуславливает разнообразие природных условий, что выражается в характеристиках суммарного увлажнения и представленности растительных сообществ. В бассейне Подкаменной Тунгуски вследствие значительной протяженности реки в широтном направлении были выделены тестовые водосборы, ограниченные гидрологическими постами (Табл). Площади выделенных водосборов бассейна Подкаменной Тунгуски рассчитывались на основе ЦМР SRTM с использованием функций гидрологического анализа в программе ArcGIS. Для притоков Енисея использовалась ЦМР MERIT Hydro и программа Whitebox GAT. Для каждого водосбора были рассчитаны основные топографические характеристики. Для всех выделенных водосборов были использованы фактические данные по расходам воды на гидропостах за все годы наблюдений. С помощью сервиса GoogleEarthEngine были извлечены среднемесячные значения стока из БД ERA5-Land Monthly Averaged (1981-2022 гг.) и ERA5-Land Monthly Aggregated (1958-1980).

Для последующей оценки различия значений и динамики стока был проведен статистический анализ, использовались относительная и нормированная среднеквадратичная ошибки. Ошибки рассчитывались по следующим формулам:

Относительная ошибка:

$$R = \frac{|x_{\text{пост}} - x_{\text{реанализ}}|}{x_{\text{пост}}} * 100$$

Где $x_{\text{пост}}$, $x_{\text{реанализ}}$ – значения стока по данным поста и данным реанализа соответственно.

Среднеквадратичная ошибка RMSE (Root Mean Square Error) и нормированная RMSE:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y^i - \hat{y}_i)^2}{n}}$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{(y_{max} - y_{min})}$$

где y_i , y_{max} , y_{min} – текущее среднемесячное значение стока, максимальный и минимальный сток за год по данным поста; \hat{y}_i – текущее среднемесячное значение стока данных реанализа.

Оценка сопоставимости динамики стока проводилась с использованием коэффициента корреляции Спирмена для рядов сезонного и годового стока фактических данных и данных реанализа.

Табл. Гидрографические и гидрологические характеристики исследуемых водосборов.

Река - пост	Площадь водосбора, км ²	Средняя высота водосбора, м.	Амплитуда высот водосбора, м	Средний годовой расход, м ³ /сек	Период наблюдений, годы
Левые притоки Енисея – Западная Сибирь					
Белая - Бельское	1395	195	134	6,2	1952-2018
Кемь-Михайловка	2837	220	181	2,9	1960-1990
Кас – Александровский шлюз	7277	52	107	51,5	1952 – 2018
Сым-факт. Сым	22947	196	137	195,7	1957-2018 с пропуском 1994-2004 г
Дубчес – Сандакчес	8600	91	222	90,8	1965 – 2018
Елогуй – Келлог	15976	164	95	163,8	1960 – 2018
Турухан – факт. Янов Стан	10141	111	170	111,1	1941-2016
Бассейн Подкаменной Тунгуски – Средняя Сибирь					
Исток -Чемдальск	16709	480	642	104	1962-1995
Чемдальск –Усть-Камо	55986	375	569	250	1963-1994
Усть-Камо - Байкит	91036	422	686	664	1962-1995
Байкит-Кузьмовка	59165	412	1023	588	1939-2018

Результаты и выводы

Проведенный анализ согласованности динамики годового стока по данным наземных наблюдений для всех изучаемых рек с данными реанализа показал наличие для большинства водосборных территорий достоверных корреляционных связей. На Рис. 1-2 представлена динамика годового стока в БД реанализа для каждого бассейна в сравнении с фактическим годовым стоком.

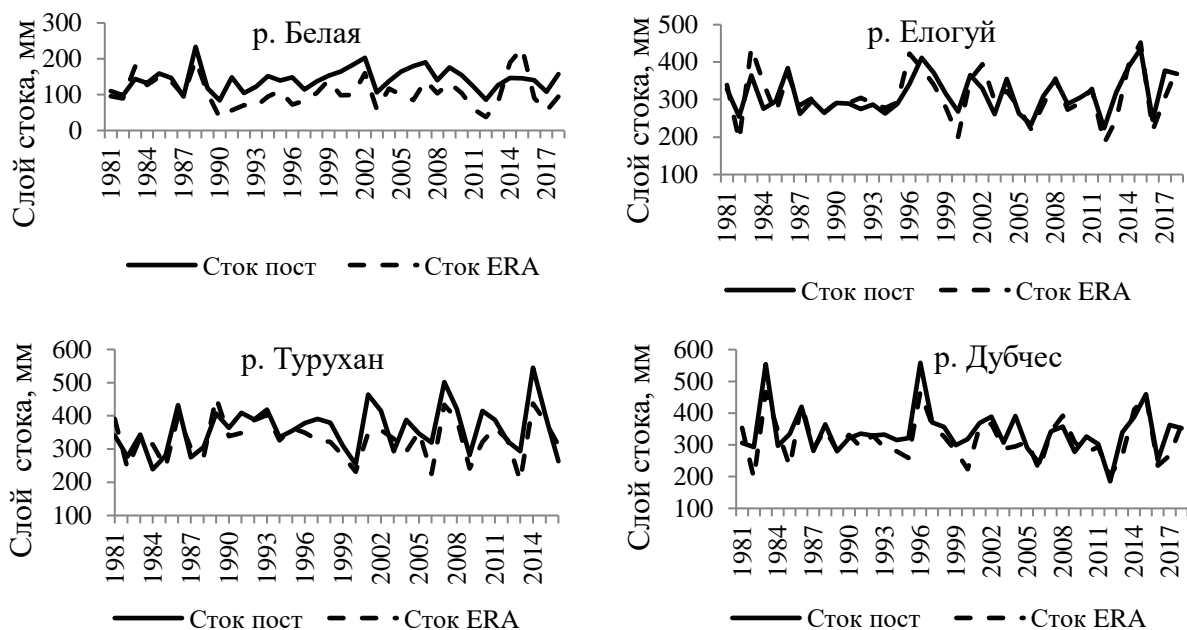


Рис. 1 Модельные и фактические гидрографы рек Белая, Турухан, Елогуй, Дубчес, формирующих сток в Западной Сибири.

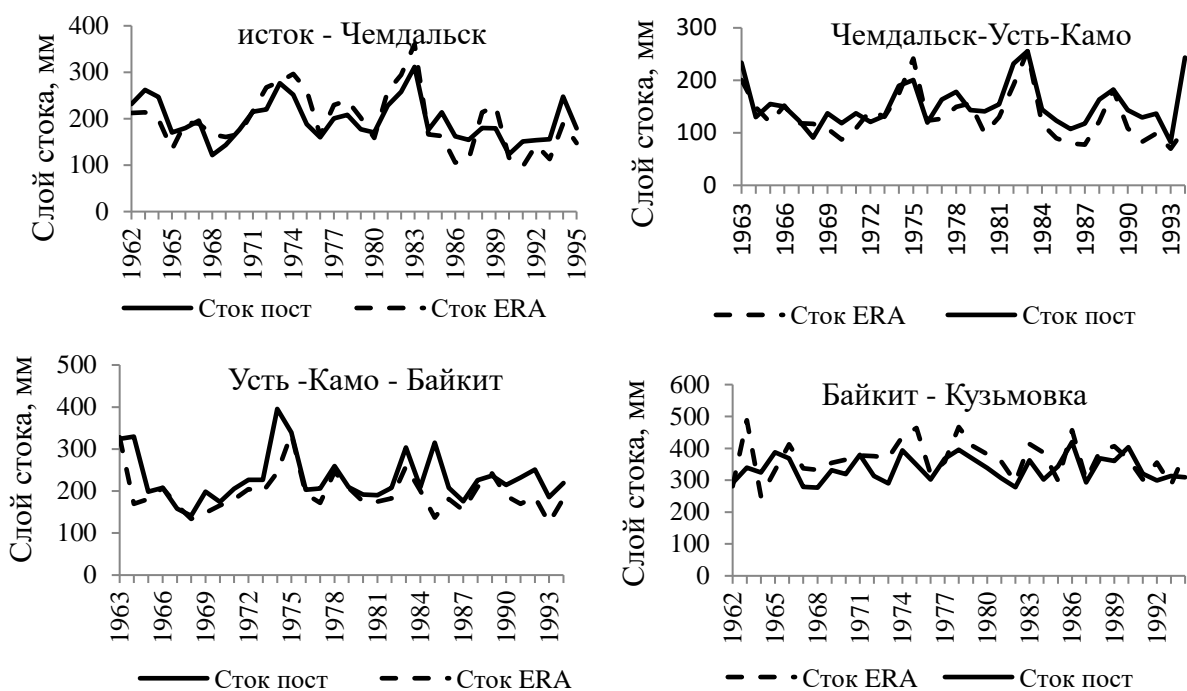


Рис. 2 Модельные и фактические гидрографы для тестовых водосборов в бассейне реки Подкаменная Тунгуска.

Для количественной оценки синхронности динамики годового стока по данным наблюдений с данными реанализа были вычислены коэффициенты корреляции Спирмена. Для рек, протекающих в Западной Сибири, коэффициенты варьируют от 0.59 до 0.95. Самый низкий коэффициент корреляции отмечен для реки Белой, наибольший – для реки Кемь. При этом следует отметить, что река Кемь имеет самый короткий ряд наземных наблюдений – менее тридцати лет.

Для тестовых водосборов в бассейне Подкаменная Тунгуска отмечено постепенное уменьшение коэффициента корреляции от верховьев реки к устью: на участке исток реки- Чемдальск коэффициент корреляции модельных и фактических величин годового стока составляет 0.80, а на участке Байкит – Кузьмовка он уменьшается до 0.57.

Ошибки данных реанализа относительно фактических данных для годового стока показывают, что наименьшие различия модельных и фактических величин годового стока присущи для самых северных рек – Елогуя, Дубчеса и Турухана. Максимальные значения как относительной, так и нормированной ошибки nRMSE отмечены для реки Белой. Река Белая, как отмечалось выше, находится в пределах южно-таежной зоны, значительные площади ее водосбора заняты агроценозами и другими безлесными ландшафтами. Для тестовых водосборов в бассейне реки Подкаменная Тунгуска высокое значение нормированной ошибки nRMSE наблюдается на тестовом водосборе от Байкита до Кузьмовки, тогда как по другим тестовым водосборам nRMSE находится в пределах 19-23 %.

Анализ показал, что величины относительной ошибки сильно колеблются от года к году. Отметим возрастание относительной ошибки годового стока для водосборной территории р. Белой с середины 1980–х годов с линейным коэффициентом 0.81 и $r^2 = 0.27$. Для других бассейнов такой тенденции не наблюдается. Предполагаем, что это связано с малой площадью водосбора, т.к. для реки Белой характерны очень высокая вариабельность годового стока, что типично для малых рек. Годовой сток варьирует от 68 до 258 мм, т. е. сток изменяется почти в четыре раза.

Таким образом, проведенный анализ согласованности динамики годового стока данных наземных наблюдений с данными реанализа показал наличие для большинства водосборных территорий достоверных корреляционных связей. Исключение составлял тестовый водосбор на участке Подкаменной Тунгуски между постом Байкит и Кузьмовка и водосборный бассейн реки Белая. Нормированные ошибки годового стока для исследуемых водосборных территорий лежат в пределах 10% – 40%.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке базовых проектов ИЛ СО РАН "Природная и антропогенная динамика таежных лесов Средней Сибири в условиях меняющегося климата" (№ 0287-2021-0008) и «Научные основы сохранения ресурсного и экологического потенциала лесов Сибири в условиях кумулятивных антропогенных и природных рисков» (№. 0287-2021-0010).

Acknowledgments

This work was supported by the basic projects of the Siberian Forest Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences "Natural and anthropogenic dynamics of the taiga forests of Central Siberia in a changing climate" (No. 0287-2021-0008) and "Scientific foundations for the conservation of the resource and ecological potential of Siberian forests under the conditions of cumulative anthropogenic and natural risks » (No. 0287-2021-0010).

Список литературы

1. Виноградов Ю. Б., Виноградова Т. А., Журавлев С. А., Журавлева А. Д. Математическое моделирование гидрографов стока с неизученных бассейнов рек полуострова Ямал. — Вестник СПбГУ, 2014, сер. 7, вып. 3, с. 71—81.
2. Albergel C., Dutra E., Munier S., Calvet J.C., Munoz-Sabater J., Rosnay P., and Balsamo G. ERA5 and ERA-Interim driven ISBA landsurface model simulations: Which one performs better? — Hydrol. Earth Syst. Sci., 2018, vol. 22, pp. 3515—3532; <https://doi.org/10.5194/hess-22-3515-2018>.

Международное управление водными ресурсами

Т.С. Фролова

*Институт географии РАН, г. Москва
bibikova@igras.ru*

Аннотация. Сделан обзор существующих подходов к управлению водными ресурсами на международном уровне. Показана специфика управления водными ресурсами в развитых и развивающихся странах. Проанализированы особенности внедрения интегрированного управления водными ресурсами в странах мира. Рассмотрены основные структуры, осуществляющие мониторинг и контроль за состоянием трансграничных водных объектов. Рассмотрены особенности продвижения Водной рамочной директивы в странах ЕС. Анализ системы управления водными ресурсами на международном уровне позволяет более комплексно оценивать состояние мировых водных ресурсов.

Ключевые слова: управление водными ресурсами, водное хозяйство, трансграничные водные объекты, международные бассейновые комиссии, водная рамочная директива.

Water Resources Management in the world

T.S. Frolova

*Institute of Geography RAS, Moscow, Russia
bibikova@igras.ru*

Abstract. The article provides an overview of existing approaches to water resources management at the international level. The specificity of water resources management in developed and developing countries has been shown. The features of the implementation of integrated water resources management in the countries of the world have been analysed. The main governing bodies that monitor and control the state of transboundary water bodies have been considered. The peculiarities of the promotion of the Water Framework Directive in the EU countries have been shown. The analysis of the water resources management system at the international level allows a more comprehensive assessment of the state of the world's water resources.

Keywords: water resources management, water industry, transboundary water bodies, international river basin commissions, Water Framework Directive.

Введение

В настоящее время в мире насчитывается более 300 международных речных бассейнов, количество которых постоянно обновляется [27; 40; 42]. Известно, что в них проживает более 40 % населения Земли, населяющих 150 стран, из которых 30 полностью расположены на территории международных речных бассейнов (включая Беларусь, Австрию, Венгрию, Швейцарию, Словакию, Армению, Сербию, Черногорию и др.). Суммарно международные бассейны занимают порядка 47 % территории суши и составляют, по различным подсчетам, от 54 до 80 % речного стока планеты [9; 39-40; 42].

Подобное распределение территории речных бассейнов нередко приводит к межнациональным конфликтам, что отчасти обусловлено длительным нерациональным воздействием гидротехнических сооружений на окружающую среду: от дефицита водных ресурсов до затоплений территории. В некоторых случаях водные споры являются результатом фундаментальных идеологических конфликтов [4; 12-13; 20; 24; 32-34], при этом вода в скором времени может стать причиной серьезных конфликтов из-за ее политического значения, дефицита, нерационального использования и территориального разделения. В первую очередь это касается территорий, расположенных в нижних течениях рек, поскольку они напрямую зависят от влияния на сток вышерасположенных стран. Кроме того, конфликты по поводу водных ресурсов в будущем могут обостряться из-за современных изменений климата, что отразится на водном балансе и, как следствие, на системах ирригации и водоснабжения [2; 14; 40].

Подходы к управлению водными ресурсами

Среди сложившихся подходов к управлению водными ресурсами можно выделить традиционный подход (общественное владение и пользование ресурсами); римское право (подразумевает разделение водных ресурсов на общие, муниципальные и частные), которое оказало влияние на формирование водного законодательства части континентальной и островной Европы; гражданское право, которое разделило ресурсы на две категории: частные и общие (при этом пользуются водными ресурсами те, в чьей собственности они находятся, такой подход частично характерен для Испании, Португалии, Франции, Бельгии и Нидерландов и их бывших колоний, Центральной и Южной Америки и Филиппин); общее право – взяло свое начало в Великобритании и распространилось на колонии (в основе лежит прибрежное водопользование); мусульманский подход, в котором вода является божественным даром и не может принадлежать частным лицам, однако они не освобождены от платы за пользование водными ресурсами (в большинстве мусульманских стран вода условно остается собственностью народа и регулируется шариатом); коммунистический подход подразумевает, что вода находится в собственности государства (характерно для стран постсоветского пространства и Китая); индуистское водное право (сохранилось только на Бали, в Бутане и Непале), которое поддерживает идею о том, что вода не может кому-то принадлежать, а правом пользования обладает община [7; 10; 14; 25; 30-31; 35-37].

Во многих странах также законодательно поддерживается концепция приоритетного использования водных ресурсов во времена водных кризисов. Например, водное законодательство бывшего СССР закрепило за местными властями право запрещать или ограничивать использование питьевой воды в промышленных целях в периоды нехватки воды. Кроме того, все водопользователи обязаны использовать воду рационально. В США в отдельных штатах (например, Миннесота) законодательством обозначен приоритет использования водных ресурсов во время засухи. В Тайване в 1983 г. в закон о воде были внесены поправки, определяющие приоритет бытового водоснабжения над прочими типами использования воды. Питьевое водоснабжение становится приоритетным тогда, когда признается право человека на воду, что не всегда характерно для развивающихся стран. К примеру, в Индии приоритетным до сих пор является ирригационное водопользование [7; 10; 14-15; 22-23; 26; 35-36].

В большинстве стран право на воду определяется в количественных показателях в единицу времени. Однако в некоторых странах и регионах это право определяется как доля в водном объекте. Такой подход характерен для древних ирригационных систем, таких, например, как система ирригации субак на о. Бали и локализованное орошение через резервуары в Шри-Ланке. Также доленое право на воду сохранилось в некоторых регионах Испании как следствие мусульманской оккупации на рубеже первого тысячелетия. Доленое право на воду часто возникало в тех местах, где инвестиции в

водный объект были высокими. Вклад в эти инвестиции определял индивидуальную долю в распределении водных ресурсов. В некоторых странах, например в Колумбии, все источники воды являются собственностью государства, при этом частная собственность на воду возможна, если источник воды естественным образом испаряется и возвращается в землю, находящуюся в частном владении. Однако закон устанавливает утерю собственности на воду после трех лет неиспользования земли [7; 10; 12; 14; 16; 31; 36].

В настоящее время многие развивающиеся страны пытаются внедрить интегрированное управление водными ресурсами, однако даже разработка и внедрение соответствующего законодательства не означают последовательное его исполнение. В развитых странах интегрированное управление водными ресурсами внедряется быстрее благодаря более чуткому реагированию экономики на инструменты регулирования, хорошей мониторинговой базе, относительно равномерному уровню жизни населения, политике, направленной на устойчивое развитие. Однако в развитых странах не все институциональные системы поддерживают интеграцию, что часто мешает эффективному внедрению инструментов разумного управления ресурсами, а также ослабляет их связь с национальной политикой государств [5; 17-18].

В свою очередь, в развивающихся странах система управления ресурсами построена в основном сверху вниз, что упрощает задачу внедрения интегрированного управления, а также позволяет вводить систему постепенно и локально, ориентируясь на сохранение или изменение традиций, связанных с водными ресурсами, отдельные слои населения, регулирование конфликтов, состояние гидротехнических сооружений и т.п. С другой стороны, сознательный подход к управлению требует более весомых финансовых инвестиций, что далеко не всегда возможно в рамках развивающегося государства.

Международные речные бассейновые комиссии

Одним из органов, призванных решать водные проблемы на международном уровне, являются международные речные бассейновые комиссии.

В Европе существует несколько таких комиссий, регулирующих вопросы судоходства, использования воды и гидроэнергетики. Например, существует Центральная комиссия судоходства по Рейну, задача которой – решать вопросы судоходства по реке. Комиссия включает представителей из Франции, Германии, Нидерландов, Швейцарии и Великобритании, которые могут давать странам соответствующие рекомендации. При этом экологическое состояние самой реки контролируется Международной комиссией по защите Рейна. Сама комиссия не имеет законодательной власти, а ее постановления носят рекомендательный характер. В случае если они одобрены странами-членами, комиссия осуществляет дальнейший мониторинг [8].

Белградская конвенция 1948 г. регулирует вопросы, касающиеся р. Дунай. Однако энергетика и судоходство регулируются отдельным органом – Дунайской комиссией. Помимо этого, существует международное соглашение прибрежных стран о загрязнении и сохранении окружающей среды (некоторые прибрежные страны к нему не присоединились: Швейцария, Албания, Италия, Польша, Македония) [10].

В Северной Америке была создана специальная международная комиссия между США и Канадой в 1909 г. Она включает 6 представителей, по 3 с каждой стороны. В юрисдикции комиссии находятся вопросы, касающиеся всех трансграничных водотоков в регионе. Если какой-то проект может повлиять на состояние реки, комиссия должна выдать свое согласие перед его реализацией [19].

Подобные комиссии существуют так же между США и Мексикой, действуют в Южной Америке (р. Плата), Азии (р. Меконг, р. Инд, р. Ганг), Африке (р. Нил, р. Нигер, р. Замбези) [1; 3; 28; 38; 41].

Помимо международных бассейновых комиссий, на территории Европы с 2000 г. действует система интегрированного управления водными бассейнами. Она призвана поддерживать поверхностные и подземные воды Европейского союза в хорошем состоянии. Оценивается нагрузка отдельно на каждый водный объект, и вырабатывается система специальных мер по восстановлению его экологического, биологического, химического и физического состояния. Новые страны – члены ЕС также обязаны имплементировать Водную директиву, несмотря на характерное для них в прошлом влияние коммунистической модели управления водными ресурсами (когда вода почти полностью принадлежит государству).

Водная рамочная директива оценивается как наиболее значимый юридический инструмент, который является максимально прозрачным и понятным для успешного управления качеством и количеством воды. Однако некоторые вещи остаются неясными до сих пор, например, степень контроля за состоянием водных объектов, а также сам термин «хорошее состояние». Возникают некоторые задержки с отчетами о состоянии водных ресурсов стран ЕС, неточное или неполное внедрение основ Водной директивы в местные законодательства. Кроме того, большинство стран не владеет соответствующими средствами и методами оценки биологического состояния водных объектов. Более того, как показывают исследования, страны по-разному интерпретируют положения Водной директивы [6; 23].

Выводы

Анализ системы управления водными ресурсами на международном уровне позволяет более комплексно оценивать состояние мировых водных ресурсов, учитывая то, что в зарубежной практике в основном используется бассейновый подход к управлению водными ресурсами.

Интегрированный подход к управлению водными ресурсами необходим из-за их ограниченности, постепенного загрязнения, сложной взаимосвязи ресурсов между собой, для разумного распределения между нуждами общества и экосистем, рационального использования гидротехнических сооружений во избежание нежелательных последствий.

Разделение водных ресурсов и распределение территории речных бассейнов между различными странами нередко приводят к межнациональным конфликтам. Одним из органов, призванных решать водные проблемы на международном уровне, являются международные речные бассейновые комиссии. Однако решения большинства комиссий носят рекомендательный характер и не имеют юридической силы.

Водная рамочная директива оценивается как наиболее значимый юридический инструмент, который является максимально прозрачным и понятным для успешного управления качеством и количеством воды. Однако остается невыясненным ряд вопросов, касающихся ее внедрения в законодательную систему новых стран – членов ЕС.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках темы государственного задания Института географии РАН FMGE-2019-0007 (AAAA-A19-119021990093-8).

Acknowledgments

The research was carried out within the framework of the state task of the Institute of Geography RAS FMGE-2019-0007 (AAAA-A19-119021990093-8).

Список литературы

1. Agreement between the Government of the People's Republic of Bangladesh and the Government of the Republic of India on sharing of the Ganges waters at Farakka and on augmenting its flows. No. 16210. 05.11.1977.
2. Agyenim J.B. Investigating institutional arrangements for integrated Water Resource Management in Developing Countries: The Case of the White Volta Basin, Ghana. Amsterdam: VU University, 2011.
3. Autorite du Bassin du Niger. URL: <http://www.abn.ne/>.
4. Boundary dispute between Benin and Niger (river Niger): Summary of the Judgement of 12.07.2005. International Court of Justice.
5. Boutkan E., Sticker A. Enhanced Water Resources Base for Sustainable Integrated Water Resources Management // Natural Resources Forum. 2004. Vol. 28 (2). P. 150–154.
6. Bruin E.F.L.M. de, Jaspers G.W., Gupta J. The EU Water Framework Directive: challenges for institutional implementation // J. Vermaat (ed.). Challenges in Coastal Zone Management in the EU. Springer, 2005. P. 153–169.
7. Caponera D., Nanni M. Principles of water law and administration. London: Routledge, 2019. 398 p.
8. Central Commission for the Navigation of the Rhine. URL: <https://www.ccr-zkr.org/>.
9. CIA World Factbook. URL: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook>.
10. Danube Commission. URL: <https://www.danubecommission.org/dc/en/>.
11. Dellapenna J.W., Gupta J. The evolution of the law and politics of water. Springer, 2009. 416 p.
12. Donoso G., Melo O. Water Quality Management in Chile: Use of Economic Instruments // Biswas A.K., Braga B., Tortajada C., Rodriguez D.J. (eds.). Water Quality Management in the Americas. Water Resources Development and Management. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. P. 229–251.
13. Gleick P.H., Heberger M. Water Conflict Chronology // The World's Water. Washington, DC: Island Press, 2014.
14. Gupta J. (Inter)national Water Law and Governance: Paradigm Lost or Gained? Inaugural address as professor of policy and law on water resources and the environment, Department of Management and Institutions at the UNESCO-IHE, Institute for Water Education in Delft, 22.03.2004. 2004.
15. Hall N. The North American Great Lakes // The Evolution of the Law and Politics of Water. Springer, 2009. P. 281–299.
16. Hearne R.R. Evolving Water Management Institutions in Mexico // Water Resources Research. 2004. Vol. 40 (12).
17. Hooper B. Integrated River Basin Governance: Learning from International Experience. London: International Water Association Publishing, 2005. 306 p.
18. Hooper B. Integrated Water Resources Management: Governance, Best Practice, and Research Challenges // J. of Contemporary Water Research & Education. 2006. Iss. 135. P. 1–7.
19. International Joint Commission. URL: <https://www.ijc.org/en>.
20. Kalpakian J. Identity, Conflict and Cooperation in International River Systems. Aldershot: Ashgate Publishers, 2004. 222 p.
21. Kelly M., Bennett C., Coste M., Delgado C., Delmas F., Denys L., Ector L., Fauville C., Ferréol M., Golub M., Jarlman A., Kahlert M., Lucey J., Ní Chatháin B., Pardo I., Pfister P., Picinska-Faltynowicz J., Rosebery J., Schranz C., Schaumburg C., van Dam H., Vilbaste S. A comparison of national approaches to setting ecological status boundaries in phytobenthos

assessment for the European Water Framework Directive: results of an intercalibration exercise // *Hydrobiologia*. 2009. Vol. 621, № 1. P. 169–182.

22. Kidd M. South Africa: The Development of Water Law // *The Evolution of the Law and Politics of Water*. Springer, 2009. P. 87–105.

23. Kotov V. Russia: Historical Dimensions of Water Management // *The Evolution of the Law and Politics of Water*. Springer, 2009. P. 139–156.

24. Land, Island and Maritime Frontier Dispute (El Salvador/Honduras). Judgment, I.C.J. Reports 1986–1992, 2002–2003.

25. Liu B., Speed R. Water Resources Management in the People's Republic of China // *Water Resources Development*. 2009. Vol. 25 (2). P. 193–208.

26. Matinenga E.T. A new water act for Zimbabwe? // *Water for agriculture in Zimbabwe: policy and management options for the smallholder sector*. Harare: UZ, 2000. P. 219–224.

27. McCracken M., Wolf A. Updating the Register of International River Basins of the world // *International Journal of Water Resources Development*. 2019. Vol. 35. Iss. 5. P. 732–782.

28. Mekong River Commission. URL: <https://www.mrcmekong.org/>.

29. Mikiyasu N. Politics behind Zambezi Action Plan // *Water Policy*. 1998. Vol. 1, iss. 4. P. 397–409.

30. Mostert E. Integrated Water Resources Management in the Netherlands: How Concepts Function // *J. of Contemporary Water Research and Education*. 2006. Iss. 135. P. 19–27.

31. Naff T. Islamic Law and the Politics of Water // *The Evolution of the Law and Politics of Water*. Springer, 2009. P. 37–52.

32. Nicol A. The dynamics of river basin cooperation: The Nile and Okavango basins // *Transboundary Rivers, Sovereignty and Development: Hydropolitical drivers in the Okavango River Basin*, Pretoria: African Water Issue Research Unit, Green Cross International, 2003.

33. Nicol A., Shahin M. The Nile: moving beyond cooperation. Water Policy Programme, ODI. International Hydrological Programme (IHP) of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). Technical Document in Hydrology. 2003. No. 16.

34. Pulp Mills on the River Uruguay (Argentina v. Uruguay): Summary of the Judgment of 20.04.2010. International Court of Justice.

35. Ramazzotti M. Readings in Customary African Water Law. FAO Legislative Study, 58. Rome, Italy, 1996.

36. Singh C. Water rights and principles of water resources management. New Delhi: Indian Law Institute, 1991. 158 p.

37. Teclaff L.A. Water law in historical perspective. Buffalo, USA: William S. Hein Company, 1985. 369 p.

38. The Indus waters treaty 1960 between the Government of India, the Government of Pakistan and the International Bank for Reconstruction and Development. No. 6032. 19.09.1960.

39. The United Nations World Water Development Reports. URL: <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/>.

40. Transboundary Freshwater Dispute Database (TFDD), Case Studies-Water Conflict Resolution, Department of Geosciences, Oregon State University. URL: <https://transboundarywaters.science.oregonstate.edu>.

41. Treaty on the River Plate Basin // *Int. Legal Materials*. 1969. Vol. 8, № 5. P. 905–909.

42. Wolf A., Natharius J., Danielson J., Ward B., Pender J. (). International river basins of the world. *International J. of Water Resources Development*. 1999. Vol. 15, iss. 4. P. 387–427.

Оценка изменений гидрологического режима, потоков макрокомпонентов и органических веществ в системе болото-река в таежной зоне Западной Сибири под влиянием осушения и пирогенного фактора

Ю.А. Харанжевская

*Сибирский НИИ сельского хозяйства и торфа-филиал СФНЦА РАН, г. Томск, Россия
kharan@yandex.ru*

Аннотация. Исследования химического состава вод показали, что осушенный участок Васюганского болота характеризуется повышенными концентрациями всех компонентов в сравнении с естественным участком, при этом достоверные различия отмечены по содержанию в водах Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Cl^- , K^+ , Na^+ , Cl^- , CO_2 , SO_4^{2-} , NO_3^- , $\text{C}_{\text{орг}}$. В водах р. Гавриловка отмечаются повышенные концентрации NH_4^+ , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , а также $\text{C}_{\text{орг}}$, ХПК, CO_2 . Анализ уровня режима показал, что под влиянием осушения и пирогенного фактора отмечается снижение уровней болотных вод на 20-30 см и повышение амплитуды их колебания в 1,3-3 раза.

Ключевые слова: модельный водосбор, болота, водный режим, химический состав, лесомелиорация, пирогенный фактор, влияние, Западная Сибирь.

Assessment of forestry drainage and wildfire-related changes of the water regime, major elements and organic substances release though the bog-river system in the taiga zone of Western Siberia

Yu. A. Kharanzhevskaya

*Siberian Research Institute of Agriculture and Peat branch of Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia
kharan@yandex.ru*

Abstract. Studies of the chemical composition of waters have shown that the drained area of the Great Vasyugan Mire is characterized by increased concentrations of all components in comparison with the pristine part, while significant differences were noted in the content of Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe_{total} , Cl^- , K^+ , Na^+ , Cl^- , CO_2 , SO_4^{2-} , NO_3^- , DOC. The data analysis revealed also increased concentrations of NH_4^+ , Fe_{total} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , as well as DOC, COD, and CO_2 in the waters of the Gavrilovka River. Analysis of the water table level dynamics showed that under the influence of drainage and the pyrogenic factor, there is a decrease in water table levels by 20-30 cm and an increase in the amplitude of their fluctuations by 1.3-3 times.

Keywords: model catchments, peatlands, water regime, water chemistry, forestry drainage, wildfire, impact, Western Siberia.

Введение

Западная Сибирь является крупным регионом в северном полушарии с широким распространением болот [1]. Болота занимают обширные площади на террасах и междуречьях рек определяют температурный режим региона и имеют важное значение в водном балансе территории, влияют на химический состав и качество вод реки Оби и ее притоков, тем самым влияют на общий поток минеральных и органических веществ в Северный Ледовитый океан [2-3]. Сибирь характеризуется наибольшей скоростью изменения температуры приземных слоев атмосферы ($1,39^\circ \text{C}/100 \text{ лет}$), которая существенно превышает среднюю скорость по Северной Евразии и Северной Азии, Арктике и по всему северному полушарию [4]. В регионе отмечается увеличение количества атмосферных осадков и смена режима их выпадения, которая выражается в повышении экстремальных ливневых осадков в летне-осенний период [5]. Рост температуры воздуха приводит к увеличению частоты возникновения природных пожаров что характерно для Сибири и других регионов [6], и связано с засушливыми условиями в летний период. Особенно подвержены влиянию изменения климата и пожарам осушенные болота, которые зачастую выгорают в связи со снижением уровней воды, что весьма негативно сказывается на качестве вод рек-водоприемников. Целью данной работы являлась оценка изменений уровня режима Васюганского болота и потоков макрокомпонентов, органических веществ в системе болото-малая река в таежной зоне Западной Сибири и их трансформации под влиянием лесомелиорации, пирогенного фактора и природно-климатических изменений.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в пределах модельного водосбора малой реки Гавриловка, левобережного притока р. Икса бассейна Средней Оби. Модельный водосбор р. Гавриловка (площадь 81 км^2) располагается на территории осушенного участка Васюганского болота, дренажная сеть занимает 39 км^2 . Осушение болота для лесоразведения проведено в 1980-х гг. сетью открытых каналов с расстоянием 160–180 м, в настоящее время отмечается зарастание осушительных каналов и восстановление скорости торфонакопления [7]. В 2016 году на территории водосбора произошел пожар и выгорел участок площадью $5,54 \text{ км}^2$, мощность горелого слоя составила 5-15 см [8]. В качестве фоновой территории был использован аналогичный естественный участок Васюганского болота, расположенный в 8 км севернее, в границах водосбора малой р. Ключ, правобережного притока р. Бакчар (площадь водосбора 76 км^2). Территория исследований характеризуется слабым развитием инфраструктуры, а объекты находятся в 200 км зоне от основных источников загрязнения.

Для анализа макрокомпонентного состава вод и содержания органических веществ в речных водах производился отбор проб 1 раз в месяц с периодичностью март-сентябрь 2015-2022 гг. В 2022 году для оценки пространственной вариации химического состава болотных вод производился отбор проб на осушенном участке Васюганского болота в бассейне р. Гавриловка в пределах сосново-кустарничково-сфагновых болотных микроландшафтов (RG, RG2, RG3), осоково-сфагновой топи (TG) и грядово-мочажинного комплекса (D2). Также был выполнен отбор проб болотных вод в пределах частично выгоревшего сосново-кустарничково-сфагнового микроландшафта (PG2) в бассейне р. Гавриловка. На фоновом водосборе р. Ключ (естественный участок Васюганского болота) отбор проб проводили в аналогичных болотных микроландшафтах: сосново-кустарничково-сфагновый (P3), осоково-сфагновая топь (P5) и грядово-мочажинный комплекс (D1). Отбор проб болотной воды осуществляли с глубины 40–50 см с периодичностью 1 раз в месяц с марта по сентябрь 2022 года из специально оборудованных скважин глубиной 1 метр. Измерения уровней болотных

вод производились с применением регистраторов Solinst Levellogger (Canada) с периодичностью 1 час в 2022 году.

Результаты и выводы

Анализ данных показал достоверные различия (по непараметрическому критерию Уилкоксона) в уровнях болотных вод естественного и осушенного участков Васюганского болота. Под влиянием осушения отмечается существенное снижение уровней на 20-30 см и повышение амплитуды колебания в 1,3-1,8 раз в сосново-кустарничково-сфагновых микроландшафтах, в 2,5-3 раза на грядово-мочажинном комплексе и пироженном участке. Под влиянием пироженного фактора отмечается повышение отметок уровней ближе к поверхности болота за счет ее выгорания и выравнивания микрорельефа (Рис.1).

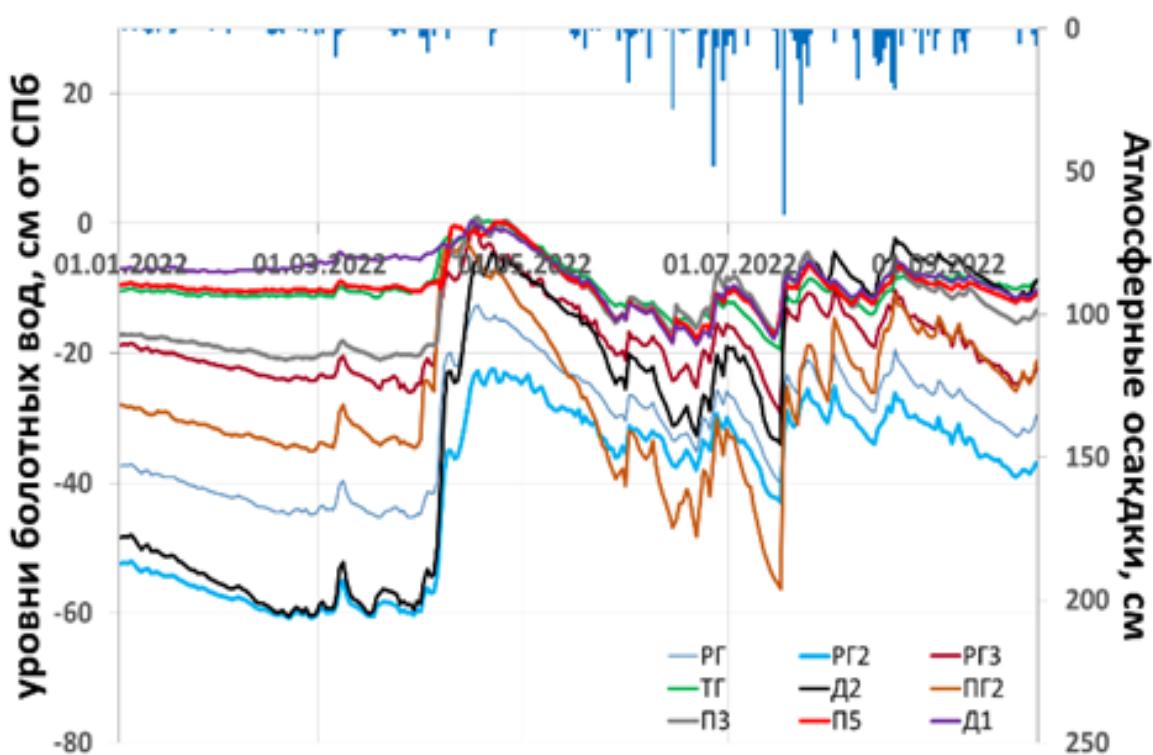


Рис. 1 Пространственная вариации уровней болотных вод осушенного и естественного участков Васюганского болота в 2022 г.

Анализ данных по химическому составу показал, что осушенный участок Васюганского болота характеризуется повышенными концентрациями всех компонентов в составе вод в сравнении с естественным участком, при этом достоверные различия отмечены по содержанию в водах Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Cl^- , K^+ , Na^+ , Cl^- , CO_2 , SO_4^{2-} , NO_3^- , $\text{C}_{\text{орг}}$. Анализ данных показал, что на 6 год после пожара в водах пироженного участка осушенного болота отмечаются повышенные концентрации K^+ , Ca^{2+} , HCO_3^- . В многолетней динамике следует отметить маловодный 2015 г. – в этот год в болотных водах естественного и осушенного участков Васюганского болота были отмечены максимальные за исследуемый период концентрации Na^+ , Mg^{2+} , NH_4^+ , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , $\text{C}_{\text{орг}}$, и минерализации вод (Рис. 2).

В реке Гавриловка дренирующей осушенный участок Васюганского болота в среднем за 2015-2022 гг. отмечается более низкая (в 1,3 раза) величина рН и концентрации Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , HCO_3^- в сравнении с водами реки Ключ, которая дренирует естественный участок Васюганского болота и наоборот в водах р.

Гавриловка отмечают повышенные концентрации NH_4^+ , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , а также $\text{C}_{\text{орг}}$, ХПК , CO_2 , что является индикатором влияния осушения и пирогенного фактора. Повышенные концентрации минеральных компонентов в водах р. Ключ вероятно определяется меньшей заболоченностью водосбора (около 77 %) и выносом веществ с территории водосбора, занятой минеральными почвами.

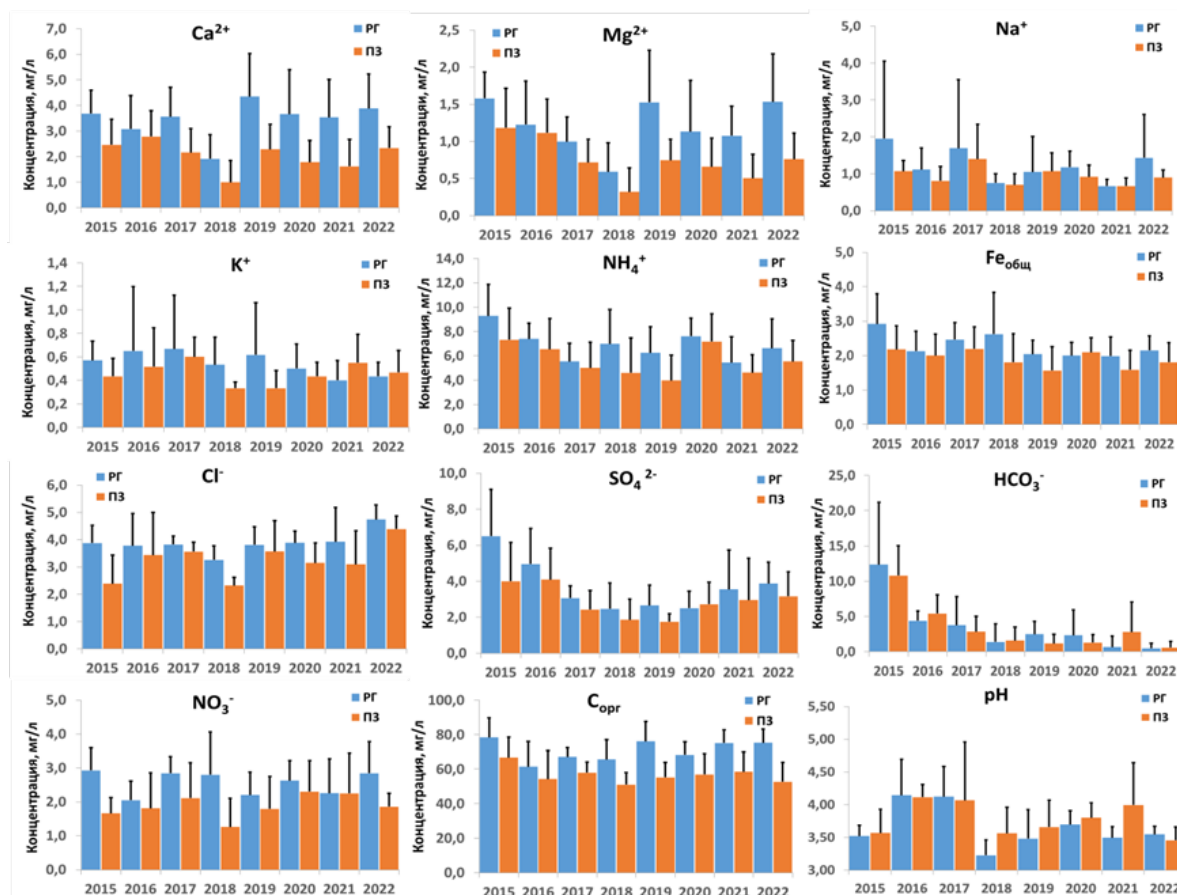


Рис. 2 Многолетняя динамика химического состава вод естественного (ПЗ) и осушенного (РГ) участков Васюганского болота за 2015-2022 гг.

Исследования изменений химического состава вод реки Гавриловка за период 2015-2022 гг. позволили отметить повышение под влиянием пирогенного фактора в первый год после пожара величины рН и концентраций Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, SO_4^{2-} , NO_3^- , TDS. Соответственно минимальные концентрации макрокомпонентов отмечены преимущественно в 2015-2016 гг., предшествующих пожару. Изменение химического состава вод реки Гавриловка в последующие после пожара годы имеет пульсационный характер. В 2020 году отмечается повторный рост содержания Ca^{2+} , Na^+ , HCO_3^- , а концентрации NO_3^- в речных водах увеличились за исследуемый период почти в 3 раза. В последующие 2021-2022 года отмечается снижение концентраций компонентов, обусловленных пирогенным фактором. В итоге суммарный вынос веществ с осушенного участка Васюганского болота за период апрель-сентябрь 2022 года с водосбора р. Гавриловка был в 1,3 раза ниже в сравнении с фоновым бассейном естественного участка Васюганского болота и составил 8475 кг/км^2 , из которых вынос $\text{C}_{\text{орг}}$ был равен 45% или 3603 кг/км^2 .

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-27-00242.

Acknowledgments

The work was supported by Russian Science Foundation, project No. 22-27-00242.

Список литературы

1. Нейштадт М.И. Мировой природный феномен–заболоченность Западно-Сибирской равнины //Известия АН СССР. Серия Географическая. 1971. № 1. С. 21–34.
2. Berezin, A.E., Bazanov, V.A., Skugarev, A.A., Rybina, T.A., Parshina, N.V., 2014. Great Vasyugan Mire: landscape structure and peat deposit structure features // International Journal of Environmental Studies, 71, No. 5, 618–623. <https://doi.org/10.1080/00207233.2014.942537>
3. Pokrovsky, O.S., Manasypov, R.M., Loiko, S., Shirokova, L.S., Krickov, I.A., Pokrovsky, B.G., Kolesnichenko, L.G., Kopysov, S.G., Zemtsov, V.A., Kulizhsky, S.P., Vorobyev, S.N. & Kirpotin, S. N., 2015. Permafrost coverage, watershed area and season control of dissolved carbon and major elements in western Siberian rivers // Biogeosciences 12, 6301–6320. <https://doi.org/10.5194/bg-12-6301-2015>.
4. Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences, 2013. Environmental Science and Engineering. Springer. The Netherlands, 357 p.
5. Харюткина Е.В., Логинов С.В., Усова Е.И., Мартынова Ю.В., Пустовалов К.Н. Тенденции изменения экстремальности климата Западной Сибири в конце XX – начале XXI веков // Фундаментальная и прикладная климатология, 2019, №2. С. 45-65.
6. Kharuk V. I., Ponomarev E. I., Ivanova G. A., Dvinskaya M. L., Coogan S. C., and Flannigan M. D. (2021). Wildfires in the Siberian taiga // *Ambio*, 50, 1953–1974, <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>, 2021.
7. Maloletko A.A., Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Kharanzhevskaya Yu.A., Magur M.G., Voistinova E.S., Ivanova E.S., Chudinovskaya L.A., Khaustova A.A. (2018). Effects of long-term drainage on vegetation, surface topography, hydrology and water chemistry of north-eastern part of Great Vasyugan Mire (Western Siberia) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 211 (1). 012033.
8. Sinyutkina A. A., Gashkova L.P., Koronatova N.G., Maloletko A.A., Mironycheva-Tokareva N. P., Russkikh I.V., Serebrennikova O.V., Strel'nikova E.B., Vishnyakova E.K. Kharanzhevskaya Yu. A. (2020). Post-fire ecological consequences within the drained site of the Great Vasyugan Mire: retrospective water-thermal regime and pyrogenic disturbance estimation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 408, 012037. doi: 10.1088/1755-1315/408/1/012037

Аэрозоли и твердые частицы как приоритетные загрязнители водных объектов городских природных комплексов

А.П. Хаустов^{1*}, М.М. Редина¹, А.С. Нартов^{1,2}, А.Ю. Тронец¹

¹*Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва*

²*Государственный университет по землеустройству, г. Москва*
khaustov-ap@rudn.ru

Аннотация. Городские водоемы находятся под сильнейшей антропогенной нагрузкой. Среди загрязнений особую роль играют твердые частицы и аэрозоли в связи с рисками присутствия в их составе опасных канцерогенных и токсичных веществ (в частности, полициклические ароматические углеводороды и другие вещества 1-2 классов опасности). Представлены оценки поступления и накопления твердых частиц и аэрозолей в урбоэкосистемы от одного из наиболее значительных их источников – городской дорожной сети. Объект анализа – территория кампуса РУДН и прилегающего лесопарка. На этом специализированном полигоне проведена серия экспериментальных исследований и получены оценки поступления в атмосферу города твердых частиц и аэрозольных выделений, а также оценки их распределения над территорией, включая опасность поступления в водные объекты.

Ключевые слова: твердые частицы, атмосферные выпадения, снегомерная геохимическая съемка, транспорт, полициклические ароматические углеводороды.

Aerosols and Particulate Matter as Priority Pollutants of Water Bodies of Urban Natural Complexes

A.P. Khaustov^{1*}, M.M. Redina¹, A.S. Nartov^{1,2}, A.Yu. Tronets

¹*People's Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia*

²*State University on Land Use Management, Moscow, Russia*
khaustov-ap@rudn.ru

Abstract. Urban water bodies are under the strongest anthropogenic load. Among the pollutants, particulate matter and aerosols play a special role due to the risks of the presence of dangerous carcinogenic and toxic substances in their composition (in particular, polycyclic aromatic hydrocarbons – substances of hazard classes 1-2). The paper presents estimations of the intake and accumulation of solid particles and aerosols into urban ecosystems from one of their most significant sources – the urban road network and transport. The object of analysis is the territory of the RUDN University campus and the adjacent forest park. A series of experimental studies have been carried out at this specialized test area and estimations of the entry of solid particles and aerosols into the urban atmosphere, as well as estimations of their distribution over the territory, including a danger of entry into water bodies, have been obtained.

Keywords: particulate matter, atmospheric sedimentation, snow measuring geochemical survey, transport, polycyclic aromatic hydrocarbons.

Введение

Состояние водных объектов городов напрямую связано с загрязнением атмосферного воздуха. Токсиканты поступают в водную среду с атмосферными выпадениями, поверхностным (почвенным) стоком, с подземными водами. Состав токсикантов определяется характером источников и свойствами самих веществ (особенностями их миграции и трансформации в условиях городской среды).

По официальным оценкам последних лет [1] один из крупнейших загрязнителей атмосферы г. Москвы – транспортная система с вкладом более 80%. Значительная часть выбросов – твердые частицы (ТЧ) различных размеров и, соответственно, свойств (включая опасность для биоты). Токсичность аэрозолей повышается в связи с адсорбцией липофильных веществ, в том числе органических соединений, например, полиароматических углеводородов (ПАУ, или полиаренов). Вновь получаемые хелаты суспендируются. Крупные аэрозоли выпадают на проезжую часть, многократно попадая в зону выхлопа, подвергаются вторичному суспендированию. Мелкие разносятся потоками воздуха, частично фиксируются снежным покровом; данные об их распределении – основа для оценок потоков поллютантов на выделяемых территориях.

Цель исследования – оценить объемы поступления твердых частиц от автотранспортных средств (АТС) и полиаренов расчетными и экспериментальными методами в атмосферу в условиях города, как приходной компоненты геохимического стока в водные объекты.

Материалы и методы исследования

Оценка масштабов поступления ТЧ и ПАУ в условиях города проведена на примере опытного полигона– кампус РУДН на юго-западе Москвы и прилегающий лесопарк. Территория площадью 114 га окружена и пересекается автомагистралями с интенсивностью движения от 1,6 до более 28,5 млн АТС/ год. За счет преобладания юго-западного ветра на территорию поступает значительная часть выбросов, формирующихся при истирании дорожного полотна, шин и протекторов, тормозных колодок, а также в составе выхлопных газов. На полигоне с 2017 г. ведутся регулярные наблюдения за загрязненностью воздуха, почв, состоянием растительности на 33 точках университетской системы мониторинга.

Ассоциированные с ТЧ полиарены рассматриваются как геохимические маркеры – стойкие токсичные вещества (1–3 классы опасности), наличие которых в средах позволяет с высокой долей вероятности идентифицировать источники загрязнения даже в случае их миграции на значительные расстояния (иногда более 300 км). Риски наличия ПАУ в водных объектах широко представлены в научной литературе (особенно для донных отложений рек [4 и др.]). В меньшей степени проблема изучена для подземных вод. Исследования указывают на возможность использования маркерных свойств ПАУ и ТЧ для решения проблем экологии городов. В нашем случае анализ концентраций ПАУ (метод индикаторных соотношений, широко применяемый в научной литературе) позволил однозначно определить транспорт как ведущий источник загрязнения [7].

По данным о величинах удельных выбросов ТЧ и наличии на них ассоциированных полиаренов [2, 6, 9] ранее нами получены расчетные оценки нагрузок от 5 участков транспортной сети, непосредственно примыкающих к территории [4, 8]. Отметим, что результаты расчетов сильно зависят от принятых удельных объемов генерации ТЧ при истирании дорожного покрытия, тормозных колодок и шин – они по данным разных авторов различаются весьма существенно. Эти оценки верифицированы результатами снегомерной съемки на полигоне: в ходе экспериментальных работ весной 2022 и 2023 гг. были определены объемы накопления снега и рассчитаны массы ТЧ и ПАУ. Высота снега определялась замерами на 33 точках мониторинга; далее с учетом плотности снега определены запасы влаги. Содержание ТЧ и ПАУ определены в

лаборатории центра коллективного пользования РУДН и лаборатории ИРЕА–Курчатовский институт стандартными методами (фильтрация и взвешивание; ВЭЖХ). Также проведено измерение концентраций твердых частиц PM₁₀, PM_{2.5} в воздухе на высоте 2 м газоанализатором DT-9680/9681 Particle Mass Concentration Detector.

Результаты

Оценка образования твердых частиц и ПАУ по удельным выбросам. Пять участков автотранспортных магистралей, примыкающих к исследуемой территории, характеризуются различной интенсивностью движения. По данным городских камер наблюдения преобладает легковой транспорт; вклад грузового и общественного пассажирского транспорта менее значителен. Суммарные выбросы твердых частиц оценены в 320,66 т; ПАУ 216,3 кг (Табл. 1).

Табл. 1 Рассчитанный годовой объем поступления твердых частиц и ПАУ.

Характеристика нагрузки	Участки				
	1–ул. Миклухо-Маклая	2 – Ленинский просп. (сев.)	3 – Ленинский просп. (юг)	4 – ул. Саморы Машела	5 – ул. Акад. Опарина
Ширина дорожного полотна, м	14,5	35,0	35,0	8,5	8,5
Длина участка, м	1000	1000	1180	430	1100
Количество АТС, млн/год	7,8	28,5	27,1	1,6	5,1
Модуль нагрузки на автотрассу, АТС/ м ² ·год	539	815	656	431	550
Интенсивность потока, АТС/ час	890	3260	3090	180	590
Выбросы ТЧ, т/год:	33,6	122,5	137,3	2,94	24,3
- с отработанными газами	0,10	0,37	0,41	0,01	0,07
- от истирания шин	1,46	5,34	5,97	0,13	1,06
- при торможении	0,20	0,72	0,68	0,04	0,13
- от истирания дорожного полотна	31,8	116,1	130,2	2,76	23,0
Выбросы ПАУ, кг/год	22,6	82,6	92,7	1,96	16,4

Основное количество АТС (около 80%) зафиксировано на Ленинском просп. с интенсивностью движения более 3 тыс. АТС/час. В зависимости от направлений и скоростей ветра и высотной застройки выбросы ТЧ и ПАУ достигают исследуемой территории периодически, хотя формируют общую нагрузку загрязнения компонентов среды. На этот фон накладывается выбросы с ул. Миклухо-Маклая, пересекающей кампус. Согласно расчетам, преобладают ТЧ, образующиеся при истирании дорожного полотна; вклад истирания шин и выбросов с отработанными газами минимален. Вывод принципиален: доказываемость важности оптимизации технологий дорожных покрытий в целях снижения загрязненности воздушной и сопредельных сред.

Результаты экспериментальной оценки. Снегомерные съемки 2022 и 2023 гг. показали сходные оценки количеств ТЧ, аккумулированных в снеговом покрове. Продолжительность «снежного» сезона принималась равной 4 месяца; вычисленные нагрузки экстраполировались на остальную часть года. Объемы накопления ТЧ на полигоне были оценены соответственно в 180 и 177 т/год. В результате независимых оценок доля ТЧ, поступающая в атмосферу с дорожной сети и оседающая на территории

кампуса, по соотношению расчетной нагрузки и экспериментальной оценки составляет около 56%. Иными словами, в среднем на 1 м² территории должно осаждаться около 155 г ТЧ с 0,106 г ПАУ в год. Безусловно, в разных зонах территории, удаленных от автодорог на различные расстояния, эти значения существенно варьируют.

Расчетная оценка в силу укрупненности имеет ряд недостатков: невозможно учесть реальную специфику АТС различных марок и возрастов, сорта используемого топлива, свойства дорожных покрытий. Кроме этого, наиболее опасная часть загрязнений (частицы РМ_{2.5} и РМ₁₀) характеризуются различной спецификой поведения в атмосфере. В этой связи проведены экспериментальные замеры содержания ТЧ фракций 10 и 2,5 мкм в атмосфере на 33 точках системы мониторинга (Рис. 1).

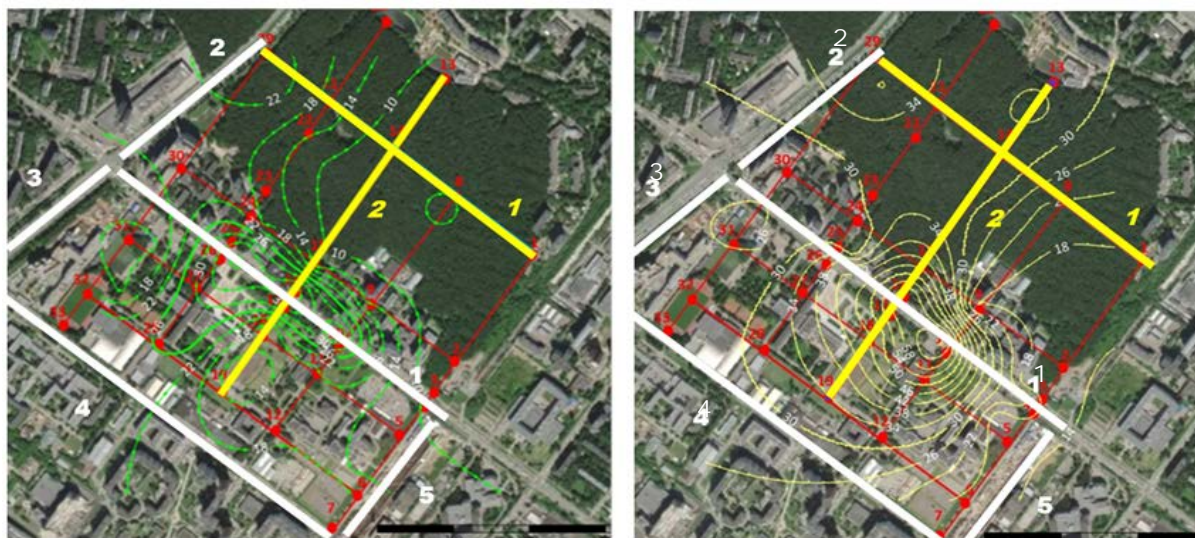


Рис. 1 Содержания РМ_{2.5} (слева) и РМ₁₀, мг/м³ (справа); цифрами обозначены: 1...5 – участки автотрасс; 1, 2 – профили.

Как и следовало ожидать, максимумы ТЧ в безветренную погоду приурочены к участкам наиболее интенсивного движения, однако поля концентраций явно различны. Так, лесопарковая зона относительно менее загрязнена РМ_{2.5}, но концентрации РМ₁₀ здесь довольно высоки. Очевидная причина этого – специфика миграции поллютантов в зависимости от направления и силы ветра, веса и размера частиц. Максимальная концентрация РМ_{2.5} составила 39,3 мкг/м³; превышения выявлены на 5 точках транспортной зоны, что подтверждает значимые риски для этой территории. В Табл. 2 представлены средние значения концентраций ТЧ в функциональных зонах территории. Функциональные зоны определены по комплексу признаков состояния территории и весьма четко различаются по степени влияния транспорта [5, 8].

Табл. 2 Концентрации твердых частиц РМ_{2.5} и РМ₁₀ в функциональных зонах.

Функциональная зона	С _{РМ 2.5} , мг/м ³	С _{РМ 2.5} , мг/м ³ , доли ПДК _{с.с}	С _{РМ 10} , мг/м ³	С _{РМ 10} , мг/м ³ , доли ПДК _{с.с}	Нагрузка ТЧ, г/м ² · сут
Транспортная (30 га)	25,4	0,72	36,4	0,61	1,20
Социально-административная (33 га)	18,5	0,53	33,1	0,55	0,20
Лесная (51 га)	10,1	0,29	28,7	0,48	0,074

Несмотря на благополучную картину загрязненности воздуха, пики концентраций ТЧ приурочены к участкам дорожной сети. Важно определить размеры зоны влияния АТС, которая наглядно фиксируется за мерами концентраций ТЧ в воздухе в безветренную погоду. Распределение частиц по профилю, пересекающему лесопарк и территорию кампуса, наглядно иллюстрируется на Рис. 2.

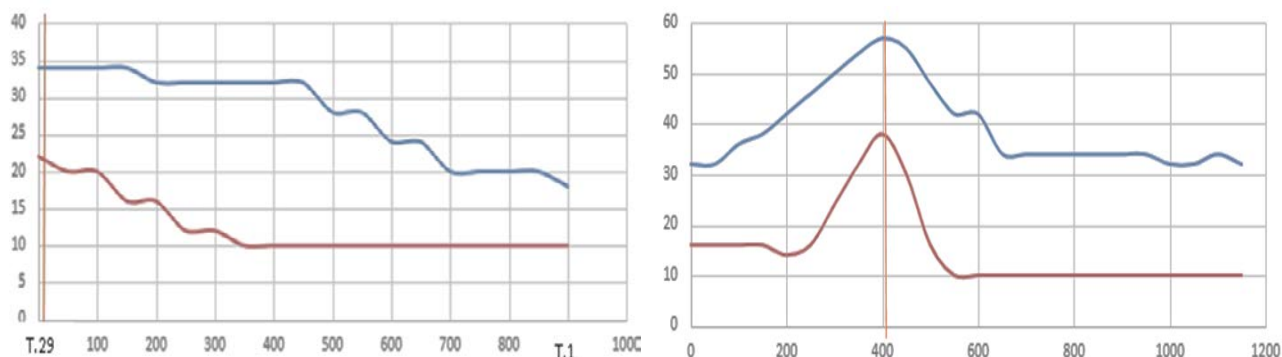


Рис. 2 Содержания частиц $PM_{2.5}$ (верхняя кривая) и PM_{10} (нижняя) на профилях 1 (слева) и 2 (справа).

Максимальные концентрации $PM_{2.5}$ и PM_{10} характерны для ул. Миклухо-Маклая и снижаются по мере удаления от источника загрязнения, принимая минимальные значения на расстоянии 150–200 м. от дороги. Более мелкие частицы $PM_{2.5}$ смещены от трасс сильнее, пик менее выражен: они переносятся воздушными потоками легче из-за меньшей массы. Наглядно проявляется эффект накопления загрязнителей в зоне многоэтажных застроек – «барьера» для воздушных потоков с загрязнителями. В правом сегменте профиля 19-13 концентрация ТЧ ниже: здесь отсутствует застройка, а лес выполняет функцию фильтра, осаждая на листьях часть загрязнителей.

Анализ карт и профилей свидетельствует, что концентрация PM_{10} выше по сравнению с $PM_{2.5}$ в среднем в 1,65–2 раза, что согласуется с исследованиями [3]. Распределение частиц PM_{10} более равномерно: $PM_{2.5}$ сосредоточены непосредственно над ул. Миклухо-Маклая между зданиями, а частицы PM_{10} распределены над значительно большей территорией (вся административная зона кампуса). Согласно расчетам, в воздухе территории в безветренную погоду непрерывно содержится 20 г частиц $PM_{2.5}$ и 36 г PM_{10} . По сравнению с интенсивностью генерации ТЧ автомобилями эта оценка кажется незначительной, а при делении на площадь кампуса тем более. Но именно такие концентрации создают опасность экологического риска и заболеваний человека с учетом канцерогенности ассоциированных ПАУ и других токсикантов.

Важно, что концентрации ТЧ $PM_{2.5}$ и PM_{10} не скоррелированы между собой и с суммой ТЧ: по данным снегомерной съемки коэффициенты корреляции ТЧ с $PM_{2.5}$ и PM_{10} соответственно 0,40 и 0,04. При этом комплексы токсикантов, ассоциированных с $PM_{2.5}$ и PM_{10} существенно различны по составу и поведению [10]. Таким образом, оценка содержания суммы ТЧ в снегу еще не гарантирует хорошего прогноза последующего поступления токсичных соединений в сопредельные среды.

Анализ содержания ПАУ на ТЧ твердых частицах, присутствовавших в снегу, и непосредственно в дорожной пыли, указывает на повышение концентраций полиаренов при попадании ТЧ в зону выхлопов автотранспорта. Для различных полиаренов концентрации вторичного суспендирования возрастают на 10–30%. Также весьма существенна разница суммарных концентраций и соотношений ПАУ, сорбированных на ТЧ снега и ТЧ дорожной пыли. Расчетами индикаторных соотношений ПАУ подтвержден различный состав ПАУ – проявляется явное влияние преобразования загрязнителей в составе снегового покрова, а также зависимость состава комплекса ПАУ, которые ассоциируются с ТЧ различного размера, имеющими индивидуальную

специфику распространения в окружающей среде. В составе ПАУ в дорожной пыли при суммарной концентрации ПАУ 1476 мкг/кг преобладают перилен, фенантрен, антрацен (каждый более 10%); содержание в составе ТЧ в снеговом покрове – 995 мкг/кг, а преобладают перилен, коронен и бенз(а)пирен.

Выводы

Представленные количественные оценки – первый этап анализа нагрузок автотранспорта состояние городских водоемов. Дальнейшие этапы исследования включают оценки концентраций ПАУ, ассоциированных с ТЧ различных диаметров, и сформировавшихся при выбросах различными «компонентами» дорожной сети – собственно покрытием, АТС. Работа представляется крайне актуальной, поскольку, как показано в Табл. 1, максимальные количества загрязнителей поступают в связи с истиранием асфальта; даже увеличение доли электротранспорта не позволит снизить это количество. Планируется оценить активность миграции ПАУ в водные объекты с поверхностным стоком и риски загрязнения подземных вод как маркер поступления поллютантов. Оценка активности миграции ПАУ показывает избирательность проникновения ПАУ через геохимические границы, что требует построения многокомпонентных («многосредовых») моделей миграции и аккумуляции ПАУ, поступающих в водные объекты за счет транспортной активности.

Список литературы

1. Доклад о состоянии окружающей среды в городе Москве в 2022 году. URL: <https://www.mos.ru/eco/documents/doklady/view/288938220/> – Проверено 16.08.2023.
2. Кутенев В.Ф., Степанов В.В., Азаров В.К. О реальном выбросе твердых частиц автомобильным транспортом // Журнал автомобильных инженеров, 2013, №4(81). С. 45-47.
3. Леванчук А.В. Загрязнение окружающей среды продуктами эксплуатационного износа автомобильно-дорожного комплекса // Гигиена и санитария, 2014, Т. 93, №. 6. С. 17-21.
4. Опекунов А.Ю., Митрофанова Е. С., Опекунова М.Г. Техногенная трансформация состава донных отложений рек и каналов Санкт-Петербурга // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология, 2017, №. 4. С. 48-61.
5. Редина М.М., Хаустов А.П. Предварительные результаты оценки транспортной нагрузки на кампус РУДН и Юго-Западный лесопарк // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности, 2022, Т. 30, № 1. С. 86–91.
6. Ho K. F. et al. Emissions of gas-and particle-phase polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the Shing Mun Tunnel, Hong Kong // Atmospheric Environment, 2009, Vol. 43, 40. Pp. 6343-6351.
7. Khaustov A., Redina M. Justification of geochemical markers of the soil–plant system state for a local model of traffic pressure // Arab. J. of Geosci, 2021, № 14(24).
8. Khaustov A.P., Kenzhin Zh.D., Redina M.M., Aleinikova A.M. Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Soil–Plant System as Affected by Motor Vehicles in Urban Environment // Eurasian Soil Science, 2021, Vol. 54(7). Pp. 1107–1118.
9. Knecht U., Elliehausen H. J., Judas W. & Weitowitz H. J. (1987) Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) in Abraded Particles of Brake and Clutch Linings, International Journal of Environmental Analytical Chemistry, Vol. 28(3). Pp. 227-236.
10. Murakami M., Nakajima F., Furumai H. Size-and density-distributions and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road dust // Chemosphere, 2005, Vol. 61, №. 6. Pp. 783-791.

Использование тяжелых изотопов кислорода и водорода в качестве естественных трассеров для определения доли талого стока в бассейне горной реки

В.А. Хомякова^{1*}, Е.П. Рец², Е.Д. Корнилова², А.В. Козачек¹, А.А. Екайкин¹

¹*Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, Россия*

²*Институт Водных проблем РАН, г. Москва, Россия
circuma162@gmail.com*

Аннотация: В свете наблюдающейся дегляциации особенно актуальными становятся вопросы водообмена в бассейнах с ледниковым питанием. Реакция водных систем на происходящие изменения требует комплексного подхода к изучению. Один из методов изучения водообмена в горных бассейнах – расчленение гидрографа на генетические составляющие. В настоящей работе предпринята попытка расчленения гидрографа стока реки Баксан, расположенной на Северном Кавказе. В качестве трассера был выбран изотоп кислорода с атомной массой 18, в качестве компонентов стока – снег, лед и жидкие осадки. В статье также предложен подход к проведению границы снежного покрова на льду по спутниковым снимкам Landsat. Согласно полученным результатам, дождевой сток, в среднем, составляет менее 35 % во всех створах. Его доля закономерно возрастает от верхнего течения к нижнему. В середине сезона доля дождевых вод не превышает 20 % на верхних створах и 30 % на нижних, а в конце сезона увеличивается до 25 % и 40 %, соответственно. Так, талые воды значительно преобладают в стоке на всем протяжении летнего сезона.

Ключевые слова: расчленение гидрографа, дегляциация, река с ледниковым питанием, стабильные изотопы воды.

Tracing glacial runoff contribution using stable water isotopes on the mountain catchment

V.A. Khomiakova^{1*}, E.P. Rets², E.D. Kornilova², A.V. Kozachek¹, A.A. Ekaykin¹

¹*Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia*

²*Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
circuma162@gmail.com*

Abstract: More and more vital investigations on glacial rivers become on the background of ongoing deglaciation. Complex approach is needed to fully investigate the processes taking place on glacial watersheds. Hydrograph separation based on natural tracers is one of the actively developing methods of runoff investigation. Here we present the first-order try of hydrograph separation for the glacial river Baksan situated on Northern Caucasus. Oxygen-18 was used as a tracer and the flow compartments are snow, ice and liquid precipitations. We also propose a new method to distinguish between snow and ice on the Landsat images. The results show, that the amount of water originated from liquid precipitations does not exceed 35% on average at all the gauges. Share of this water increases downstream. At the middle of summer, the share is less than 20% on the upper gauges and

less than 30 % on the lower ones. At the end of summer, liquid precipitations input rises to 25% and 40%, respectively. Thus, melt water prevails significantly during all the three summer months.

Keywords: hydrograph separation, deglaciation, mountain catchment, stable isotopes of water.

Введение

В настоящее время в пределах целого ряда горных систем наблюдается деградация ледников (отступление границ их языков) [4, 5]. Это вызывает обеспокоенность ученых не только как природный феномен. От объема ледникового питания зависит сток рек, в низовьях которых зачастую расположены крупные населенные пункты. Понимание роли различных источников в формировании стока рек с ледниковым питанием поможет спрогнозировать реакцию этих рек на изменение площади оледенения и возможную полную деградацию ледников в будущем [4].

Расчленение гидрографа на генетические составляющие с помощью естественных трассеров – один из методов изучения формирования стока, широко применяемый для бассейнов с ледниковым питанием [6, 7]. В качестве трассеров могут быть использованы как общая минерализация, так и отдельные ионы, атомы или молекулы. Так, в данной работе в качестве трассера был использован тяжелый изотоп кислорода с атомной массой 18.

В настоящей работе представлена попытка расчленения гидрографа стока горной реки Баксан, протекающей на северном склоне Большого Кавказа, на две составляющие: талый сток и дождевой сток. Под талым стоком мы подразумеваем талые воды сезонного снега и ледников, расположенных в верховьях бассейна. Под дождевым стоком мы подразумеваем долю дождевых вод, попавших на водосбор непосредственно в результате того или иного события осадков. Помимо этого, в работе представлен новый способ дешифрирования снега и льда по спутниковым снимкам Landsat 8.

Материалы и методы

Пробы на содержание тяжелых изотопов отбирались в течение трехлетних сезонов (2020-2022 гг.) в четырех створах, расположенных на реке Баксан, и одном створе на ее малом притоке – реке Джанкуат. Пробы отбирались сериями по 5-6 раз за сезон с приблизительно равным интервалом, без привязки к определенным событиям. Событийные пробы осадков отбирались на станции Азау в течение 2019-2021 гг.

Измерения проводились в лаборатории ЛИКОС Арктического и Антарктического института (ААНИИ) на лазерном анализаторе Picarro 2130. До момента измерений пробы хранились охлажденными в герметичных пробирках. Значения содержания тяжелого кислорода приведены в промилле относительно стандарта VSMOW-2 (Vienna Standard Mean Ocean Water).

В основе генетического расчленения гидрографа с использованием естественных трассеров лежит уравнение водного баланса. При этом, должны выполняться следующие условия [7]:

1. Каждая из составляющих стока имеет значимо отличный от другой изотопный состав (содержание кислорода-18);
2. В бассейне нет значимого притока вод другого генезиса с другим изотопным составом.

Если первое условие в данном случае полностью выполнено (см. табл. 1), то второе условие выполнено условно, поскольку можно считать, что доля грунтового питания с большим временем водообмена в данном случае пренебрежимо мала [3, 4]. Так, для

расчленения гидрографа на талую и дождевую составляющую были использованы следующие уравнения:

$$\begin{cases} Q_m + Q_p = Q \\ C_m Q_m + C_p Q_p = C Q \end{cases}$$

где Q_m – расход талой составляющей стока, Q_p – расход дождевой составляющей стока, C_m и C_p – концентрации ^{18}O в талом и дождевом стоке, соответственно. Отсюда:

$$f_p = \frac{Q_p}{Q} = \frac{(C - C_s)}{(C_p - C_s)}$$

Определение изотопного сигнала (содержания кислорода-18) для жидких и твердых осадков было выполнено по данным пробоотбора на станции Азау. Пропущенные значения были восстановлены по связи содержания тяжелого кислорода и приземной температуры воздуха. Значения для снега были рассчитаны как средневзвешенное по количеству осадков за весь сезон. Значения для жидких осадков рассчитывались для трех дней, предшествующих дате отбора проб из реки, также как средневзвешенное. Для определения количества осадков использовались данные шести метеостанций, расположенных в бассейне.

Изотопный сигнал для льда был принят по данным из литературных источников [1, 2, 3]. Значения содержания ^{18}O для трех компонентов стока представлены в Табл.

Табл. Изотопный сигнал компонентов стока.

	Изотопный сигнал компонентов стока, ‰			
	Лед	Снег	Талая составляющая	Жидкие осадки
2020	-15.78	-16.11		-4.87
19.06	<i>0.04*</i>	<i>0.96</i>	-16.09	-6.29
3.07	<i>0.11</i>	<i>0.89</i>	-16.07	-4.57
22.07	<i>0.44</i>	<i>0.56</i>	-15.96	-2.49
11.08	<i>0.64</i>	<i>0.36</i>	-15.90	-3.29
24.08	<i>0.75</i>	<i>0.25</i>	-15.86	-7.47
1.09	<i>0.77</i>	<i>0.23</i>	-15.85	-5.08
2021	-15.78	-13.44		-3.51
4.06	<i>0.01</i>	<i>0.99</i>	-13.47	-5.37
24.06	<i>0.05</i>	<i>0.95</i>	-13.56	-2.87
12.07	<i>0.26</i>	<i>0.74</i>	-14.06	-2.01
16.07	<i>0.30</i>	<i>0.70</i>	-14.14	-2.67
1.08	<i>0.49</i>	<i>0.51</i>	-14.59	-4.62

*курсивом приведено отношение площади снежного покрова к площади открытого льда по результатам анализа снимков Landsat 8.

Как известно, в бассейне одновременно таянию подвергаются различные слои снега и открытого льда, в зависимости от высоты и экспозиции склона. Соотношение площадей снежного покрова и открытого льда было принято по снимкам Landsat 8 для дат пробоотбора из реки (Табл.). При этом, был использован новый метод дешифрирования. Его суть заключается в установлении порогового значения яркости в каналах видимого спектра, что позволяет отличить снег и облачность ото льда.

Аналогично, установление порогового значения в инфракрасном канале позволяет отделить на снимке облака от площадей открытого снега.

Пространственная неоднородность оценивалась по методу накопления ошибок (Гаусса) [8] для всех компонентов стока. Пределы погрешности показаны на Рис. 2.

Результаты и выводы

Сезонный ход расхода воды. Расход воды на реках с ледниковым питанием зависит от количества снега, выпавшего на водосбор. Его сезонные ход во многом определяется температурой воздуха. Гидрограф имеет форму купола, т.к. максимальные расходы приходятся на середину сезона, когда таяние снега на водосборе наиболее интенсивно. К концу сезона расходы снижаются, поскольку сезонный снежный покров сходит, как правило, в середине-конце июля. Отдельные ливневые дожди придают гидрографу пилообразные очертания, сказываясь на расходах воды кратковременными паводками. При этом, паводки в большей степени выражены на нижних створах, чем на верхних.

Сезонный ход содержания тяжелого кислорода. Сезонный ход содержания тяжелого кислорода отражает ход расхода воды. В начале сезона, когда емкость подземных водоносных структур еще не наполнена талыми водами, изотопный состав стока тяжелее, и облегчается к середине сезона. Минимальные значения содержания кислорода-18 совпадают с максимальными значениями расхода воды (в дни, не отмеченные прохождением паводков), что говорит о достаточно высокой скорости водообмена. В дни прохождения паводков изотопный состав принимает наиболее тяжелые значения, особенно если паводки приходятся на начало или конец сезона (Рис. 1).

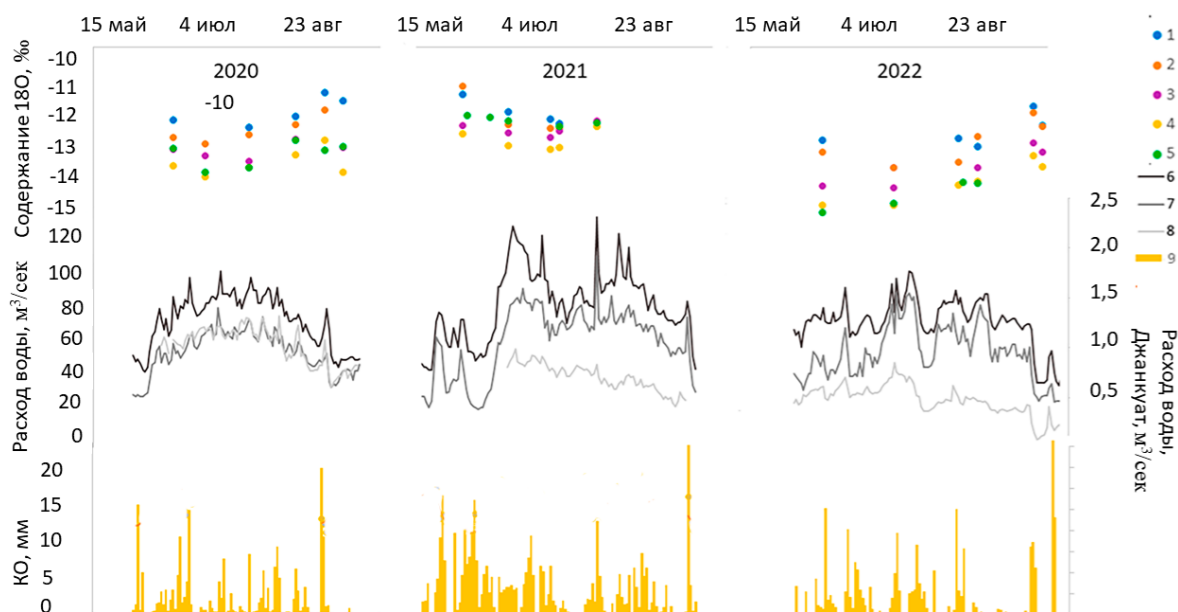


Рис. 1 Фактические данные.

Расчленение гидрографа. По результатам расчленения гидрографа, дождевой сток составляет, в среднем, от 72% до 88% на верхних створах и от 63% до 81% на нижних. В бассейне реки Джанкуат доля талого стока, по максимальным оценкам, составляет 100% в начале и в середине летнего сезона, опускаясь до 87-90% к концу сезона. Так, видно, что доля талого стока закономерно уменьшается от верхнего течения к нижнему.

Во время прохождения дождевого паводка в 2021 году, доля дождевых вод на посту Исламей превысила 50% (по средней оценке), и 35% на посту Эльбрус. Так, во

время прохождения дождевых паводков, доля вновь поступившей на водосбор воды достаточно велика.

Межгодовая изменчивость изотопного состава. Межгодовая изменчивость изотопного состава воды р. Баксан выражена достаточно явно (Рис. 1). Это говорит о том, что сезонный снег (который имеет значительно различный изотопный состав от года к году) составляет большую роль в стоке, чем талые воды ледников, изотопный состав которых может считаться постоянным. Это также говорит о малом времени водообмена, которое, по всей видимости, составляет менее одного года для более чем 80% стока.

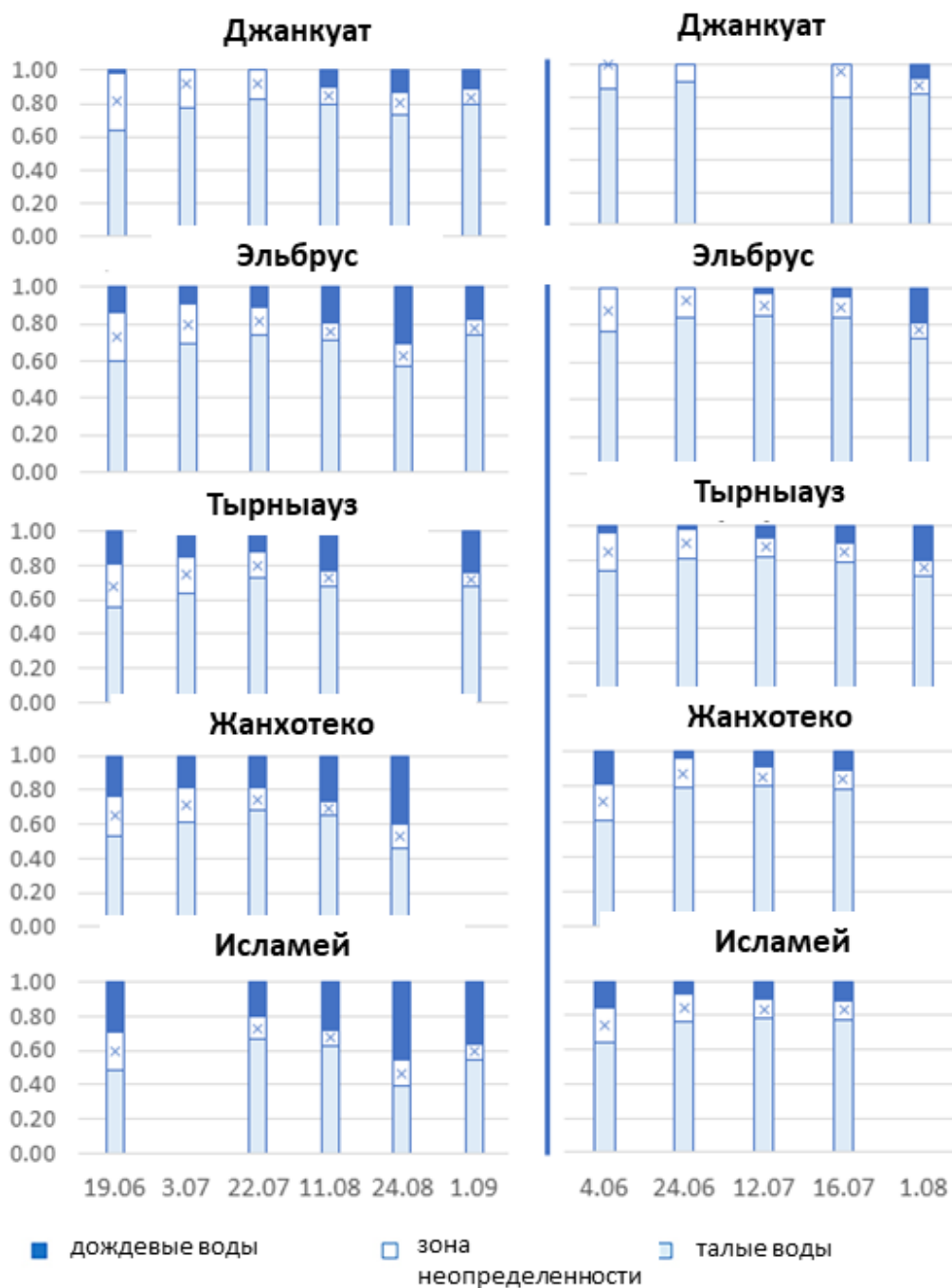


Рис. 2 Доли талых и дождевых вод на даты пробоотбора (крестом обозначены средние оценки).

Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН номер FMWZ-2022-0001, тема 1.6.

Acknowledgments

The study was supported by the Governmental Order to Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, subject no FMWZ-2022-0001, topic 1.6

Список литературы

1. Васильчук Ю.К., Чижова Ю.Н., В. Папеш В., Буданцева Н.А. Изотопный состав языка ледника Большой Азау в Приэльбрусье // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 1, с. 56–68
2. Козачек А.В., Екайкин А.А., Михаленко В.Н., Липенков В.Я., Кутузов С.С. Изотопный состав ледяных кернов, полученных на Западном плато Эльбруса // Лёд и Снег · 2015 · Т. 55 · № 4
3. Чижова Ю.Н., Буданцева Н.А., Рец Е.П., Лошакова Н.А., Поповнин В.В., Васильчук Ю.К. Вариации изотопно-кислородного состава талого стока ледника Джанкуат на Центральном Кавказе // Вест. Моск. Ун-та. Сер.5. География. 2014. №6
4. Чижова Ю.Н., Рец Е.П., Васильчук Ю.К., Токарев И.В., Буданцева Н.А., Киреева М.Б. Два подхода к расчёту расчленения гидрографа стока реки с ледниковым питанием с помощью изотопных методов // Лёд и Снег · 2016 · Т. 56 · № 2
5. Belozero E., Rets E., Petrakov D., and Popovnin V. Modelling glaciers' melting in Central Caucasus (the Djankuat and Bashkara Glacier case study) // E3S Web of Conferences 163, 01002 (2020)
6. Hoeg, S., Uhlenbrook, S., and Leibundgut, Ch. Hydrograph separation in a mountainous catchment — combining hydrochemical and isotopic tracers // Hydrol. Process. V. 14, P. 1199-1216 (2000)
7. Penna D. and van Meerveld H.J. Spatial variability in the isotopic composition of water in small catchments and its effect on hydrograph separation // WIREs Water. 2019; e1367.
8. Genereux D.P. 1998. Quantifying uncertainty in tracer-based hydrograph separation // Water Resources Research 34(4): 915 – 919

Математическое моделирование кислородного обмена между атмосферой и озером во время развития термобара

Б.О. Цыденов

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия
tsydenov@math.tsu.ru*

Аннотация. В работе представлено описание негидростатической модели кислородного обмена между атмосферой и озером. С ее помощью получены пространственно-временные распределения растворенного кислорода во время развития весеннего термобара на примере Баргузинского залива озера Байкал. Показано, что за счет эффекта термобара в водоеме формируются области с разным уровнем кислорода: концентрация растворенного кислорода в литорали выше, чем в пелагиали. Результаты актуальны для прогнозирования и мониторинга экологического состояния пресноводного озера в целях принятия своевременных мер по предотвращению и ликвидации опасных ситуаций антропогенного и природного характера.

Ключевые слова: математическая модель, термобар, растворенный кислород, экосистема водоема, Баргузинский залив, озеро Байкал.

Mathematical modeling of oxygen exchange between air and water during the thermal bar

B.O. Tsydenov

*Tomsk State University, Tomsk, Russia
tsydenov@math.tsu.ru*

Abstract. This paper describes a non-hydrostatic model of oxygen exchange between atmosphere and lake surface water. Based on the model proposed, space-time distributions of dissolved oxygen were obtained during the spring thermal bar in Barguzin Bay of Lake Baikal. It was shown that areas with different oxygen content are formed in the lake due to the effect of the thermal bar. The concentrations of dissolved oxygen in the littoral is higher than in the pelagic zone. The results are relevant for forecasting and monitoring the ecological state of a freshwater lake to take measures to prevent and eliminate dangerous situations of anthropogenic and natural origin.

Keywords: mathematical modeling, thermal bar, dissolved oxygen, lake ecosystem, Barguzin Bay, Lake Baikal.

Введение

В озерах умеренных широт весной и осенью функционирование природного явления, представляющего собой узкую зону погружения вод в районе температуры максимальной плотности ($\sim 4^\circ\text{C}$) – *термобара* [4] – приводит к аккумуляции в прибрежной части водоема планктона, мелких частиц мусора и прочих загрязнителей. Значение термобара в экологии димиктического озера многогранно. Термобар, ограничивая горизонтальный водообмен, делит озеро на две обособленные области (теплоактивную в литорали и теплоинертную в пелагиали [3]), отличающиеся друг от друга по физическим, химическим и биологическим характеристикам. Вместе с тем, вертикальные потоки, формирующиеся на месте термобара, способствуют переносу кислорода и взвешенных веществ в глубоководную зону.

Важнейшим индикатором качества воды и благополучия водоема служит уровень растворенного кислорода. Кислород участвует в жизненном цикле гидробионтов, процессах окисления органических примесей и самоочищения водных систем. Резкое снижение содержания кислорода в воде может привести к эвтрофированию водоема и гибели эндемичных аэробных организмов. В связи с этим проблема создания численной модели, учитывающей динамику растворенного кислорода во время существования термобара, является актуальной для современного этапа развития математических методов в задачах лимнологии.

Цель настоящей работы – описание математической модели кислородного обмена между атмосферой и озером, а также численное воспроизведение на ее основе динамики растворенного кислорода в период развития весеннего термобара.

Математическая модель и методы исследования

Динамика растворенного кислорода в озере описывается с помощью конвективно-диффузионного уравнения

$$\frac{\partial[O_2]}{\partial t} + \frac{\partial u[O_2]}{\partial x} + \frac{\partial w[O_2]}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial[O_2]}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial[O_2]}{\partial z} \right) + F_{air-lake} d^{-1},$$

где O_2 – концентрация растворенного кислорода; u и w – горизонтальная и вертикальная составляющие скорости соответственно; D_x и D_z – коэффициенты турбулентной диффузии в соответствующих направлениях, d – глубина.

Параметризация поступления атмосферного кислорода в озеро реализована с учетом растворимости кислорода в воде [5] и изменения скорости ветра на поверхности водоема [10].

Обмен кислородом между атмосферой и озером описывается формулой

$$F_{air-lake} = \nu k_{O_2} (O_2^* - O_2).$$

Для вычисления концентрации насыщения воды кислородом O_2^* используется следующая аппроксимация табличных значений [6] в диапазоне температур $0-20^\circ\text{C}$:

$$O_2^* = 456.96 - 12.86 \cdot T_C + 0.2771 \cdot T_C^2 - 0.0033 \cdot T_C^3,$$

где T_C – температура воды в $^\circ\text{C}$.

Скорость переноса кислорода из газовой фазы в жидкую рассчитывается [10]

$$\nu k_{O_2} = 0.31 U_{10}^2 \sqrt{\frac{Sc_{CO_2}}{Sc_{O_2}}},$$

где $U_{10} = \sqrt{u_{10}^2 + v_{10}^2}$ – скорость ветра, Sc_{CO_2} и Sc_{O_2} – число Шмидта для CO_2 и O_2 соответственно (для пресной воды $Sc_{O_2} = 1800.6 - 120.1 \cdot T_C + 3.7818 \cdot T_C^2 - 0.047608 \cdot T_C^3$ и $Sc_{CO_2} = 1911.1 - 118.11 \cdot T_C + 3.4527 \cdot T_C^2 - 0.04132 \cdot T_C^3$).

Осуществлено сопряжение вышеописанной модели с термогидродинамической моделью [9].

В качестве области исследования выбрано вертикальное сечение Баргузинского залива озера Байкал, начало системы координат совпадает с устьем р. Баргузин (Рис. 1, *a*). Вычислительная область имеет длину 20 км и глубину 100 м (Рис. 1, *б*). Расчётная область покрыта равномерной ортогональной сеткой с шагами $h_x=25$ м и $h_z=2.5$ м. Шаг по времени – 10 с.

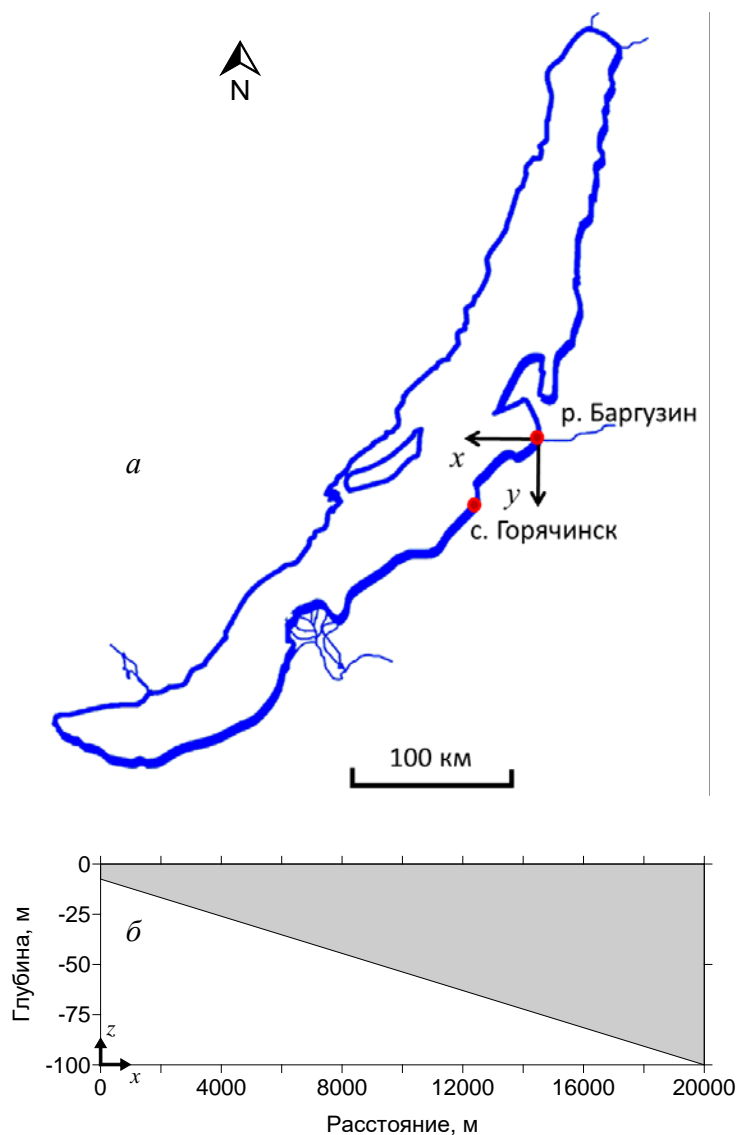


Рис. 1 Схема разреза оз. Байкал (*a*) и геометрия вычислительной области (*б*).

Начальное распределение температуры воды в озере принято равным 3°C , что приблизительно соответствует осредненным данным вертикального распределения температуры верхнего 100-метрового слоя в средней котловине озера Байкал в июне месяце [8]. Температура воды в устье р. Баргузин монотонно растет с 12 до 18°C . Минерализация воды в озере составляет 96 мг/л [8], в реке – 149 мг/л [1]. Скорость течения р. Баргузин при впадении в озеро – 0.5 см/с. Сдвиговое напряжение ветра и компоненты тепловых потоков, поступающих на водное зеркало, вычислены согласно данным из архива погодных условий метеостанции с. Горячинск за июнь 2023 г. [2]. Начальная концентрация растворенного кислорода в озере – 312 ммоль $\text{O}_2/\text{м}^3$. Значение геотермального теплового потока задано равным нулю.

Задача решается численно методом конечного объема, согласно которому скалярные величины (концентрация растворенного кислорода, температура воды, турбулентные характеристики и т.д.) определяются в центре сеточных ячеек, а компоненты вектора скорости – в середине граней ячеек. Для приближения вычислительной области к геометрии профиля дна водоема используется метод блокировки фиктивных областей [7]. Согласование рассчитываемых полей скорости и давления осуществляется с помощью оригинальной процедуры SIMPLER для течений с плавучестью, которая корректирует эти поля с учетом вариации плотности [9]. Решение системы разностных уравнений проводится методом Н.И. Булеева на каждом шаге по времени.

Результаты и выводы

Построенное на основе численного моделирования распределение температуры показывает, что на 10 сут местоположение термобара находилось на расстоянии 6.7 км от устья р. Баргузин (Рис. 2). Прогрев воды в приустьевой части залива обеспечивался преимущественно речным притоком. Приведенные на Рис. 2 изотермы, представляющие собой наклонные профили, направленные от подводного склона (на дне) в сторону открытого озера (на поверхности), имеют классическую структуру [4; 5]. Это указывает о слабом влиянии ветра на процессы перемешивания в водоеме.

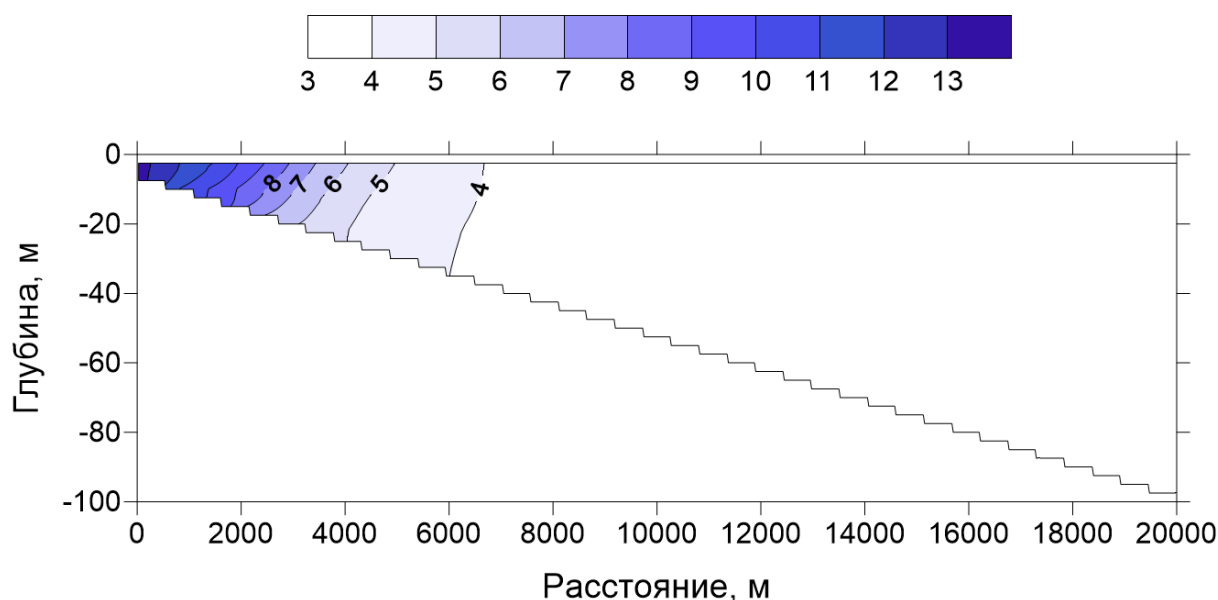


Рис. 2 Распределение температуры [°C] на 10 сут моделирования.

Интенсивное насыщение воды кислородом происходит в теплоактивной области (Рис. 3), максимальное значение концентрации растворенного кислорода (>346 ммоль O_2 /м 3) локализовано на поверхности водоема на расстоянии 4.5 км от берега. В теплоинертной области кислород распределен преимущественно вертикально однородно.

Проведенные расчеты продемонстрировали, что генерируемые термобаром течения способствуют увеличению количества растворенного кислорода в теплоактивной области. Вследствие деятельности термобара в водоеме формируются участки с разным уровнем кислорода. В литоральной (слева от фронта термобара) и пелагиальной (справа от фронта термобара) частях озера наблюдается не только количественное, но и качественное различие результатов (Рис. 3). Полученные в ходе исследования данные подтверждают барьерную функцию термобара.

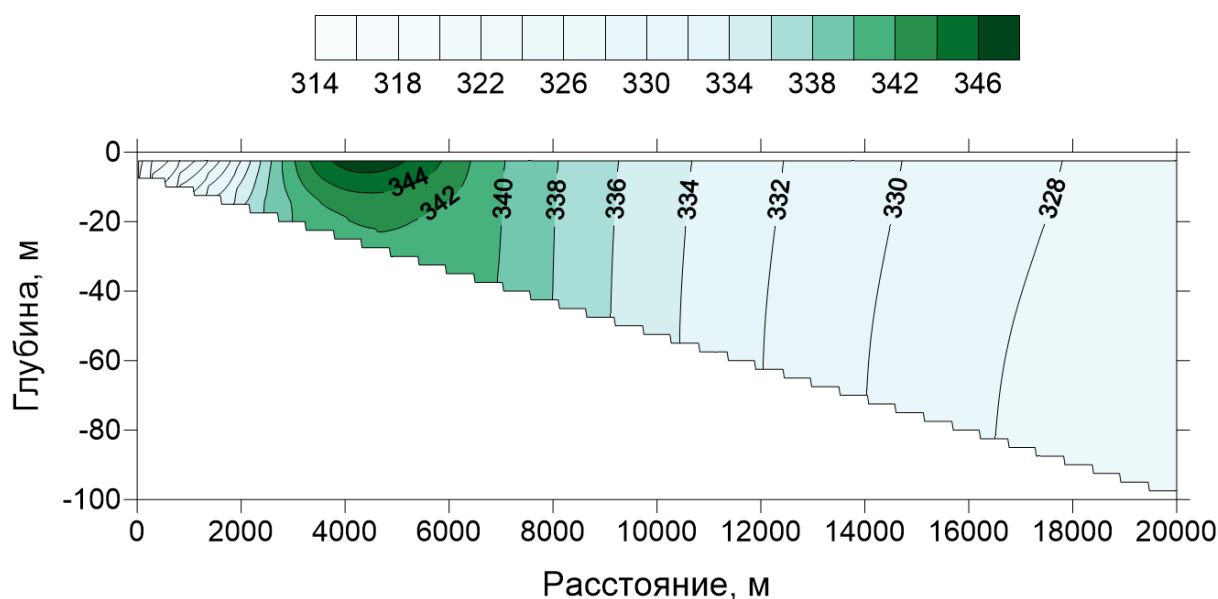


Рис. 3 Распределение растворенного кислорода [ммольО₂/м³] на 10 сут моделирования.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-71-10020, <https://www.rscf.ru/project/23-71-10020/>

Acknowledgments

This study was funded by the Russian Science Foundation (project No.23-71-10020, <https://www.rscf.ru/en/project/23-71-10020/>)

Список литературы

1. Вотинцев К.К. Гидрохимия. В кн.: Проблемы Байкала / Отв. ред. Г.И. Галазий, К.К. Вотинцев. Новосибирск, 1978. 16(36). С. 124-146.
2. Расписание Погоды. Доступна online: <https://rp5.ru/>. Дата обращения: 14.08.2023.
3. Тихомиров А.И. Термика крупных озер. Л.: Наука, 1982. 232 с.
4. Forel F.A. La congélation des lacs suisses et sovoyards pendant l'hiver 1879-1880. 11 - Lac Léman // L'Écho des Alpes. 1880. 3. P. 149-161.
5. Garcia H.E., Gordon L.I. Oxygen solubility in seawater: Better fitting equations // Limnol. Oceanogr. 1992. 37 (6). P. 1307-1312.
6. Oxygen – Solubility in Fresh and Sea Water vs. Temperature. Engineering ToolBox. 2005. Доступна online: https://www.engineeringtoolbox.com/oxygen-solubility-water-d_841.html. Дата обращения: 14.08.2023.
7. Patankar S. Numerical heat transfer and fluid flow. CRC Press. 1980. 214 p.
8. Shimaraev M.N., Verbolov V.I., Granin N.G., Sherstyankin P.P. Physical Limnology of Lake Baikal: A Review. Irkutsk–Okayama, 1994. 81 p.
9. Tsydenov B.O., Kay A., Starchenko A.V. Numerical modeling of the spring thermal bar and pollutant transport in a large lake // Ocean Modelling. 2016. 104. P. 73-83.
10. Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange // J. Geophys. Res. 1992. 97. P. 7373-7382.

О надежности оценок лавинной опасности

П.А. Черноус

*Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН,
г. Южно-Сахалинск, Россия
pchernous48@gmail.com*

Аннотация. Рассмотрены вопросы, касающиеся качества оценок лавинной опасности. Проанализирован практический опыт и нормативные документы, регулирующие оперативное оценивание лавинной опасности и оценивание при инженерных изысканиях для строительства. На примерах, оценено качество исходных данных и методов, используемых для определения характеристик лавинной опасности. Показана невозможность корректного оценивания качества некоторых формулировок прогнозов лавинной опасности и их низкая информативность для потребителей. Обсуждаются возможности повышения качества оценок лавинной опасности и необходимость совершенствования нормативной базы, регулирующей такие оценки.

Ключевые слова: характеристики лавин, методы оценивания, прогнозирование, источники ошибок, точность, возможности совершенствования

On the reliability of avalanche risk assessments

P.A. Chernous

*Special research bureau for automation of marine research FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
pchernous48@gmail.com*

Abstract. Issues related to the quality of avalanche danger assessments are considered. The practical experience and regulatory documents governing the operational assessment of avalanche danger and assessment during engineering surveys for construction are analyzed. Using examples, the quality of the initial data and methods used to determine the characteristics of avalanche danger was assessed. The impossibility of correct assessment of the quality of some formulations of avalanche danger forecasts and their low information content for consumers are shown. The possibilities of improving the quality of avalanche risk assessments and the need to improve the regulatory framework governing such assessments are discussed.

Keywords: avalanche characteristics, estimation methods, forecasting, error sources, accuracy, improvement opportunities.

Введение

Существенный ущерб от лавин связан с неточным определением лавинной опасности. Ошибки связаны с недостаточными знаниями о механизмах возникновения и движения лавин, несовершенными моделями их описывающих, а также крайне бедной и не точной исходной информацией для этих моделей. В ситуации, когда надежных оценок нет, потребителю важно знать параметры возможных ошибок. Но никаких указаний на обязательное указание надежности оценок в государственных нормативных документах нет. Большинство методик определения характеристик лавинной опасности прошли лишь авторскую проверку надежности. В настоящей работе в качестве характеристик лавинной опасности рассматриваются различные атрибуты лавинопроявления, – характеристики возникновения и движения лавин. Как оперативное оценивание

лавиной опасности, так и оценивание лавинной опасности при инженерных изысканиях для строительства (оценивание для планирования использования территорий), имеют много общего. Это методы прогнозирования возможных характеристик лавинопроявления различных пространственных и временных масштабов. В качестве таких характеристик могут выступать как собственно события схода или не схода лавин, объемы лавин их скорости, ударные давления, высоты фронта и т.п., так и их вероятности, отнесенные к определенным участкам территории и периодам времени. Целью настоящей работы является анализ качества оценок лавинной опасности при оперативном прогнозировании и инженерных изысканиях для строительства и возможностей его повышения.

Причины ошибок оценок лавинной опасности

Причинами ошибочных оценок лавинной опасности являются ошибки исходных данных, связанные с ошибками измерений и пространственно-временной изменчивостью характеристик метеорологических полей и полей физико-механических характеристик снежного покрова, а также неадекватность расчетных прогностических моделей и субъективных интерпретаций реальным процессам лавинообразования. Ошибки измерений метеорологических характеристик на метеостанциях, таких как скорость ветра, температура воздуха, высота снега и некоторых других обычно незначительные. На результаты прогнозирования влияют мало. Ошибки определения осадков и метелевого переноса в зависимости от используемой методики могут быть значительными и оказывать существенное влияние на оценку лавинной опасности. Все метеорологические измерения проводятся вне лавиноопасных зон. Это же можно сказать и об измерениях физико-механических характеристик снега. Если точность измерений плотности и температуры снега, имеющимися методами, вполне приемлема, то ошибки определения временного сопротивления сдвигу и разрыву снега весьма велики [5].

Часть эмпирических методик связывает оценку лавинной опасности с результатами наблюдений на близлежащих площадках. Для построения таких алгоритмов интерпретации данных измерений необходимы длинные ряды наблюдений, а также за лавинами в районе, где они прогнозируются. В силу редкости случаев схода лавин, для создания более надежных методов прогнозирования нужны очень длительные ряды наблюдений. На статистическую однородность выборок могут оказывать влияние различного вида антропогенные воздействия. Кроме того, время схода лавин очень редко фиксируется точно. Обычно его можно указать с точностью до суток, иногда до нескольких суток. Для больших лавин обычно определяются геометрические характеристики лавин. Как правило путь схода лавины и ее отложения отмечаются на карте непосредственно в поле либо во время камеральной обработки по фотографиям. Наиболее точно в оперативной работе эти характеристики определяются с помощью теодолитной съемки. Но для большинства лавин указываются характеристики, определенные глазомерно. Данных о точности таких оценок нет, но имеющийся опыт говорит, например, что оценки объемов лавинных отложений, выполненные различными наблюдателями, могут различаться в разы.

Ряд методик оценки лавинной опасности основывается на данных, привязанных не к месту их наблюдения, а к лавинному очагу. Это позволяет увеличить размеры выборок, объединяя данные, полученные для различных очагов. Единственный метод получения таких данных — это пространственная интерполяция (экстраполяция). Ее точность сильно зависит от пространственной изменчивости предикторов. Ошибки такой трансформации значений метеорологических характеристик и физико-механических характеристик снега, измеренных на постоянных участках, могут быть очень большими [5].

Применение некоторых моделей оценки лавинной опасности требует использования прогностических значений характеристик погоды и климата. Здесь можно ориентироваться на качество краткосрочных погоды общего пользования, но качество климатических прогнозов оценить невозможно. Результаты прогнозирования климатических характеристик с помощью различных моделей могут существенно различаться. Кроме того, они имеют низкое для оценки лавинной опасности пространственное разрешение.

Часть ошибочных оценок лавинной опасности связана с несовершенством используемых для определения характеристик лавинной опасности моделей. Эти модели учитывают лишь небольшое количество наиболее информативных влияющих факторов. Использованию более сложных и надежных моделей препятствуют отсутствие необходимых для моделирования исходных данных и недостаточная изученность процессов возникновения и движения лавин.

Вышесказанное относится к методам прогнозирования, основанных на расчетах. В то же время, часто при оперативном прогнозировании лавинной опасности, окончательно прогноз формируется субъективно. Эксперименты по оценке качества прогнозирования характеристик лавинной опасности отдельными прогнозистами проводились в противолавинной службе компании «Апатит», но связи между качеством оценок, образовательным уровнем и стажем работы выявить не удалось. Вклад влияния каждого из факторов на ошибки прогнозов оценить в каждом конкретном случае очень сложно.

Методы оценки надежности определения лавинной опасности

Существует много методов оценки надежности прогнозирования. Не все они подходят для оценки надежности лавинных прогнозов. Основным ограничением для их применения является редкость самого события схода лавины в отдельном лавиносборе. Сход лавин с опасными характеристиками происходят еще реже. Это не позволяет получить ряды фактических данных о сошедших лавинах для сравнения их с прогнозными. Для детерминированных прогнозов есть возможность оценки отдельного прогноза, сравнивая его с реальным лавинопроявлением. Если прогноз сформулирован в вероятностной форме, то оценить надежность отдельного прогноза не представляется возможным. Качество такого прогнозирования возможно оценить лишь на основании большой совокупности прогнозных и фактических данных. В некоторых случаях можно оценивать характеристики лавинной опасности, отнесенные к территориям с большим количеством лавиносборов. В этом случае можно увеличить размер совокупности, по которой производится оценка. Но для потребителей такой обобщенный прогноз является менее ценным. Наиболее полное представление о надежности категорических прогнозов дают матрица сопряженности прогнозов и фактического лавинопроявления и рассчитанные на ее основе различные критерии (оправдываемость, предупрежденность, критерии Пирси-Обухова, Багрова, Обухова) [2]. Надежность вероятностных прогнозов можно оценить с помощью критерия Брайера [2].

Особенности оперативного оценивания лавинной опасности

Под оперативной оценкой лавинной опасности понимается ее прогноз небольшой заблаговременности. Как правило, до нескольких суток. В качестве предиктанта понимается событие некоторое событие, связанное со сходом лавины (часто просто сход), либо его вероятность. В пространстве прогнозы могут относиться к отдельным лавиносборам либо их группам на территориях от тысяч квадратных метров до тысяч квадратных километров. Фоновые прогнозы для территорий в десятки и сотни квадратных километров в таком виде малоинтересны. Для потребителей наибольшую ценность представляют детальные прогнозы. Они же являются наиболее сложными.

Детальное прогнозирование часто применяется в организациях, ведущих хозяйственную деятельность в горах и имеющих в своем составе противолавинные службы. От них, как правило, требуют безусловно точных категорических оценок лавиноопасных ситуаций. Это своего рода перекалывание ответственности на противолавинную службу и ее работников, хотя в условиях существующей неопределенности они не могут безошибочно идентифицировать ситуации. Понимая возможную ошибочность прогнозов, прогнозист хотел бы указать на нее в формулировке прогноза. Иногда используемые категорические формулировки «лавиноопасно» обозначают, что сошедшая лавина будет опасна для объекта или просто достигнет его. Т.е., при формулировке «не лавиноопасно» менять режим деятельности на территории лавиносбора нет необходимости. При использовании вероятностно-статистических и некоторых других моделей прогнозирования, прогноз лавинной опасности дается в вероятностной или квазивероятностной форме (шансы, адекватность и др.). Одной из проблем использования этих прогнозов является отсутствие нормативов допустимых показателей. Считается, что лучшим вариантом оценки лавинной опасности будет результат моделирования, скорректированный с учетом знаний и опыта прогнозиста. Возможно в большинстве случаев так оно и есть, но это не очевидно. Имеются и другие примеры, когда составленные таким образом субъективные прогнозы оказывались хуже расчетных [4]. Особенно это может касаться случаев, когда противолавинная служба является структурой организации ведущей хозяйственную деятельность на лавиноопасной территории. В такой ситуации прогнозист невольно пытается учесть цены потерь от ошибок возможных прогнозов и выбирает формулировку, которая с его точки зрения может эти потери минимизировать.

Формулировки прогнозов должны отвечать определенным требованиям и пониматься однозначно как прогнозистом, так и потребителем прогнозов. Одним из важных требований является возможность сравнения прогноза с реальностью. Это очевидное требование на практике часто не выполняется. Не все шкалы лавинной опасности допускают возможность оценить правильность прогнозов. Например, в наиболее часто используемой европейской шкале лавинной опасности допускаются формулировки прогнозов, которые невозможно однозначно связать с наблюдаемой лавинной активностью. Соответственно, невозможно оценить надежность прогнозов в таком формате.

Казалось бы, ущерб от лавин в условиях большой неопределенности должен быть очень значительным. Но это не так. Трудности оперативного прогнозирования часто компенсируются применением активных воздействий для испытания и повышения устойчивости снежного покрова на склоне, а также для предупредительного спуска лавин. Иногда, для обеспечения безопасности от лавин используются технические устройства, предупреждающие попадание людей и движимых объектов в лавиноопасные зоны. Например, автоматические шлагбаумы на дорогах, закрывающиеся во время начала движения лавины. Часто ущерб от некорректных «лавиновых» прогнозов связан с ухудшением погодных условий, в которых деятельность на потенциально лавиноопасных территориях и так невозможна. Т.е. даже если бы прогнозировалось отсутствие лавинной опасности, избежать этого ущерба не удалось бы. Такая ситуация характерна для горнолыжных курортов. Некорректные «лавиновые» прогнозы для прогнозистов не столь болезненны, как с «не лавинные». В ряде случаев ущерб от некорректных «лавиновых» прогнозов закладывается в проекты эксплуатации объектов в потенциально лавиноопасных зонах. Но самым главным является крайняя редкость событий возможных воздействий на объекты в этих зонах. Отчасти этим может быть объяснены существующие сейчас невысокие требования к квалификации и опыту прогнозистов лавин.

Особенности оценивания лавинной опасности при инженерных изысканиях для строительства

Главная особенность оценивания лавинной опасности при инженерных изысканиях связана с наличием государственных нормативно-правовых документов, регулирующих этот процесс. Субъективные оценки лавинной опасности недопустимы. Трудности возникают при выборе методик оценивания лавинных характеристик. Можно воспользоваться методами «...апробированными и положительно зарекомендовавшими себя в природных условиях, соответствующих району проведения изыскательских работ», либо методикой представленной в [3]. Объяснений фраз о «природных условиях» и «положительно себя зарекомендовавших», необходимых для использования этой нормы, в [3] нет. В [3], как и в предыдущих нормативных документах, ничего не сказано о требованиях к точности этих оценок и методах ее определения. Исходных данных для оценок характеристик лавинной опасности в соответствии с [3] немного, - лишь высота снежного покрова, температура воздуха в январе и морфометрия склона, но ошибки в определении этих характеристик и их влияние на точность оценок лавинной опасности могут быть значительными. Прежде всего это касается высоты снежного покрова. В документе используется максимальная высота снежного покрова заданной обеспеченности в лавинном очаге - h_m . Учитывая пространственную изменчивость высоты снега, не ясно, как можно определить h_m по данным редких точечных измерений в лавинном очаге. Рядов непрерывных наблюдений за высотой снега в лавинных очагах, достаточных для надежного определения h_m даже 5% обеспеченности, нет. Предлагается определять ее путем переноса с близлежащих опорных станций, на которых она определена с заданной обеспеченностью [3], В этом случае все равно необходимы максимальные годовые высоты снежного покрова, определяемые в лавинном очаге за некоторый период, которые не ясно, как получить. Такой перенос предполагает линейную зависимость между параметрами распределений максимальной годовой высоты снежного покрова на опорной станции и в лавинном очаге. В районах с интенсивным метелевым переносом это условие трудно выполнимо. Точность переноса будет также зависеть от продолжительности (числа лет) наблюдений за высотой снега в лавинных очагах. Если продолжительность небольшая, то его точность будет невелика, а если продолжительность большая, то имеет смысл определять обеспеченность по данным этих наблюдений. Как бы там ни было, ошибки определения максимальной высоты снега в лавинном очаге с помощью предлагаемого переноса с опорной станции неизвестны. Лучше было бы связать характеристики лавинной опасности с более устойчивыми показателями снегонакопления. Например, с максимальными средними интегральными по площади значениями высоты снежного покрова в лавинном очаге заданной обеспеченности. Аналогичные характеристики для опорных станций могли бы определяться по проводимым там маршрутным или площадным снегосъемкам. Предложенный в [1] и использованный в [3] метод статистического моделирования является перспективным, если его использовать совместно с физически обоснованными зависимостями характеристик лавинной опасности от различных лавинообразующих факторов. Использование вместо них предлагаемых [3] обобщенных эмпирических зависимостей в ряде случаев может снизить повторяемость лавин на крутых склонах и зависить на пологих. Использование средних значений таких величин как доли высоты снежного покрова и площади лавинного очага, участвующих в лавинообразовании, а также постоянных коэффициентов эффективного сопротивления движению лавины, снижает качество статистического моделирования. Очевидно, что они также должны рассматриваться, как случайные величины. Это относится и к коэффициентам эмпирической зависимости для определения высоты фронта лавины. Высота снежного покрова важный лавинообразующий фактор, но крутизна склона не менее важный.

Влияние крутизны лавинного очага достаточно просто учесть. Принимая во внимание статистическую независимость крутизны лавинных очагов и максимальных высот снежного покрова в них использование этих двух предикторов может сделать оценку характеристик лавинной опасности более точной. При этом, для построения распределения частот схода лавин в лавинных очагах различной крутизны [1,7], необходимо учитывать различия в распределениях частот лавинных очагов различной крутизны в горном районе [1]. Отдельные замечания касаются применения графоаналитического метода определения динамических характеристик лавин. В [3] представлены эмпирические коэффициенты эффективного сопротивления движению лавины, но не говорится о методике получения вертикальных профилей склона, по которой лавина будет двигаться. Очевидно, что методика должна быть аналогичной с той, которая использовалась для получения коэффициентов сопротивления. При некоторых конфигурациях профилей даже небольшие ошибки определения коэффициентов эффективного сопротивления могут приводить к ошибкам в сотни метров в определении дальности выброса лавин и соответственно к большим ошибкам в определении скоростей и ударных давлений лавин.

Заключительные замечания

Анализ показал, что процесс оценивания (прогнозирования) характеристик лавинной опасности нуждается в совершенствовании. Оценки должны сопровождаться информацией об их надежности. Такое требование необходимо закрепить в государственных нормативных документах, регулирующих оценивание лавинной опасности.

Преимущества нормативной расчетной методики оценки лавинной опасности при инженерных изысканиях [3] перед более простой и лучше обоснованной топографической моделью [6] не очевидны и нуждаются в проверке.

Существующая нормативная методика оценки повторяемости лавин может быть улучшена добавлением зависимости лавинообразования от крутизны склона.

Необходимые исправления и добавления в свод правил [3] необходимо внести при его плановой актуализации.

Требуется разработка формулировок фоновых лавинных прогнозов, допускающих оценку их качества путем сравнения с фактическим лавинопроявлением.

Список литературы

1. Благовещенский В.П. Определение лавинных нагрузок. Алма-Ата: Гылым, 1991. 116 с.
2. Руководящий документ. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. РД 52.27.284-91. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 151 с.
3. Свод правил. СП 428.1325800.2018. Инженерные изыскания для строительства в лавиноопасных районах. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2018. 36 с.
4. Черноус П.А. Некоторые результаты оценки качества определения лавинного риска// Материалы гляциологических исследований. 2002. Вып. 91. С.105-109.
5. Черноус П.А. О рационализации измерений характеристик снега для оценки его устойчивости на склоне// Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. 1(1). С. 114-142.
6. Lied K., Bakkehoi S. Empirical Calculations of Snow Avalanche Run-out Distance Based on Topographic Parameters// Journal of Glaciology. 1980. 26(94). P. 165-177.
7. McClung D., Schaerer P. The avalanche handbook. Seattle: Mountaineers, 1993. 271 p.

Гидрохимический портрет экстремального дождевого паводка на малых водосборах южного Сихотэ-Алиня, Дальний Восток России

Шамов В.В.¹, Луценко Т.Н.¹, Болдескул А.Г.¹, Гарцман Б.И.^{2,1}, Лупаков С.Ю.¹, Губарева Т.С.^{2,1}, Кожевникова Н.К.³ Юрченко С.Г.¹

¹*Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия*

²*Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия*

³*Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты восточной Азии, г. Владивосток, Россия*
vlshamov@yandex.ru

Аннотация. Для малых рек верховьев р. Уссури авторами выделены растворенные вещества, содержание которых в летне-осенний период года в среднем снижается с ростом водности потока в силу преобладания разбавления над процессами выщелачивания – это сульфаты, гидрокарбонаты, кремний, поступающие преимущественно из подстилающих горных пород. Для веществ, связанных с биотой, отмечается в целом нарастание содержания с увеличением расходов воды во время дождевых паводков (РОУ, нитраты, алюминий и др.) в связи с общим преобладанием процессов вымывания этих РВ из почвенно-растительного покрова над процессами разбавления дождевыми водами поровых растворов, мигрирующих в реки. Некоторые компоненты химического состава речных вод (рН, микроэлементы) в среднем статистически слабо связаны с расходом воды, для них теснота такой связи возрастает во время выдающихся паводковых событий. Вероятно, процессы выщелачивания и процессы разбавления в сезонном разрезе могут уравниваться. Межгодовые изменения поведения растворенных веществ в малых реках на фоне контрастных гидрометеорологических условий текущего сезона указывают на «память» – текущую значимость таких условий в предшествующие годы. Характер связи содержания многих РВ и расходов воды существенно изменяется вблизи значений расходов, близких к критическим (критический удельный расход воды в данном районе составляет около 100 л/(с·км²)), которые индицируют переход состояния речного бассейна от внутриобъемного стокообразования к поверхностному. При указанном переходе может наблюдаться полная смена направленности гидрохимических процессов на водосборе.

Ключевые слова: дождевой паводок, малый водосбор, растворенное вещество, Сихотэ-Алинь, Дальний Восток России

Evaluating hydrochemical performance of a rain super-flood generation in small catchments, South Sikhote-Alin Mountains, Pacific Russia

Shamov V.V.¹, T.N. Lutsenko¹, Boldeskul A.G.¹, Gartsman B.I.^{1,2}, Lupakov S.Yu.¹, Gubareva T.S.^{1,2}, Kozhevnikova N.K.³, Yurchenko S.G.¹

¹*Pacific Institute of Geography Far-East Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*

²*Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far-Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*
vlshamov@yandex.ru

Abstract. For small rivers in the headwaters of the Ussuri River, the authors have identified dissolved substances, the content of which, in the summer-autumn period, on average decreases

with increasing water flow due to the predominance of dilution over leaching processes – these are sulfates, hydrocarbonates, silica, coming mainly from the underlying rocks. For substances related to biota, there is generally an increase in content with increasing water discharge during rainfall floods (dissolved organic carbon, nitrates, aluminum, etc.) due to the general predominance of leaching processes of these substances from the soil and vegetation cover over the processes of dilution by rainwater of pore solutions migrating into rivers. Some components of river water chemistry (pH, trace elements) are on average statistically weakly related to water discharge, for them the closeness of such relationship increases during outstanding flood events. It is likely that leaching and dilution processes may be balanced in the seasonal scale. Interannual changes in the behavior of dissolved substances in small rivers against the background of contrasting hydrometeorological conditions of the current season indicate "memory" – the current significance of such conditions in previous years. The nature of the relationship between the content of many pollutants and water discharge changes significantly when discharges are close to critical (a local critical specific water discharge is $\sim 100 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$), which indicates the transition of the river basin state from subsurface (underground) to surface runoff generation. A complete change of hydrochemical process direction can be observed at this transition.

Keywords: rain flood, small catchment, dissolved substance, Sikhote-Alin, Pacific Russia.

Введение

Химический состав речных вод зависит от участия различных источников водного питания реки и поэтому может рассматриваться как некий «отпечаток» сложного комплекса процессов переноса, смешивания, разбавления и взаимодействия растворенных веществ (РВ), происходящих в речном бассейне [4, 5]. Форма связи содержания РВ и расхода воды в замыкающем створе (С-Q) часто имеет вид петли и может сильно варьировать для разных РВ и речных бассейнов, поэтому многие РВ чувствительны к гидрологическим процессам на водосборе и в определенной мере могут служить их индикаторами (дескрипторами) [3]. В настоящем исследовании анализируются данные интенсивных наблюдений за поведением ряда РВ в связи с динамикой водного стока (Q). Особый акцент сделан на комплексе гидролого-гидрохимических явлений во время катастрофического паводка – паводка поверхностного генезиса, – вызванного тайфуном Лайонрок в августе-сентябре 2016 года.

Объекты и методы исследования

Наблюдения за стоком с помощью электромагнитного измерителя скорости потока SEVA FlowSens велись в 2016–2020 гг. в южном Сихотэ-Алине (Приморский край, РФ) на двух экспериментальных водосборах руч. Березового (площадь водосбора $3,5 \text{ км}^2$) и р. Медвежьем ($7,5 \text{ км}^2$) на устьевых сезонных гидрологических постах, оборудованных цифровыми гидростатическими регистраторами уровня воды LT Levelogger Junior Solinst (Канада) и САМРР 5 (Томск, Россия). Физико-географическое описание водосборов можно найти в публикации [2]. Было измерено 95 расходов на Березовом и 72 расхода воды на Медвежьем с отбором проб воды на химический анализ, измерением pH, минерализации и температуры воды с помощью портативных анализаторов воды YSI Professional Plus (США) и НМ-200 (Республика Корея). Диапазон изменения условий увлажнения, охваченный наблюдениями, достаточно большой: измеренные расходы воды изменялись на руч. Березовом от 4 до $\sim 1400 \text{ л/с}$, на руч. Медвежьего – от 5 до $\sim 3150 \text{ л/с}$. Максимальные значения наблюдались во время прохождения тайфуна Лайонрок (сентябрь 2016 г.). Отобрано и проанализировано 167 проб речной воды. Содержание гидрокарбонат-иона определяли потенциометрическим титрованием в нефльтрованных пробах по стандартной методике. Остальные компоненты определялись после фильтрации (Durapore Millipore 0.45 мкм): главные анионы (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) – на жидкостном хроматографе Shimadzu LC 10Avp, главные катионы (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) – на атомно-абсорбционном спектрометре Shimadzu AA 6800, кремний – методом ICP-MS (Agilent 7500 cx Series), общий растворенный органический углерод (РОУ) – с помощью ТОС-анализатора (Shimadzu ТОС-V_{CPN}).

Результаты и обсуждение

Анализировалось поведение, прежде всего, таких РВ, как водород (рН), гидрокарбонаты, РОУ, нитраты, кремний, кальций и сульфаты.

Для малых рек верховьев р. Уссури авторами выделены РВ, содержание которых в летне-осенний период года в среднем снижается с ростом водности потока в силу преобладания разбавления над процессами выщелачивания – это сульфаты, гидрокарбонаты, кремний, поступающие преимущественно из подстилающих горных пород. Для веществ, связанных с биотической трансформацией вещественных потоков, отмечается в целом нарастание содержания с увеличением расходов воды во время дождевых паводков (РОУ, нитраты, алюминий и др.) в связи с общим преобладанием процессов вымывания этих РВ из почвенно-растительного покрова над процессами разбавления дождевыми водами поровых растворов, мигрирующих в реки. Некоторые компоненты химического состава речных вод (рН, а также микроэлементы) в среднем статистически слабо связаны с расходом воды, для них значимость связи $C-Q$ возрастает во время выдающихся паводковых событий. Вероятно, процессы выщелачивания и процессы разбавления в сезонном разрезе могут уравниваться. Межгодовые изменения поведения растворенных веществ в малых реках на фоне контрастных гидрометеорологических условий текущего сезона указывают на значимость таких условий в предшествующие годы.

В частности, для РОУ отмечена общая тенденция возрастания содержания при повышении стока, что связано с тем, что водорастворимые соединения углерода в основном вымываются из подстилки и верхнего органического слоя почвы. Экстремальный паводок в сентябре 2016 года сильно выделяется на общем фоне всех лет наблюдений. Можно заметить общую нелинейную тенденцию увеличения содержания РОУ с повышением водности потока, а также неоднозначный характер этой связи (Рис. 1).

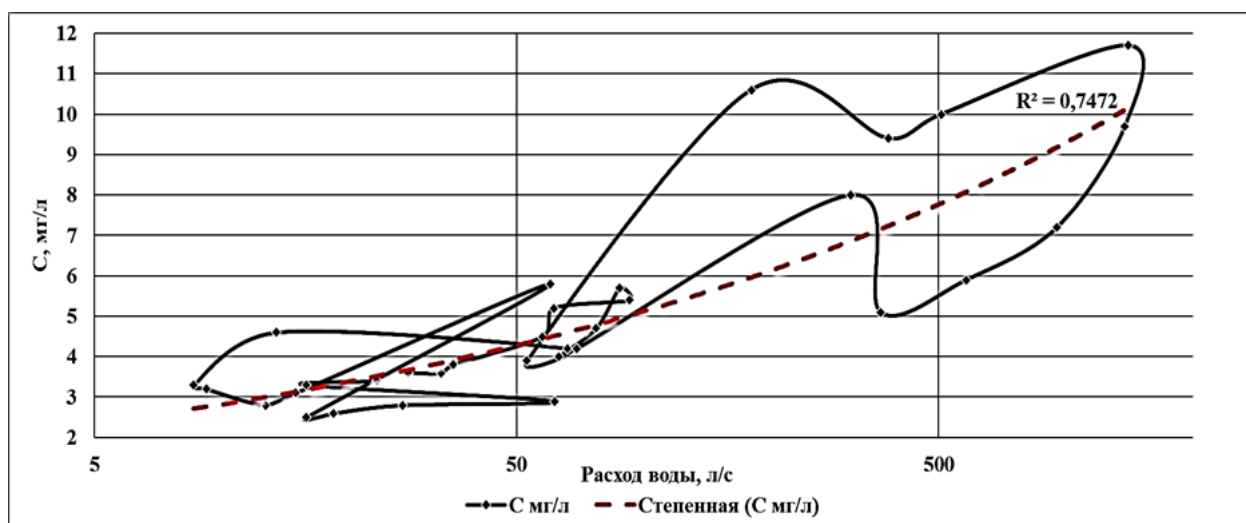


Рис. 1 Динамика связи $C-Q$ для РОУ в воде руч. Березового. 01.06–28.09.2016 г.

Экстремальный паводок в правой части рис. 1 представлен искривленной широкой петлей положительного (направленного по часовой стрелке) гистерезиса: на стадии подъема паводка РОУ в среднем вымывается из почвы гораздо интенсивнее, чем на стадии его спада (содержание РОУ различается до 2 раз). Согласно наблюдениям, в данный период наблюдался паводок весьма редкой повторяемости: модули стока в бассейнах исследуемых рек существенно превысили критическое значение, составляющее в данном районе величину ~ 100 л/с·км², которая индицирует переход состояния речного бассейна от внутриобъемного стокоформирования к поверхностному. Критический расход фиксирует момент переполнения всех условных (модельных) ёмкостей бассейна, после чего сброс избыточной влаги происходит в виде густой сети временных потоков воды, быстро

развивающейся на поверхности склонов [1]. На графике виден резкий нелинейный перепад концентрации РОУ на фоне устойчивого возрастания расхода воды в ручье до 300–400 л/с, что соответствует величине критического расхода воды.

На начальном этапе развития паводка РОУ резко возрастает за счет увеличения объема гумусированного слоя, промываемого дождевой водой. Далее, при образовании временной ручейковой сети на насыщенных водой склонах в русловом стоке быстро возрастает доля атмосферных вод, стекающих по поверхности склонов без существенной химической трансформации, что можно интерпретировать как стадию быстро протекающего разбавления внутрипочвенного стока ультрапресными дождевыми водами. Дальнейшее развитие склоновой ручейковой сети в ходе продолжающихся дождей вновь способствует преобладающему над разбавлением выщелачиванию еще оставшегося углерода из почвы, но с существенно меньшей интенсивностью, что отражается в слабом наклоне линии связи С-Q.

На спаде водности при тех же, что и на подъеме расходах воды содержание РОУ в речной воде почти в 2 раза ниже в силу истощения запаса растворимых форм углерода. Сразу после пика паводка это содержание резко, а в дальнейшем более плавно снижается при уменьшении водности ручья. При достижении критического расхода воды на спаде скачок РОУ наблюдается вновь, при этом наблюдается резкое сокращение поверхностной временной дренажной сети и, соответственно, доли атмосферных вод в общем стоке при относительно симметричном повышении доли почвенных вод, обогащенных РОУ. При дальнейшем снижении водности речного потока, определяемого в основном его почвенной составляющей, содержание РОУ в речной воде падает.

Поведение нитратного азота в речной воде можно считать во многом противоположным паводковой динамике РОУ (Рис. 2). Появление поверхностной дренажной сети при увеличении водности речного потока отражается в плавном переходе к режиму, близкому к хеостатизису, с некоторым снижением содержания нитратов к пику паводка. После прекращения дождя, на спаде паводка их концентрация возрастает до максимума (4,7 мг/л) вблизи переключения бассейна реки на режим внутриобъемного стокоформирования. После резкого сокращения сети временных поверхностных потоков общее выщелачивание нитратов быстро снижается примерно в 1,5 раза, после чего опять начинает возрастать до значений, соответствующих предпаводковой низкой водности ручья (4,2–4,4 мг/л). Примечательно, что наивысших значений (4,9 мг/л) нитраты достигали во время невысоких паводков с максимумами расходов в районе 60 л/с. Вероятно, источники поступления этого соединения различаются в зависимости от фона увлажнения.

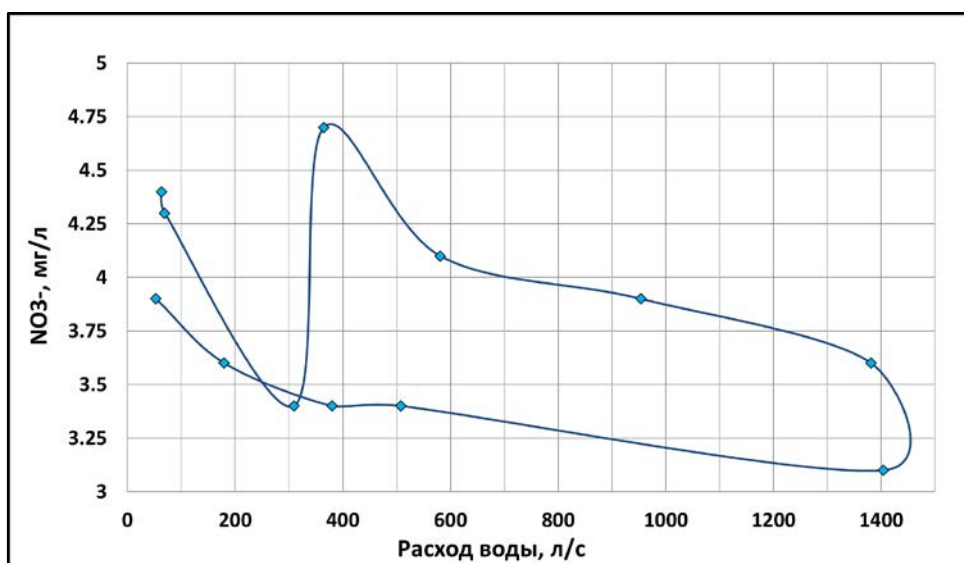


Рис. 2 Динамика связи С-Q для NO₃⁻ в воде руч. Березового. 29.08–15.09.2016 г. Тайфун Лайонрок.

С увеличением водности реки содержание кальция, гидрокарбонатов, сульфатов, кремния имеет тенденцию к снижению, что связано с истощением источников этих РВ. Характер нелинейной связи С-Q для них часто определяется силой и особенностями конкретного паводка. В связи с этим весь массив данных для каждого компонента целесообразно разбить на части, соответствующие отдельным паводочным циклам в различные сезоны.

К примеру, во время экстремального паводка в августе-сентябре 2016 г. (Рис. 3) характерно резкое снижение содержания Ca^{2+} при переходе к режиму поверхностного стокоформирования в силу быстрого разбавления речных вод ультрапресными дождевыми.

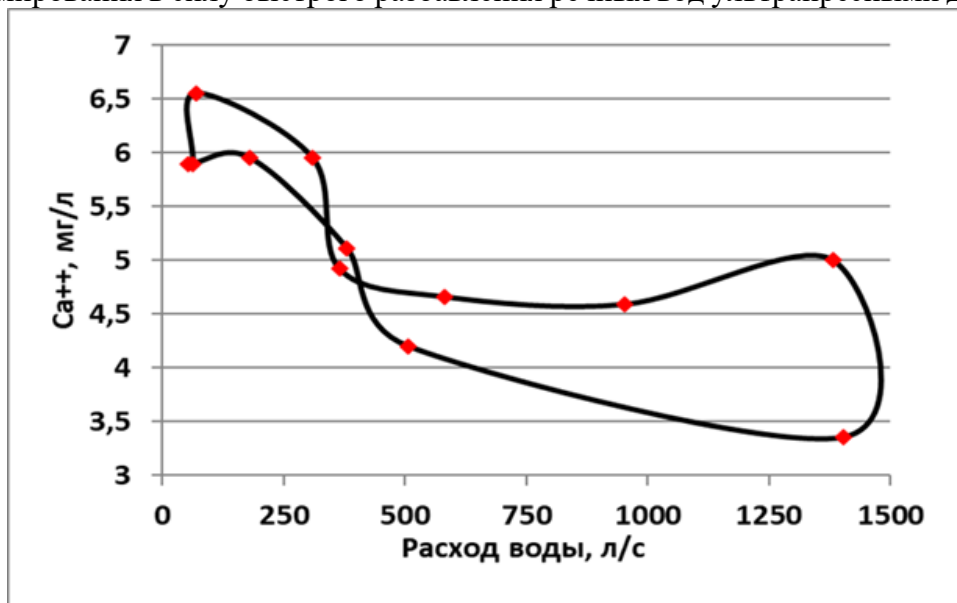


Рис. 3 Динамика связи С-Q для Ca^{2+} в воде руч. Березового. 29.08–15.09.2016 г. Тайфун Лайонрок.

Такое снижение приурочено к диапазону расходов 250-500 л/с, что соответствует критическому для руч. Березового расходу воды (~350 л/с). Минимальное значение содержания кальция (3,36 мг/л) соответствует наибольшему измеренному расходу воды (1404 л/с). Значения 3–4 мг/л характерны для Ca^{2+} во время высокой водности и в летне-осенние периоды различных лет.

Во время паводка поверхностного генезиса сходным с Ca^{2+} образом ведут себя гидрокарбонаты (рис. 4). Содержание сульфатов снижается до появления поверхностной дренажной сети на водосборе, а затем возрастает до прекращения дождя.

Выводы

Таким образом, экстремальные дождевые паводки на реках горной страны Сихотэ-Алинь, вызванные обильными интенсивными дождями, эффективно отражаются на поведении ряда РВ, выявленного в результате наблюдений с высоким временным разрешением. Характер связи С-Q существенно изменяется вблизи критических значений водности (критический модуль стока в данном районе составляет около $100 \text{ л}/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$), которые индицируют переход состояния речного бассейна от внутриобъемного стокообразования к поверхностному. При данной водности реки наблюдается смена направленности динамики РВ. В частности, поведение гидрокарбонатов и кальция в речных водах в условиях формирования паводка поверхностного генезиса приобретает преимущественно хемостатический характер; РОУ и сульфаты при этом проявляют сложную динамику: выщелачивание резко сменяется разбавлением, затем их содержание вновь нарастает с ростом расходов воды, что, очевидно, связано с «новой волной» их мобилизации. При этом скачкообразно возрастает рН в силу роста доли атмосферных вод в реке; нитраты резко выщелачиваются на спаде паводка на общем фоне разбавления;

двуокись кремния резко возрастает и на фоне возрастания стока почти не меняется. В целом сложное поведение отдельных РВ связана с комбинированием различных источников питания реки при выходе паводка в режим поверхностного генезиса.

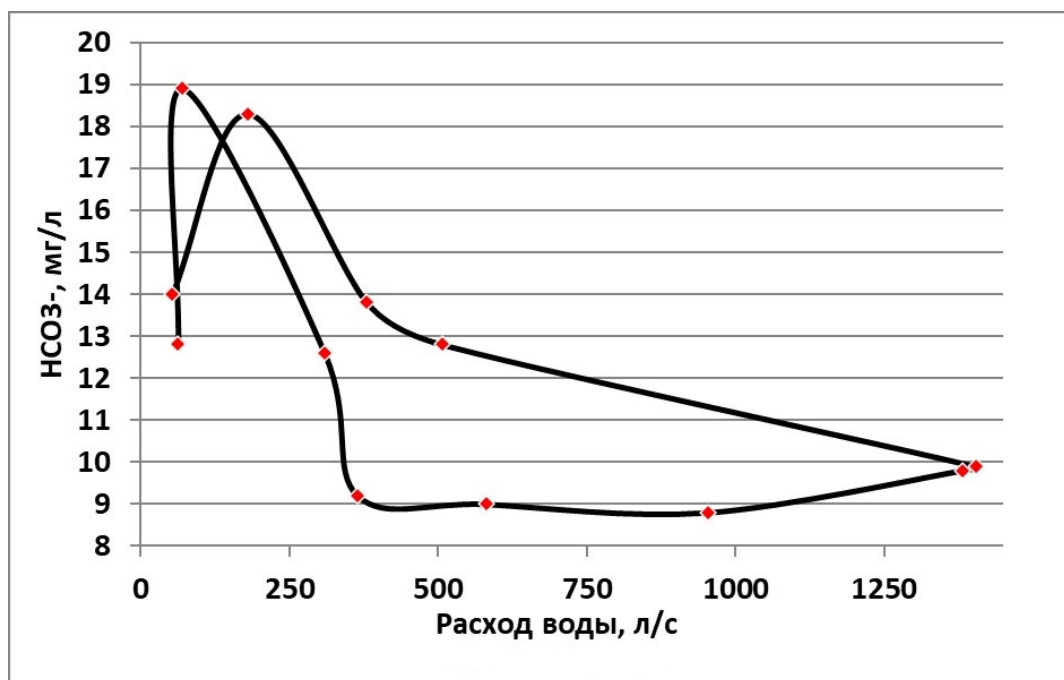


Рис. 4 Динамика связи C-Q для HCO₃⁻ в воде руч. Березового. 29.08–15.09.2016 г. Тайфун Лайонрок.

Благодарности

Работа выполнялась в рамках темы 122020900184-5 государственного задания ТИГ ДВО РАН и темы государственного задания 121031000134-6 ФНЦ биоразнообразия ДВО РАН. Авторы выражают благодарность П.А. Беляковой, Д.А. Касурову, К.К. Жбакову, З.А. Сучилиной, Е.Д. Корниловой, Е.М. Кузьминой, А.С. Кашицыной, Д.А. Романовой за их участие в получении и обработке результатов наблюдений.

Aknowledgments

The work was carried out within the framework of the project 122020900184-5 of the state assignment of PGI FEB RAS and project of the state assignment of FSC of biodiversity FEB RAS. The authors express their gratitude to P.A. Belyakova, D.A. Kasurov, K.K. Zhabkov, Z.A. Suchilina, E.D. Kornilova, E.M. Kuzmina, A.S. Kashitsyna, and D.A. Romanova for their contribution to the collecting and processing of the observational results.

Список литературы

1. Гарцман Б.И. Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска. Владивосток: Дальнаука, 2008. 223 с.
2. Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шамо В.В., Луценко Т.Н., Болдескул А.Г., Кожевникова Н.К., Лупаков С.Ю. Компоненты стока малых водосборов Сихотэ-Алиня: обобщение результатов полевых измерений и трассерного моделирования // Известия Российской академии наук. Сер. геогр. 2019. № 6. С. 126-140.
3. Шамо В.В., Луценко Т.Н., Лебедева Л.С., Тарбеева А.М., Ефремов В.С., Павлова Н.А., Ксенофонтова М.И. и гидрологических процессов // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 3. С. 286-299.
4. Knapp J.L.A., von Freyberg J., Studer B., Kiewiet L., and Kirchner J.W. Concentration-discharge relationships vary among hydrological events, reflecting differences in event characteristics // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2020. 24, 2561-2576.
5. Zhi W., Li L., Dong W., Brown W., Kaye J., Steefel C., and Williams K.H. Distinct source water chemistry shapes contrasting concentration-discharge patterns // Water Res. Res. 2019. 55, 4233-4251.

Условия образования непромерзающих озеровидных расширений в четковидных руслах малых рек криолитозоны, Республика Саха (Якутия)

В.В. Шамов^{1,2}, А.М. Тарбеева³, Л.С. Лебедева², В.С. Ефремов²

¹*Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия*

²*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия*

³*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия*

vlshamov@yandex.ru

Аннотация. В криолитозоне четковидные русла малых рек, состоящие из чередующихся непромерзающих глубоких (1,5–3,5 м) озеровидных расширений (бочагов) диаметром 5–40 м и промерзающих узких и мелких проток между ними, – одно из ярких проявлений взаимодействия мерзлоты и рек. Такие расширения регулируют сток воды и растворенных веществ, служат местами зимовки водной фауны, а вода в них зимой приобретает особый химический состав на фоне острого дефицита кислорода. Механизм образования бочагов часто связывают с вытаиванием подземных льдов, но до сих пор он остается предметом научных дискуссий. Для его понимания в 2015–2021 гг. была проведена серия наблюдений в бочагах реки Шестаковки, водосбор которой расположен вблизи г. Якутска. В результате температурных, гидрохимических и гидрологических наблюдений в скважинах и непосредственно в бочагах и соединяющих их протоках, маршрутных обследований р. Шестаковки предложена гипотеза о связи бочагов с питанием реки за счет вод сезонно-талого слоя (СТС) по предпочтительным водопроводящим путям (ПВП) на дренируемых рекой склонах.

Ключевые слова: озеровидные русловые расширения, четковидные русла рек, криолитозона, Саха (Якутия).

Settings of formation of non-freezing lake-like extensions in beaded streams in cryolithozone, Republic of Sakha (Yakutia)

V.V. Shamov^{1,2}, A.M. Tarbeeva³, L.S. Lebedeva², V.S. Efremov²

¹*Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia*

²*Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia*

³*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

vlshamov@yandex.ru

Abstract. In the permafrost zone, one of the clearest manifestations of the interaction between permafrost and rivers are the bead channels of small rivers, consisting of alternating non-freezing deep (1.5–3.5 m) lake-like extensions (beads, bochags) and freezing narrow and shallow channels connecting them. Such extensions regulate the flow of water and dissolved substances, serve as overwintering places for aquatic fauna, and the water in them acquires a special chemical composition in winter against the background of acute oxygen deficiency. The mechanism of formation of bochags is often attributed to the melting of underground ice, but it is still a subject of scientific debate. In order to understand it, a series of observations was

carried out in 2015-2021 in the peat bogs of the Shestakovka River, whose catchment area is located near the city of Yakutsk. On the basis of temperature, hydrochemical and hydrological observations in wells and directly in the bochags and the connections between them, and route surveys of the Shestakovka River, we propose a hypothesis about the hydrological connection of the bochags with water discharge from the seasonal thawed layer (STL) to the river through preferential flow paths (PFP) on the valley slopes.

Keywords: lake-like extensions of a channel, beaded channels of rivers, cryolithozone, Sakha (Yakutia).

Введение

В зоне распространения многолетнемерзлых пород четковидные русла малых рек, представляющие собой чередование глубоких озеровидных расширений (бочагов, четок) и соединяющих их мелких узких протоков, образуют специфический тип речных русел [2] представляются одним из проявлений воздействия мерзлоты на реки. В целом, по современным оценкам на основе данных дистанционного зондирования, четковидные русла рек можно найти почти в одной трети всех панарктических водосборов (138500 из обследованных 417189) [5]. Озеровидные расширения в четковидных руслах регулируют сток воды и растворенных и взвешенных веществ, а также служат местами зимовки гидробионтов [4]. Условия и механизм образования четковидных русел часто связывают с вытаиванием подземных льдов [1; 4], но до сих пор этот механизм остается неясным, поскольку указанные русла отмечаются также в тех районах, где подземные льды не были обнаружены. Цель настоящего исследования – сформулировать гипотезу о необходимых условиях существования четковидных русел рек в криолитозоне с учетом всего комплекса гидролого-гидрогеологических явлений и процессов в речном бассейне.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились в 2016–2023 гг. на экспериментальном водосборе р. Шестаковки (площадь – 170 км²), Центральная Якутия. Климат района исследований резко континентальный. Среднемноголетняя температура воздуха – -9.4°C (июля +19.5°C, января -38.6°C), среднее годовое количество осадков – 245 мм (по м/с Якутск, 1950-2015 гг.). Водосбор р. Шестаковки хорошо изучен [6] и представляет собой холмистую плейстоценовую равнину (цокольные высокие левобережные террасы р. Лены высотой 200–300 м абс.), преимущественно сложенную песками. Мощность многолетнемерзлых пород здесь в пределах 200–400 м, местами до 500 м; глубина сезонно-талого слоя изменяется от 0,4 м в заболоченных понижениях и листовенничных марях до 4 м на песчаных массивах в междуречьях. Преобладают мерзлотные таежные почвы, зональный тип растительности – брусничная листовенничная тайга. Сосновые леса на сухих песчаных массивах занимают 47% площади водосбора, листовеннично-березовые леса – 38%, мари и болота – 14% и озера – 1%. К наиболее крупным озерам, образовавшимся в котловинах выдувания, относятся Большая и Малая Чабыда, Кюрдегелях и Туой. В песчаных массивах, покрытых сосновым лесом, на глубине ~3–5 м обнаруживаются надмерзлотные субаэральные талики, занимающие около 20–25 % площади водосбора.

В ходе маршрутных и стационарных исследований применялись стандартные гидрометрические методы, автоматизированные средства регистрации метеорологических параметров, температуры грунта и воды, уровня воды в русле и гидрогеологических скважинах, портативные регистраторы температуры, электропроводности и рН воды, методы георадиолокации и электротомографии,

стандартные методы лабораторного химического анализа проб воды.

Результаты и обсуждение

Проводимые в ИМЗ СО РАН комплексные гидрологические и гидрогеологические наблюдения охватывали спектр процессов стокоформирования и промерзания-оттаивания в долине четковидной реки. Были получены данные о сезонной и межгодовой динамике и химическом составе разных типов природных вод речного бассейна и его мерзлотно-гидрологической трансформации, выявлено устойчивое снижение содержания кислорода в воде русловых расширений в течение зимы, проведена серия георадарных съемок субаэральных таликов, исследовано строение и температура отложений в долине реки, оценена роль бочагов и вод СТС как источников питания реки и др.

Анализ снимков четковидных русел р. Шестаковки и р. Мархинки, маршрутные наземные наблюдения в долине р. Шестаковки позволяют связать положение целого ряда бочагов с местами разгрузки вод временных поверхностных водотоков и вод СТС.

В зимний период незамерзающие воды в песчаных отложениях под действием криогенного напора изливаются на дневную поверхность, образуя склоновые наледи (Рис. 1), отчетливо видимые на космоснимках весной после схода снега.



Рис. 1 Наледь, образованная зимней разгрузкой таликовых вод под действием криогенного напора. Регулярное переувлажнение индицируется прирусловыми заболоченными участками с мощными мохово-торфяными подушками. Р. Лев. Шестаковка. Фото В.В. Шамова.

На склонах южной экспозиции после схода снега могут наблюдаться напорные выходы (грифоны) склоновых надмерзлотных вод. В период снеготаяния на поверхности заболоченных ложбин образуются временные потоки талых вод, расположение которых год от года практически не меняется, образуя относительно устойчивую сеть поверхностных водопроводящих путей (ПВП, preferential flow paths). ПВП, регулярно сбрасывая склоновые воды, образуют в русле реки-водоприемника избыточно обводненные участки, которые со временем закрепляются морфологически в виде бочагов за счет избытка тепла, аккумулируемого в воде. Рост бочагов, сопровождающийся постепенным выпадением обрамляющих их лиственниц (Рис. 2), возможно, связан с устойчивым растепляющим действием боковой приточности вследствие многолетней тенденции роста температур воздуха в регионе. При отсутствии данных о связи выпадения деревьев с потеплением можно говорить лишь о гипотезе.



Рис. 2 «Падающие» лиственницы в обрамлении руслового расширения, р. Шестаковка. Фото В.В. Шамова.

Примечателен случайный долгосрочный «эксперимент», связанный с созданием грунтовой дороги, пересекающей слабовыраженную долину р. Лев. Шестаковки в районе оз. Туой (Рис. 3).

Русло реки здесь почти не сформировано, и поток в основном рассредоточен по заболоченному днищу долины. Выше и ниже переезда в прошлом образовались два бочага (на Рис. 3 видны в форме темных кругов). Данные бочаги изначально имели меньший диаметр, поскольку обрамляющие их редкие березовые насаждения погибли из-за последующего переувлажнения корневой системы. Появление и развитие бочагов у данного переезда могут быть связаны с дорогой, колея которой служит искусственной сетью ПВП, по которой происходит регулярный сброс воды с прилегающих склонов. Предположительно, в многолетнем разрезе на фоне положительного температурного тренда количество вод СТС в бассейне постепенно увеличивается, в том числе та часть, которая дренируется сетью ПВП. Приток в русловую сеть при этом может нарастать. Но, поскольку рост температур обычно приводит к повышению испаряемости, то нужно

ожидать также и общего увеличения испарения с поверхности водосбора.

Развитие рек в рассматриваемом районе не имеет классического «речного» характера из-за слабости/эфемерности руслового процесса и преобладания комплекса склоновых процессов над русловым. В данном случае сток рек – это скорее исключение, чем правило, а правило – это испарение с водосбора, доминирующее здесь благодаря крайне засушливым условиям на фоне летнего избытка тепла.



Рис. 3 Бочаги, образовавшиеся выше и ниже переезда через р. Лев. Шестаковку. Космический снимок

(<https://www.google.com/maps/@61.9462452,129.2790649,160m/data=!3m1!1e3?hl=ru-RU&entry=ttu>)

Развитие речных русел жестко контролируется эоловыми формами рельефа, унаследованными от плейстоценовой холодной засухи. Русло в голоцене было выработано, долина реки в ее средней и нижней частях сформирована, видны надпойменные террасы, но малые реки данного района как бы недоразвиты и отличаются четковидными руслами в отличие от рек примерно такого же масштаба в районах достаточного и/или избыточного увлажнения. Основной сток на перемерзающих малых и средних реках Якутии проходит преимущественно весной, когда мерзлота препятствует русловой эрозии, а когда берега оттаивают, река уже достигает стадии глубокой межени, когда многие реки здесь пересыхают.

Выводы

Подземные льды обуславливают не все случаи четковидных рек [4]. Вытаивание подземных льдов в гидрологическом отношении способствует образованию различных типов предпочтительных водопроводящих путей. Есть основание предполагать, что основных условий существования бочагов два: 1) наличие склоновых ПВП, питающихся водами СТС (включая талики), и 2) исчезающе слабый русловый процесс. В условиях засушливого климата при общем дефиците воды – в криолитозоне ли, вне её границ ли [3] – русловый процесс настолько слаб, что отказывается от роли своеобразного

"стирающего функтора" (термин из математической теории категорий) и не может противодействовать образованию бочагов, как в районах достаточного и избыточного увлажнения, где русла характеризуются чередованием плёсов и перекатов.

Благодарности

Работа выполнялась в рамках проекта РФФИ № 22-17-20040. Авторы выражают благодарность Б.И. Гарцману, Н.А. Павловой, В.В. Огонерову, Н.Е. Баишеву, Н.В. Торговкину, И.И. Христофорову, К.П. Данилову, К.И. Бажину, Н.И. Тананаеву, А.А. Галанину, Т.Н. Луценко, М.И. Ксенофонтовой, К.М. Панышевой за участие в проведении полевых работ в разные сезоны и/или обсуждении результатов наблюдений.

Aknowledgments

The work was performed within the framework of the RSF project No. 22-17-20040. The authors are grateful to B.I. Gartzman, N.A. Pavlova, V.V. Ogonerov, N.E. Baishev, N.V. Torgovkin, I.I. Khristoforov, K.P. Danilov, K.I. Bazhin, N.I. Tananaev, A.A. Galanin, T.N. Lutsenko, M.I. Ksenofontova, and K.M. Panysheva for their participation in the fieldwork and analysis of the observation results in different years.

Список литературы

1. Губарьков А.А., Лейбман М.О. Чёткообразные русловые формы в долинах малых рек на центральном Ямале – результат парагенеза криогенных и гидрологических процессов // Криосфера Земли. 2010. Т. 14. № 1. С. 41-49.
2. Тарбеева А.М. О происхождении четковидной формы русел малых рек криолитозоны // Геоморфология. 2018. № 1. С. 88-95.
3. Тарбеева А.М., Крыленко И.В., Сурков В.В. Озеровидные расширения русел рек степной зоны и возможные причины их формирования (бассейн р. Урал в районе г. Орска) // Геоморфология. 2016. № 1. С. 73-81.
4. Тарбеева А.М., Лебедева Л.С., Ефремов В.С., Крыленко И.В., Сурков В.В., Шамов В.В., Луценко Т.Н. Условия и процессы формирования четковидного русла малой реки криолитозоны (на примере р. Шестаковка, центральная Якутия) // Криосфера Земли. 2019. Т. 23. № 2. С. 38-49.
5. Harlan M.E., Gleason C.J., Flores J.A., Langhorst T.M., Roy S. Mapping and characterizing Arctic beaded streams through high resolution satellite imagery // Remote Sensing of Environment. 2023. Vol. 285, 113378.
6. Lebedeva L., Pavlova N., Khristoforov I. Geology, structure, ground temperature and groundwater level in aquifer taliks in the Shestakovka River basin, Eastern Siberia // Land. 2023. 12, 16.

Паводки и осадки на реках Северо-Западного Кавказа в 1970-2022 годах, растут или падают?

И.В. Шевердяев^{1,2*}, С.В. Веневский²

¹Субтропический научный центр РАН, г. Сочи

²Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону
ig71089@yandex.ru

Аннотация. После сильного паводка в июле 2012 года на реках Северо-Западного Кавказа развёрнута система автоматических уровнемеров на малых, но опасных реках региона. Накопленные наблюдения 69 уровнемеров в 2014-2022 годах позволили выделить паводковые случаи - скачки уровня воды более 20 см, обусловленные выпадением дождей. Проведён анализ суточных наблюдений осадков в 1970-2022 годах на метеостанциях Анапа, Краснодар и Туапсе. Суточные суммы осадков на метеостанциях сопоставлены с данными реанализа ERA5-Land. Выделены корректирующие коэффициенты данных реанализа для водосборов региона. Проведён статистический анализ осадков в 1970-2022 годах по данным реанализа. В 2014-2022 гг. наблюдается небольшой рост суммарного количества паводковых случаев, что совпадает с динамикой максимальных суточных и часовых.

Ключевые слова: реанализ, ERA5-Land, уровнемеры, Северный Кавказ, паводки, осадки.

The floods and rainfall of North West Caucasus rivers in 1970-2022, increase or decrease?

I.V. Sheverdyayev^{1,2*}, S.V. Venevsky²

¹Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Sochi, Russia

²Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia
ig71089@yandex.ru

Abstract. After a strong flood in July 2012, a system of automatic level gauges was deployed on the rivers of the North-Western Caucasus on small but dangerous rivers in the region. The accumulated observations of 69 level gauges in 2014-2022 made it possible to identify flood events - water level jumps of more than 20 cm due to rainfall. An analysis of daily observations of precipitation in 1970-2022 at meteorological stations Anapa, Krasnodar and Tuapse was carried out. Daily precipitation totals at weather stations are compared with ERA5-Land reanalysis data. The correction coefficients of the reanalysis data for the watersheds of the region have been identified. A statistical analysis of precipitation in 1970-2022 was carried out according to reanalysis data. In 2014-2022. there is a slight increase in the total number of flood events, which coincides with the dynamics of the maximum daily and hourly.

Keywords: reanalysis reanalysis, ERA5-Land, level gauges, North Caucasus, flood, rainfall.

Введение

Северо-Западный Кавказ сейчас – быстро развивающийся регион с растущим населением, занимающий ключевые позиции в России во многих отраслях: рекреационной, транспортной, сельскохозяйственной. Одной из особенностей Северо-Западного Кавказа, сильно влияющих на его развитие, является паводковый режим рек (Панов и др., 2012). В XXI веке паводки с наибольшими последствиями наблюдались в 2002 и 2012 гг. С 2013 года в Краснодарском крае развивается автоматическая система мониторинга паводковой ситуации (АС МПСКК), которая состоит из сети автоматических уровнемеров (АГК), фиксирующих наблюдения с дискретностью 10 минут на реках Западного Кавказа, в том числе 69 АГК установлены на реках Северо-Западного Кавказа (Мониторинг Эмерсит...). Высокая дискретность наблюдений позволяет фиксировать паводковые случаи, развивавшиеся всего несколько часов на малых реках, которые не охвачены системой Росгидромета. Кроме того, данные реанализа позволяют рассматривать динамику метеорологических параметров за последние 50 лет с часовым шагом и высоким пространственным разрешением.

В связи с этим в данной статье проводится сопоставление динамики осадков и паводковых случаев в 2014-2022 с целью оценки возможных паводочных дат на реках региона в 1970-2013 гг.

Материалы и методы исследования

Для анализа хода осадков в регионе в 2012-2022 гг. - включая паводок в июле 2012 г. - мы использовали данные реанализа ERA5-Land (Muñoz Sabater, 2021). Решающими в выборе были: пространственное разрешение $0,1^\circ$, временной охват 2012-2020 гг. без пробелов, разрешение по времени 1 час. Стоит отметить, что в реанализе ERA5-Land приводятся только конвективные и крупномасштабные осадки, вызванные крупномасштабной атмосферной циркуляцией воздушных масс. Поэтому осадки реанализа не могут совпадать с наблюдениями на метеостанциях. Для анализа осадков на Северо-Западном Кавказе в 1970-2022 гг. использовались архивы осадков на 177 ячейках суши между $37,4-39,8^\circ$ в.д. и $44,0-45,0^\circ$ с.ш. (Рис. 1). В реанализе осадки накапливаются в течение каждого суток в виде значений глубины в метрах. Они были преобразованы в накопленное значение мм в каждый час.

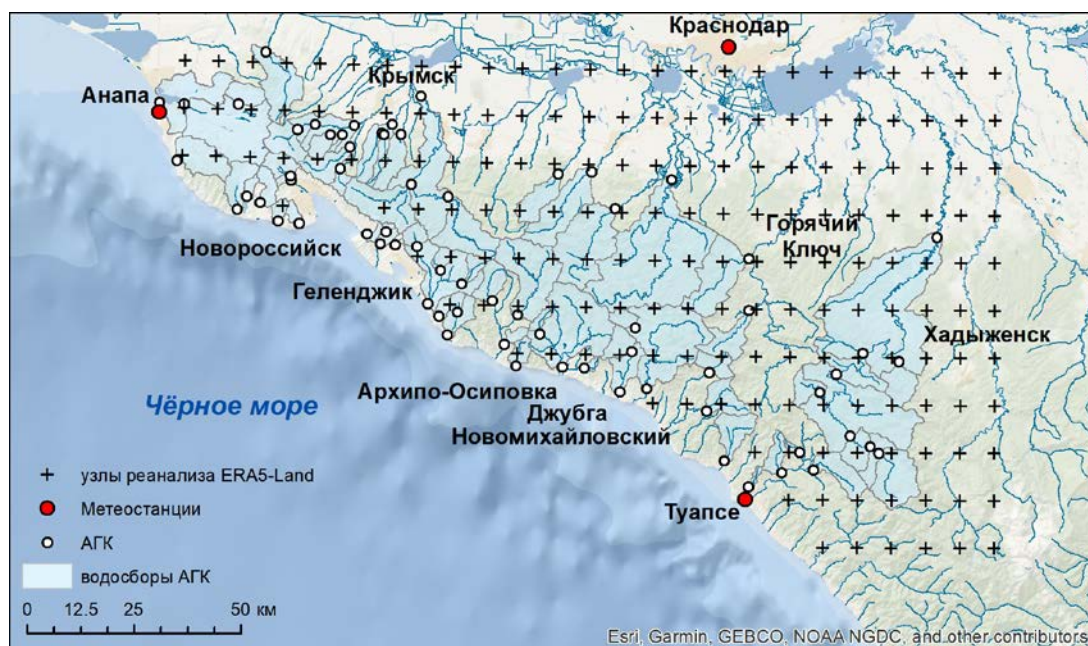


Рис. 1 Накопленные осадки по метеостанциям в 1970-2021 гг.

Для корректировки осадков реанализа по метеонаблюдениям мы взяли суточный ход осадков по метеостанциям Анапа, Краснодар и Туапсе в 1970-2021 гг. (Автоматизированная...). Сопоставили с ними суточный ход осадков для ближайших к ним ячеек реанализа (37.4 и 44.9 – Анапа, 39 и 45 – Краснодар, 39.2 и 44.1 – Туапсе). Далее мы посчитали накопленные осадки за 1970-2021 гг по метеостанциям и по реанализу. Разница между накоплениями по станциям показана на Рис. 2.

Разница на всех трёх пунктах за прошедшее время значительно меняется: в Анапе накапливается превышение осадков реанализа над метеонаблюдениями, в Краснодаре колеблется около нуля, в Туапсе осадки реанализа накапливают превышение по сравнению с метеоданными. При этом этот рост неравномерный как по пунктам, так и по годам.

Так как по годам рост неравномерный, то мы решили разбить временную шкалу на десятилетки (последняя десятилетка больше – 2010-2021 гг.) и для каждой из них посчитать коэффициент для «подтягивания» реанализа к метеонаблюдениям.

Формула следующая:

$$C = (R_{acc_last} - R_{acc_first}) / (ERA_{acc_last} - ERA_{acc_first}) \quad (1),$$

Где C – коэффициент отношения осадков метеонаблюдений к реанализу; R_{acc_last} – накопленная сумма осадков метеонаблюдений к концу десятилетки; R_{acc_first} – накопленная сумма осадков метеонаблюдений; ERA_{acc_las} – накопленная сумма осадков реанализа к концу десятилетки; ERA_{acc_first} – накопленные осадки реанализа к началу десятилетки. Таким образом была получена Табл.

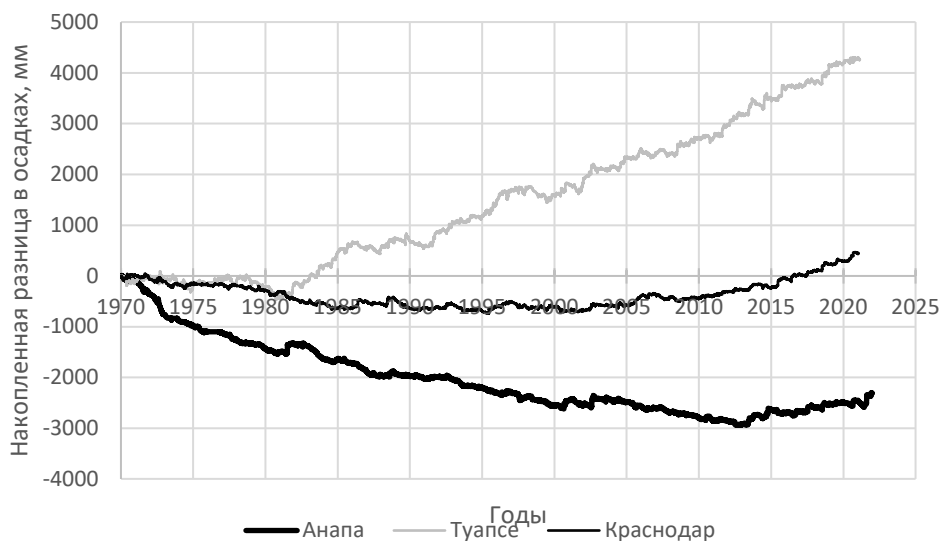


Рис. 2 Накопленные осадки по метеостанциям в 1970-2021 гг.

Табл. Коэффициент отношения осадков метеонаблюдений к реанализу.

десятилетки	Анапа, 37001	Туапсе, 37018	Краснодар, 34927
1970-1979 гг.	0.75	0.98	0.96
1980-1989 гг.	0.91	1.07	0.95
1990-1999 гг.	0.90	1.07	1.00
2000-2009 гг.	0.96	1.09	1.02
2010-2021 гг.	1.07	1.12	1.12

В целом видно, что коэффициент растёт и почти всегда выше 1, т.е. осадки метеостанций выше, чем осадки реанализа. Распределение осадков по интенсивности в осадках реанализа не совпадает с наблюдаемыми на метеостанциях, причём не совпадает сильно, а для изучения паводков принципиально важно не потерять высокоинтенсивные осадки.

Для корректировки осадков за каждые сутки за каждые 10 лет (3650 дней или для последнего периода 4465 дней) было отобрано по 500 наибольших по количеству осадков суток наблюдаемых и по реанализу (примерно 13% от всех суток). Как правило за эти дни для 10 лет выпадает 80-90% осадков из собранных метеостанциями. Для выбранных 500 максимальных значений были рассчитаны перцентили от 0,5 до 1 и было посчитано отношение значение персентилля метеостанций к персентиллю по реанализу. Выходит так, что каждый персентиль это 5 суточных значений. На полученный коэффициент умножались осадки реанализа соответствующего персентилля. Все осадки реанализа, не попадающие в 500 отобранных, умножались на 0.5, все осадки реанализа менее 1 мм в сутки приравнивались к 0.

Полученные коэффициенты для Анапы, Краснодара и Туапсе линейно интерполировались в ячейки реанализа. По интерполированным значениям коэффициентов корректировались суточные осадки во всех 177 ячейках реанализа в 1970-2022 гг. Полученные скорректированные суточные осадки для всех ячеек мы поделили на некорректированные суточные осадки. Так были получены коэффициенты для каждых суток каждой ячейки. Часовые осадки реанализа были умножены на суточные коэффициенты.

Далее полученные ряды осадков по ячейкам реанализа были преобразованы в ряды осадков по водосборам АГК по формуле:

$$P_{AGK} = \sum P^{i,j} \left(\frac{A^{i,j}}{A_{AGK}} \right) \quad (2),$$

где P_{AGK} – осадки на водосборе АГК, мм/час; $P^{i,j}$ – осадки в ячейке i,j , мм/час; $A^{i,j}$ – площадь ячейки в пределах водосбора АГК, км², A_{AGK} – площадь водосбора АГК, км².

Ход уровня 69 АГК за 2014-2022 гг. содержит множество некорректных значений: пропуски, сдвиги абсолютного нуля, влияние растительности. Для их исправления были выполнены следующие шаги:

- дополнение до полной временной шкалы;
- учёт сдвигов нуля;
- удаление выбросов значений уровня с помощью фильтра Хемпеля;
- удаление выбросов значений с шагом более 0,2 м за шаг.

Мы выделили для каждого АГК в ряду наблюдений уровня периоды роста, падения и стагнации уровня. Мы считаем, что если уровень растёт более одного часа (больше 6 шагов по 10 минут) на более 20 см (более 0,2 м за период) без скачков в треть всего роста за шаг, то это паводковый подъём уровня. Итого было выделено 6388 паводковых случаев.

Результаты и выводы

Если рассматривать динамику годовых осадков по водосборам АГК (Рис. 3а), то в регионе они могут колебаться в 3 раза - от 500 до 1500 мм в год. При этом межгодовая изменчивость достигает 500 мм. В 1970-2000 гг. не наблюдается устойчивой тенденции на рост или падение, в начале 2000-х годов фиксируется падение годовых осадков с последующим восстановлением в 2010-е годы. Разностная интегральная кривая для годовых осадков (Рис. 3б) показывает, что в 1970-1990 гг. наблюдается стагнация, далее в 1990-2000 гг. рост с последующим падением к 2007 г; в 2007-2022 гг. можно сказать, что годовые осадки на водосборах не растут.

Максимальные суточные осадки, возможно связанные с формированием паводков, в 1970-2022 гг. показывают другую картину. По Рис. 3в можно отметить большую изменчивость в 1970-х годах, когда для нескольких лет отмечались осадки до 150 мм в сутки, далее в 1980-2000 выделяется период с максимальными суточными осадками до 100 мм, в начале 2000-х – до 50 мм, в 2010-2022 гг. период приближенный к 1970-м годам. Разностная интегральная кривая (Рис. 3г) показывает повышенный период в 1970-е и 2010-е годы и пониженные периоды между ними с некоторым переломом в 2000 годы. Стоит отметить, что динамика суточных максимальных осадков по водосборам более разнообразна, чем по годовым суммам.

Максимальные часовые осадки (Рис. 3д) по водосборам до середины 2000-х годов могут достигать 20 мм, после этого – 25 мм. По разностной интегральной кривой (Рис. 3е) это в общем выражается так же, от по водосборам уже фиксируются значительные отличия, на группе водосборов выделяются 2 периода, на другой – 3 периода.

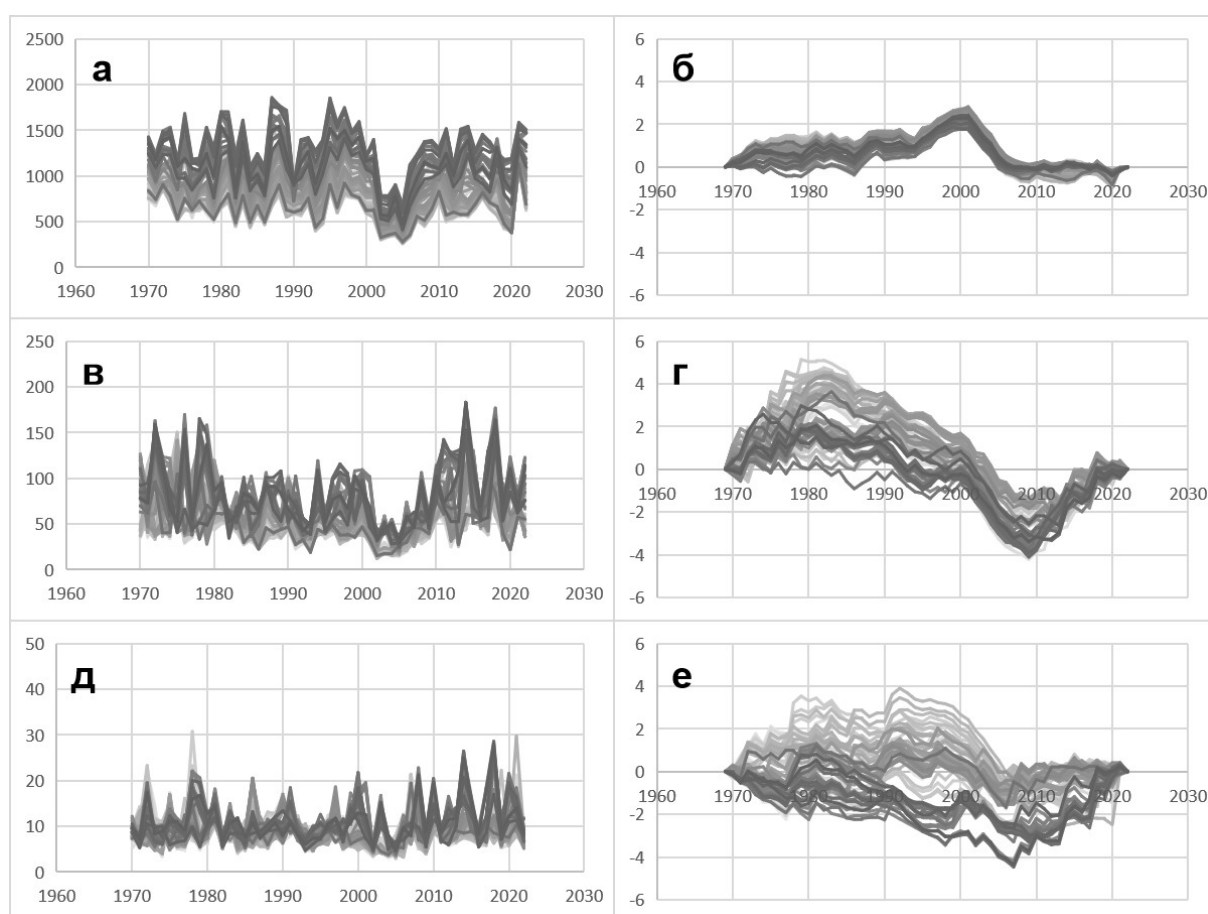


Рис. 3 Динамика осадков по водосборам АГК в 1970-2022 г., а – суммарные годовые осадки, мм; б – разностные интегральные кривые суммарных годовых осадков, в – максимальные суточные осадки, мм; г – разностные интегральные кривые максимальных суточных осадков, д – максимальные часовые осадки, мм; е – разностные интегральные кривые максимальных часовых осадков.

Распределение паводковых случаев по АГК и годовая динамика представлена на Рис. 4. Наибольшее количество паводковых случаев (в среднем более 20 за год) приходится на самые крупные водосборы региона – Абин с притоками, Мезыбь с притоками, Афипис, Вулан, Шебш, Шапсухо с притоками, Пшиш с притоками. В целом за 2014-2022 гг. наблюдается небольшой рост суммарного количества паводковых

случаев, что совпадает с динамикой максимальных суточных и часовых. Исходя из представленного можно сделать предположение, что период 2014-2022 гг. по частоте паводковых случаев подобен 1970-м годам.



Рис. 4 Распределение паводковых случаев в 2014-2022 гг. по водосборам АГК.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта №19-35-60028

Acknowledgments

The work was supported by RFBR project no. 19-35-60028.

Список литературы

1. Панов В.Д., Базелюк А.А., Лурье П.М. Реки Черноморского побережья Кавказа: гидрография и режим стока. Ростов н/Д.: Донской изд. дом, 2012. 607 с.
2. Мониторинг Эмерсит. URL: www.emercit.com/newmap (дата обращения: 14.04.2023)
3. Muñoz Sabater, Joaquín & Dutra, Emanuel & Agusti-Panareda, Anna & Albergel, Clement & Arduini, Gabriele & Balsamo, Gianpaolo & Boussetta, Souhail & Choulga, Margarita & Harrigan, Shaun & Hersbach, Hans & Martens, Brecht & Miralles, Diego & Piles, Maria & Rodriguez-Fernandez, Nemesio & Zsótér, Ervin & Buontempo, Carlo & Thépaut, J.-N. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. 10.5194/essd-2021-82.
4. Автоматизированная Информационная Система Обработки Режимной Информации (АИСОРИ). URL: <http://meteo.ru/it/178-aisori> (дата обращения: 14.04.2023)

Геоморфологические признаки изменения водности рек Приморья в позднем голоцене

Е.А. Шекман

*Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, 690041, Владивосток, Россия
shekman.e@gmail.com*

Аннотация. Для территории Приморского края на основе использования космических снимков, ЦМР и топографических карт проанализировано распространение геоморфологических форм, свидетельствующих об изменении планового положения и водности речных систем, рассмотрены закономерности их распространения. Типичным свидетельством изменения природных условий в процессе развития речной сети в прошлом являются палеоруслу. Географическое распространение установленных участков для территории Приморья отражает доминантные факторы трансформации речных систем и тесно коррелирует с ландшафтно-гидрологическим зонированием территории на области формирования, транзита и аккумуляции стока.

Ключевые слова: палеоруслу, речной перехват, перестройка речной сети, структурно-гидрографический анализ.

Geomorphological signs of changes in the water regime of the Primorye rivers in the Late Holocene

E.A. Shekman

*Pacific Geographical Institute FEB RAS, 690041, Vladivostok, Russia
shekman.e@gmail.com*

Abstract. For the territory of Primorsky Krai, based on the use of satellite images, DEM and topographic maps, the distribution of geomorphological forms indicating a change in the planned position and water content of river systems is analyzed, the patterns of their distribution are considered. Typical evidence of changes in natural conditions during the development of the river network in the past are paleoruls. The geographical distribution of the established sites for the territory of Primorye reflects the dominant factors of the transformation of river systems and closely correlates with the landscape-hydrological zoning of the territory in the areas of formation, transit and accumulation of runoff.

Keywords: paleochannels, beheading, reconstruction of the river network, structural and hydrographic analysis.

Введение

Речные излучины являются характерным элементом речных долин. В условиях преобладания на территории Приморья среднегорного рельефа, наибольшее распространение речные излучины получили в межгорных депрессиях, по которым заложены крупнейшие реки – Уссури, Бикин, Раздольная, Илистая, Партизанская и др., имеющие выработанный слабонаклонный продольный профиль. Развитие меандр напрямую связано с изменениями условий природной среды, влияющих на кинетическую энергию водного потока и баланс процессов транспорта и аккумуляции наносов. Водность реки и руслоформирующие расходы испытывают регулярные

изменения с разной продолжительностью цикла – это и ежегодные сезонные колебания, а также более продолжительные, связанные с изменением климатических условий. Отдельно стоит отметить экстремальные расходы редкой повторяемости в период паводков, во время которых кинетическая энергия водного потока обеспечивает возможность активного врезания излучин, транспорта и переотложения материала в речных долинах.

Характерным индикатором изменений природных условий в прошлом, обусловленных не только климатическими, но и тектоническими и морфодинамическими факторами, выступают палеоруслы (старицы, староречья). В.Ю. Украинцевым [1] дан подробный обзор распространения основных типов палеорусел в бассейне Волги в контексте изменения водности реки в поздневалдайское время. Указывается, что в большинстве случаев старицы соразмерны современным излучинам, но также встречаются участки палеорусел, заметно превышающие по размеру современные аналоги. Такие староречья называют «большими палеоруслами» (large paleochannels), а если они имеют меандрирующую форму – большими меандрами, или макроизлучинами [2]. Их крупный размер обычно объясняется формированием в эпохи повышенного стока рек [2; 3].

Нет оснований полагать, что распространение палеорусел, не свойственно другим регионам. При этом следует учитывать существенные различия в масштабах, геолого-геоморфологических и климатических условиях, в которых происходило развитие речных систем.

Материалы и методы

Участки палеорусел и характерные для них геоморфологические формы определялись на основе анализа спутниковых снимков компании ESRI, для дополнительной верификации также использовались снимки компаний Yandex, Google и топографические карты. Работа со снимками проводилась в ГИС SAS Planet. Интересующие участки экспортировались в ESRI ArcMap 10.3, где использовались для дальнейшего получения на основе ЦМР метрических характеристик, вреза, моделирования сети тальвегов для сопоставления планового положения русел, фиксируемых на космических снимках и топографических картах, с гипсометрической поверхностью.

Результаты и их обсуждение

Процесс перестройки речной сети является следствием взаимодействия сложного комплекса долинообразующих факторов: рельефно-субстратной основы, тектонических движений, климата, динамики поступления обломочного материала в русло и т.д. Направленность воздействия каждого из факторов в большинстве случаев не одинакова. Для установления причин изменений пространственного положения гидросети необходим анализ соотношений участия каждого из факторов [4].

Процесс развития гидрографической сети Приморья был достаточно сложным, поскольку в условиях длительного унаследованного (с мезозоя и нижнего кайнозоя) развития основных направлений стока происходила интенсивная моделировка речных бассейнов. Она сопровождалась многочисленными перехватами и перестройками разнопорядковых речных систем в результате дифференцированных тектонических движений, излияний эффузивов, регрессивной эрозии и других причин. Общее тектоническое погружение восточной окраины материка и трансгрессия моря в позднем кайнозое привели к расчленению существующих речных систем этой территории и погружению большей части их под уровень морских вод [5].

Согласно используемой для территории Русской равнины классификации палеорусел [6], в Приморье представлен весь спектр геоморфологических форм,

свидетельствующих об изменениях водного режима. Сразу стоит отметить, что большинство рек Приморья не сопоставимы по масштабу с крупными реками Русской равнины и имеют существенные отличия по историческим циклам водности. Этими факторами обусловлена меньшая кратность превышения по ширине между старицами и современными излучинами. Исключение составляют старицы в нижнем течении р. Илистая, в бассейне которой имело место резкое экстремальное увеличение водности в результате перехвата р. Раздольная, долина которой была перекрыта в результате излияния покровных базальтов и сток перераспределялся через систему р. Илистая в оз. Ханка. В данном случае имеет место более чем 10-кратное превышение ширины стариц над современными излучинами.

Унаследованные излучины приурочены в основном к ландшафтно-гидрологической зоне транзита рек, протекающих в межгорных впадинах – среднее течение рек Киевка, Партизанская. Конфигурация таких рек обусловлена заложением вдоль разломных структур со значительной протяженностью главной реки. В результате развития экстремальных паводков русло главной реки быстро аккумулирует сток с притоков, активно врезаясь и транспортируя обломочный материал, выносимый со склонов.

Староречья имеют две основные локализации, внутриконтинентальные и на прибрежных равнинах. Первые, сосредоточенные в пределах Уссури-Ханкайской депрессии, в долинах рек Раздольная (урочища Старореченское и Утёсное) и нижнем течении р. Илистая, имеют гетерогенный характер и обусловлены как климатическими факторами, так и геологическими, вызвавшими неоднократное перераспределение стока между бассейнами данных рек.

Большое количество стариц идентифицируется в пределах прибрежных равнин побережья Японского моря на юге Приморья (особенно в Хасанском районе). Помимо климатических факторов образованию стариц поспособствовали неоднократные колебания локальных базисов эрозии в результате трансгрессии в позднем кайнозое с последующей интенсивной перестройкой существующей речной сети.

Меандровые цирки представлены ограниченно и локализованы в нижнем течении Илестой. Особый интерес представляет проявление на данном участке сразу двух геоморфологических форм палеоизлучин. Также здесь представлены крупные старицы. Если первые обусловлены более современными колебаниями климатических условий, то вторые связаны со скачкообразным увеличением водности в результате речного перехвата бассейна Раздольной в результате образования базальтовой плотины после извержения Барановского вулкана. Позднее, после ее разрушения, водность существенно снизилась, чем обусловлена более чем десятикратная разница по ширине между современным и палеоруслом.

Прямолинейные участки палеоизлучин характерны для рек, протекающих в межгорных впадинах при выходе на слабонаклонные межгорные равнины, сложенные рыхлым материалом, где, обладающий значительной кинетической энергией поток в периоды высоких расходов воды, продолжает активно эродировать поверхность. Такие участки установлены для рек Арсеньевка, Павловка, Зеркальная, Рудная и др.

Системы крупных грив и веера блуждания, образуемые в процессе свободного меандрирования, широко представлены в долине Уссури на всей протяженности от оз. Ханка до впадения Амур, что обусловлено достаточной мощностью водного потока, протекающего в условиях слабонаклонной равнины, сложенной легко эродируемыми осадочными отложениями.

Разветвленные системы излучин локализованы на юге Приморья и представлены в низовьях рек Раздольная, Партизанская, Киевка.

Выводы

На территории Приморья представлены все типы геоморфологических форм палеорусел, при этом, ввиду малых площадей водосбора, большинство из них сложно соотносить с аналогами, описываемыми в работах других авторов для рек Русской равнины из-за несоответствия масштабов объектов.

Прямая увязка с изменениями водного режима напрямую зависит от качества имеющегося палеогеографического материала. Интерпретацию осложняет и то, что помимо климатических факторов, на развитие речных систем существенное влияние оказывает и комплекс морфодинамических и тектонических факторов. Имеются принципиальные различия в руслоформирующей деятельности рек в горах и на равнинах. Горные реки обладают большей кинетической энергией потока, возникают различные формы транспорта наносов и механизмы его взаимодействия с руслом. Установленные участки с палеоруслами отчетливо коррелируют с ландшафтно-гидрологическими областями транзита и аккумуляции стока, отсутствуя в областях формирования.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 22-27-00222

Acknowledgments

The work was supported by RSF grant 22-27-00222

Список литературы

1. Украинцев В.Ю. Следы мощного речного стока в долинах рек бассейна Волги в поздневалдайскую эпоху // Геоморфология, 2022, том 53, № 1, С. 26–34.
2. Панин А.В., Сидорчук А.Ю. Макроизлучины (“большие меандры”): проблемы происхождения и интерпретации // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 2006. № 6. С. 14–22.
3. Vandenberghe J. and Sidorchuk A. Large palaeomeanders in Europe: Distribution, formation process, age, environments and significance // *Palaeohydrology*. Springer, Cham, 2020. P. 169–186.
4. Крылов И.И. Долинный морфолитогенез при речных перестройках. М.: Наука, 1980. 104 с.
5. Короткий А.М., Коробов В.В. Перестройка речных систем и устойчивость водосборных бассейнов Сихотэ-Алиня // Изменения климата, природные катастрофы и становление ландшафтов юга ДВ. Владивосток: Дальнаука, 2008. С. 55-68.
6. Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Власов М.В. Мощный поздневалдайский речной сток в бассейне Дона // Изв. РАН. Сер. геогр. 2013. № 1. С. 118–129.

MNDWI и интенсивность затопления как геоэкологические показатели изменения окружающей среды аллювиальных маршей Аль-Ховиза юго-восточного Ирака

В. А. Широкова^{1,2}, Х. Х. Аль-Нуссаири^{1*}, В. И. Нилиповский¹

¹Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия

²Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, Москва, Россия
husamkalf@yahoo.com

Аннотация. В этой статье инвентаризация и обследование водных покровов проводились в аллювиальных маршах Аль-Ховиза, размещенных в нижнем месопотамском бассейне юго-восточного Ирака. ДЗЗ и ГИС использовались для обнаружения изменений в регионе, а также изменений значений MNDWI с использованием TM и ETM (Landsat 7, 8) соответственно. Использована программа обработки ArcGIS для классификации площадей водного покрова за период 2010-2019 гг. Разработаны картосхемы для оценки интенсивности затопления АМ по сезонам за период с 2009 по 2018 г. Отмечено, что результаты были отрицательными - площадь АМ Аль-Ховиза, занятая водой, сократилась, и, соответственно, увеличилась территория АМ, занятая густой растительностью, и лишь - в 2018 и 2019 гг. результаты были положительными.

Ключевые слова: Месопотамские аллювиальные марши, ЮНЭСКО, Аль-Ховиза, MNDWI, пространственный анализ.

MNDWI and inundation intensity as geocological indicators of environmental change in the Al-Howiza alluvial marshes of southeastern Iraq

V. A. Shirokova^{1,2}, H. K. Al-Nussairi^{1*}, V. I. Nilipovsky¹

¹ State University of Land Use Planning, Moscow, Russia

² Vavilov Institute for the History of Science and Technology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
husamkalf@yahoo.com

Abstract. In this article, an inventory and survey of water covers was carried out in the alluvial marshes of Al-Howiza, located in the lower Mesopotamian basin of southeastern Iraq. Remote sensing and GIS were used to detect changes in the region as well as changes in MNDWI values using TM and ETM (Landsat 7, 8) respectively. The ArcGIS processing program was used to classify water cover areas for the period 2010-2019. Maps have been developed to assess the intensity of AM flooding by season for the period from 2009 to 2018. It was noted that the results were negative - the area of AM Al-Howiza, occupied by water, decreased, and, accordingly, the territory of AM, occupied by dense vegetation, increased, and only - in 2018 and 2019 the results were positive.

Keywords: Mesopotamian Alluvial Marches, UNESCO, Al-Howiza, MNDWI, spatial analysis.

Введение

Аллювиальные марши (далее – АМ; заболоченные земли; болотные угодья). Месопотамской низменности (Месопотамские или Иракские аллювиальные марши) – водно-болотные угодья района, расположенные на южно-восточном Ираке и частично на юго-западе Ирана. АМ Аль-Ховиза лежат к востоку от реки Тигр, и часть их находится на

территории Ирана. Иранская сторона АМ, известная как АМ Аль-Азим, питается от реки Карха, в то время как Тигр и его притоки Мушарах и Аль-Кахлаа поставляют воду в АМ иракской стороны, только с гораздо меньшим количеством воды, чем Карха. Во время весеннего паводка воды Тигра могут также поступать в АМ Аль-Ховиза, которые осушаются с помощью Аль-Кассара – реки, имеющей огромное значение в поддержании АМ Аль-Ховиза как проточной системы и тем самым предотвращающей их засоление.

АМ Ирака включены в список Всемирного наследия ЮНЕСКО. Обладая культурными и природными особенностями, болотные угодья играли важную роль в развитии самых ранних городов и в возникновении разных народностей в южной Месопотамии, называемых колыбелью цивилизации [4, 7].

Обширная территория АМ, покрытая водой, особенно в паводковые сезоны, напрямую воздействует на режим и глубину залегания грунтовых вод; что при засушливых условиях приводит к засолению почвы. Застой воды на поверхности почвы в течение долгого времени приводит к заболачиванию, которое вызывает при хорошем дренаже выщелачивание почвы и снижает степень засоления. Наличие воды в плохих дренажных почвах образует скопление воды, которое вызывает в жаркое время года из-за высокого испарения накопление солей на поверхности почвы.

Мелиоративные мероприятия во время ирако-иранской войны в 1980 г. сократили площадь АМ с 15000-2200 км² до менее чем на 2000 км². Центральные и Аль-Хаммар АМ сократились на 97% и превратились в земли, покрытые соляной коркой. Река Аль-Кахлаа и ее притоки сбрасывали воду в АМ и топи на востоке и северо-востоке от города Аль-Кахлаа. Маршевые и болотные почвы по своей природе глинистые и, вероятно, плохо дренированные. Они постоянно затоплены и покрыты преимущественно рогозом и гидрофитными растениями [1].

Материалы и методы исследования

До 1973 г. АМ Аль-Ховиза занимали площадь 1800 км² (Табл. 1), в 1980-90-е гг. площадь АМ сократилась. После 2003 г. началось восстановление АМ, но не в таком объеме, как требовалось. Связано это было с нехваткой воды в реке Тигр и ее притоках.

Из таблицы 2.11 видно, что процент заполнения АМ Аль-Ховиза водой в 2008 г. составил 78% от общей площади (1055 км²), пригодной для затопления, а в июле 2010 г. уменьшился до 62%, далее в октябре 2018 г. составил 30% в пределах провинции Майсан.

Табл. 1 Интенсивность затопления АМ в пределах провинции Майсан [2].

Аллювиальных маршей	Площадь до засухи 1973 г км ²	Площадь после восстановления км ²			Площадь, подходящая для затопления км ²	Степень затопления %	год
		Площадь исключена из наводнения /км ²	Незаполненная площадь км ²	Заполненная площадь км ²			
АМ Аль-Ховиза	1800	745	232	823	1055	78	2008
	1800	745	338	717	1055	68	2009
	1800	745	401	654	1055	62	2010
	1800	745	739	316	1055	30	2018
Центральные АМ	1450	222	1155	73	1228	6	2008
	1450	222	1155	73	1228	6	2009
	1450	222	1069	159	1228	13	2010
	1450	220	885	345	1230	28	2018

Для земель Центральных АМ затопление в 2008 г. составило 6%, в июле 2010 г. увеличилось до 13%, в октябре 2018 г. - до 28% [2]. Очевидно, что незатопленная территория подверглась засухе и превратилась в бесплодную землю, покрытую соляной коркой.

Результаты и выводы

По данным Иракского центра восстановления АМ, путем измерения расхода воды в АМ Аль-Ховиза с помощью прибора (SON TEK ADCP M9) была оценена интенсивность затопления по сезонам за период с 2009 по 2018 г. (Рис. 1). Отмечено, что летом и весной 2014 г. интенсивность затопления превысила 60% в результате увеличения осадков и, соответственно, расходов воды рек с иранской и иракской сторон, а зимний сезон - более сбалансирован и стабилен по сравнению с остальными сезонами.

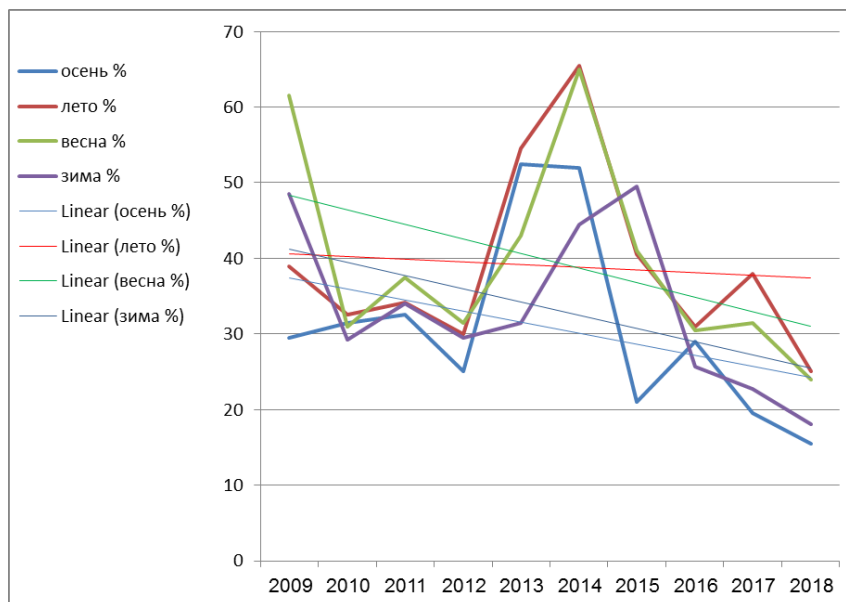


Рис. 1 Интенсивность затопления АМ Аль-Ховиза за период с 2009 по 2018 г.

Показано, что на сегодняшний день, согласно данным центра АМ и Министерства водных ресурсов, восстановлено 20% от общей площади АМ, и для полного восстановления АМ потребуется 5 лет.

Модифицированный стандартизованный индекс различий воды (MNDWI) использует зеленый канал и канал SWIR для улучшения отображения объектов открытых водных пространств. Он также понижает значения областей застройки, которые часто коррелированы с открытыми водными пространствами в других индексах.

$$MNDWI = (Green - SWIR) / (Green + SWIR), \text{ где}$$

Green = значения пикселей из зеленого канала

SWIR = значения пикселей из коротковолнового инфракрасного канала.

Спутниковые снимки Landsat состоят из семи разных полос, каждая из которых представляет собой отдельную часть электромагнитного спектра [3; 5]. В Табл. 2 показаны характеристики каждой полосы с точки зрения длины волны и ясности их использования:

Значения разницы в индексе водного покрова (MNDWI) варьируются от +1 до -1. Отрицательные значения указывают на отсутствие водного пространства в регионе, в то время как положительные значения указывают на его наличие.

Нормированная разница водного пространства была рассчитана и классифицирована, определено изменение площади этого покрова. Чтобы рассчитать нормализованный разностный индекс воды, мы объединили полосы 2 и 4, используя спектральный инструмент в программе ГИС. Изображения территории АМ Аль-Ховиза были получены за период с 2010 по 2019 гг. (Рис. 2).

Замечено, что разница в этот период является наиболее положительной величиной в 2018 и 2019 гг. из-за увеличения количества дождевых осадков и наличия воды из питательных рек на иракской и иранской сторонах.

Чтобы отличить водное пространство от остального земного покрова, мы выполняем процесс неконтролируемой классификации с использованием неконтролируемого

инструмента в программе ГИС. Изображения были получены (Рис. 3а, 3б) за каждый месяц 2019 г. (Рис. 4).

Табл. 2 Технические характеристики и применение ТМ и ЕТМ + (Landsat 7, 8) [6].

Спектральные полосы	Длина волны (µm)	Разрешение (m)	Использование
1 (сине-зеленый)	0.45-0.52	30	Отличие почвы от растительности. Растительность лиственных деревьев отличается от хвойных растений.
2 (зеленый)	0.52-0.61	30	Охарактеризует пик в растительности, который полезен для оценки силы роста растений.
3 (красный)	0.63-0.69	30	Различие видов растений.
4 (отраженный вблизи IR)	0.76-0.90	30	Разграничение водных объектов.
5 (отраженная mid IR)	1.55-1.75	30	Проникновение в тонкие облака и различие содержания влаги в почве и растительности.
6 (термальный IR)	10.4-12.5	120	Полезно для термического картирования и оценки влажности почвы.
7(отраженная mid IR)	2.08-2.35	30	Чувствителен к содержанию влаги в растительности.

Следует, что в течение всего 2019 г. разница была не очень большая, так как этот год считается водообильным, имеются лишь некоторые различия в июне, июле и августе, потому что в течение данных месяцев осадков не выпадало.

Заключение

Спектральные полосы (7,4,3) на изображениях (ТМ, ЕТМ +) обеспечивают четкое представление о различных водных покровах и помощь наблюдателю в процессе визуальной интерпретации космических изображений, а также процессе цифровой классификации.

Использование (MNDWI) обеспечивает высокую эффективность распознавания территорий, затопленных водой и занятых растительностью. Отмечено, что результаты были отрицательными - площадь АМ Аль-Ховиза, занятая водой, сократилась, и, соответственно, увеличилась территория АМ, занятая густой растительностью, и лишь - в 2018 и 2019 гг. результаты были положительными. Результаты были положительными из-за увеличения количества осадков и наличия воды из питательных рек на иракской и иранской сторонах.

Показано, что на сегодняшний день, согласно данным центра АМ и Министерства водных ресурсов, восстановлено 20% от общей площади АМ, и для полного восстановления АМ потребуется 5 лет.

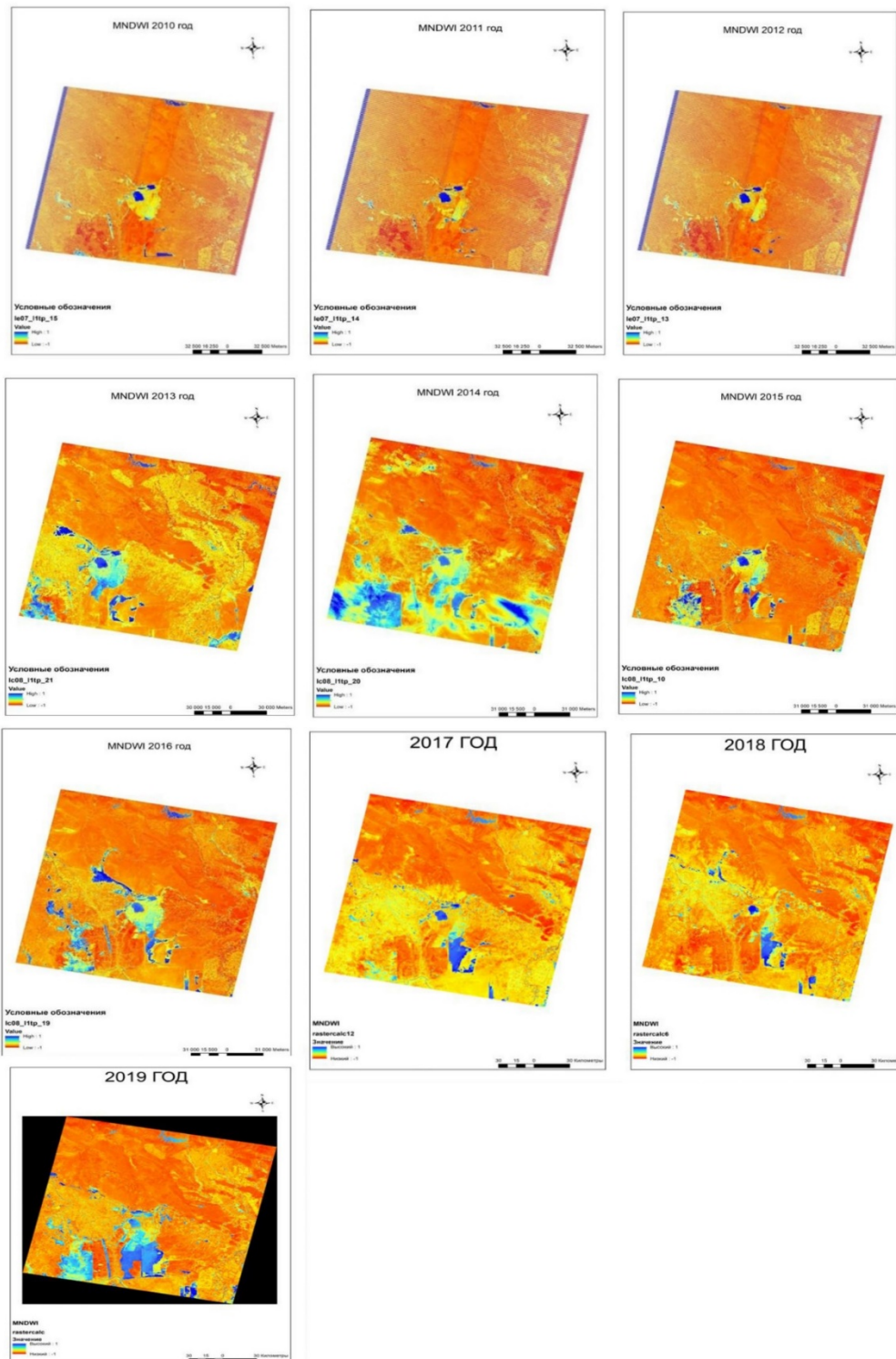
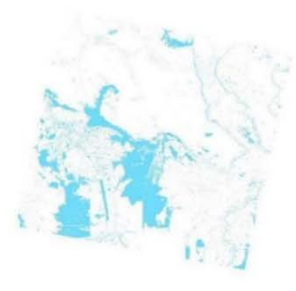
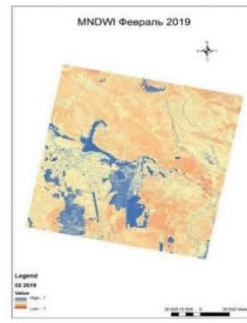
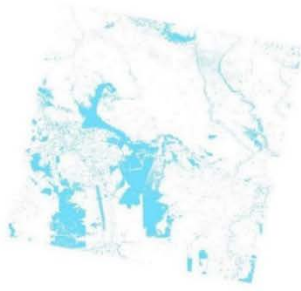
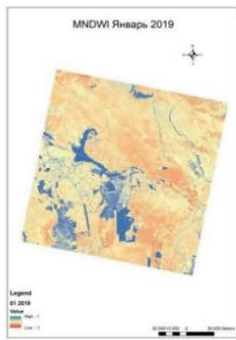
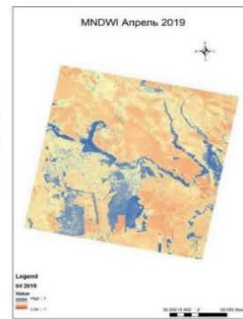
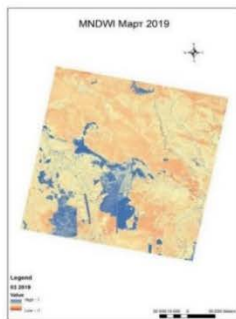


Рис. 2 MNDWI с 2010 по 2019 г. в АМ Аль-Ховиза и прилегающих территориях.



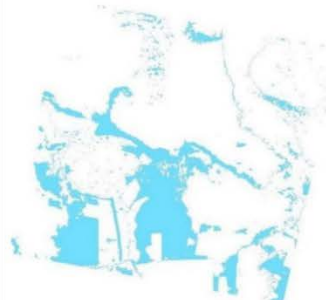
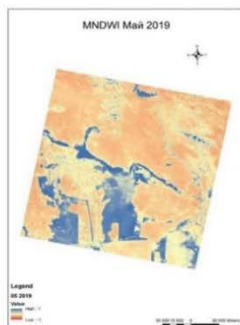
Январь 2019

Февраль 2019



Март 2019

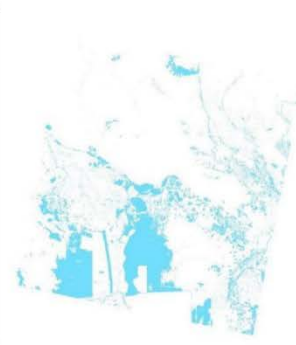
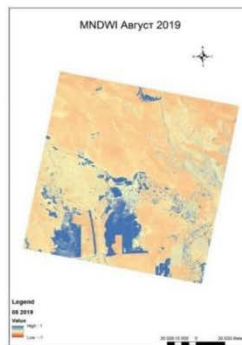
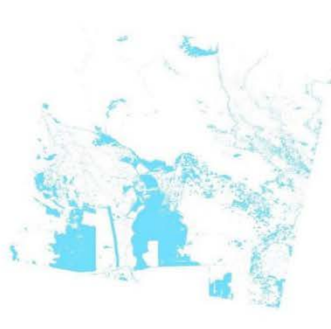
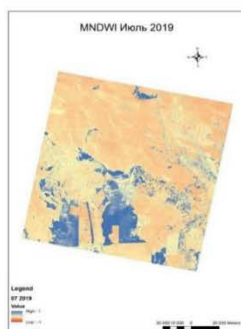
Апрель 2019



Май 2019

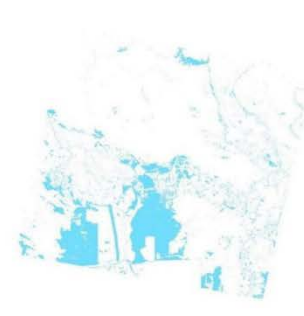
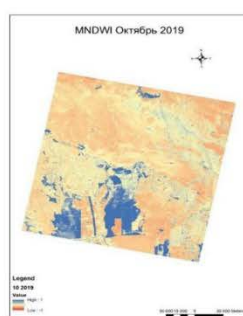
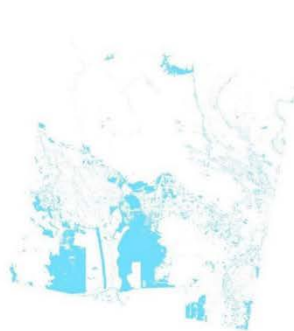
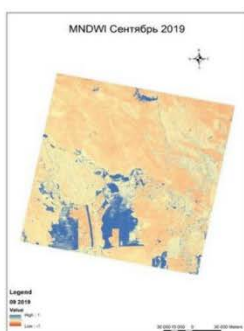
Июнь 2019

Рис. 3а Отличие водного пространства от остального земного покрова за месяц с января по июнь 2019 г.



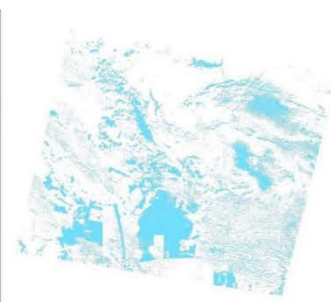
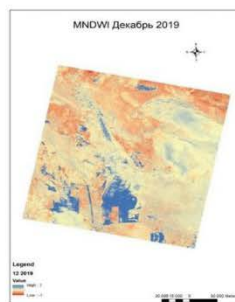
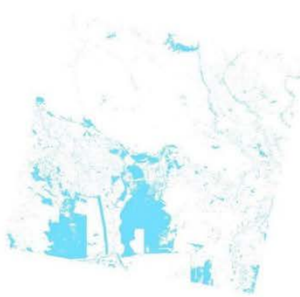
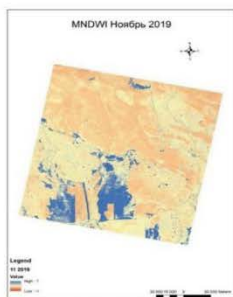
Июль 2019

Август 2019



Сентябрь 2019

Октябрь 2019



Ноябрь 2019

Декабрь 2019

Рис. 36 Отличие водного пространства от остального земного покрова за месяц с июля по декабрь 2019 г.

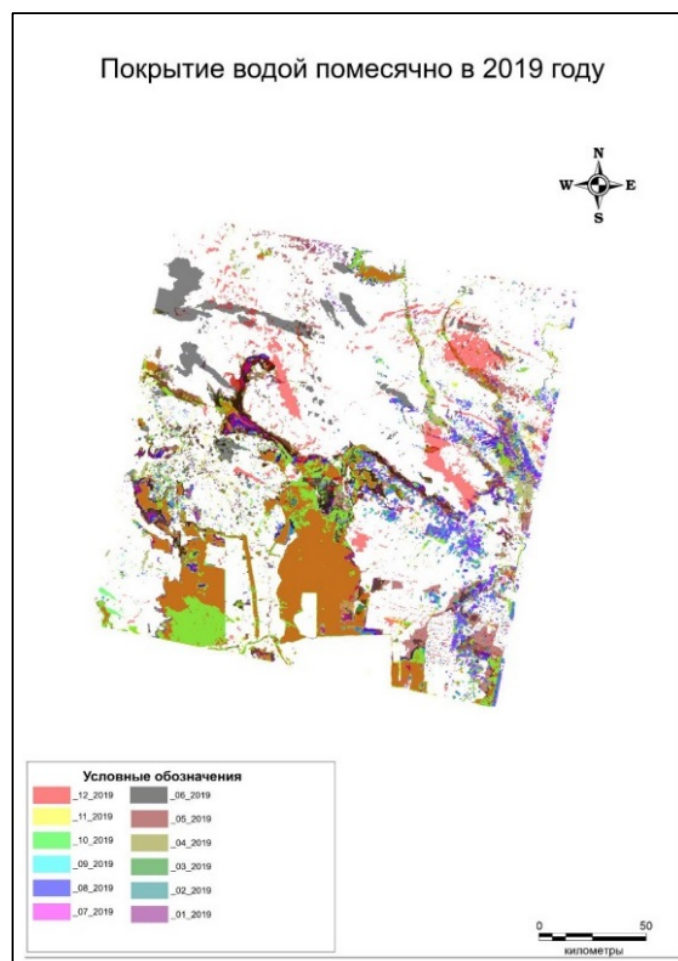


Рис. 4 Отображение покрытия водой АМ Аль-Ховиза и прилегающих территорий на протяжении 2019 г.

Список литературы

1. Al-Nussairi, H and Hassan, K. Study and evaluation the Marshes and surrounding areas in south of Iraq. E3S Web of Conferences 150, 03011(2020) EDE7-2019. © The Authors, published by EDP Sciences. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 / <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.
2. Центр восстановления Иракского аллювиального марша и водно-аллювиального угодья (Фондовые неопубликованные данные Министерства водных ресурсов). –2019 г. (на арабском языке).Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Лебедева Л.С., Виноградова Т.А. Моделирование процессов формирования стока рек высокогорной криолитозоны Восточной Сибири (на примере хребта Сунтар-Хаята) // География и природные ресурсы. 2019. № 1. С. 178–186.
3. Hassan, E. Study of the effect of changes in some meteorological elements on the values of NDVI and NDWI in Hor Ibn-Najim using remote sensing techniques. Thesis of master degree submitted to the college of science, Mustansiriyah University in Iraq. 2018.
4. Широкова В.А., Аль-Нуссаири Х.Х., Лепехин П.П. NDVI как геоэкологический показатель изменения окружающей среды аллювиальных маршей Аль-Ховиза юго-восточного Ирака // Международный сельскохозяйственный журнал. № 1 (379). 2021. С. 50-52.
5. Jain, A.K., 1989. “Fundamental of Digital Image Processing”.
6. U.S. Geological Survey / <https://www.usgs.gov/>
7. The Ahwar of Southern Iraq: Refuge of Biodiversity and the Relict Landscape of the Mesopotamian Cities / <http://whc.unesco.org/en/list/1481>

Современные особенности формирования маловодий в бассейнах Дона и Урала

И.Ю. Ширшова

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва
ireneshirsova@yandex.ru*

Аннотация. В связи с изменением климата на территории России наблюдается увеличение экстремальности, особенно на южной части в бассейнах Дона и Урала в последние годы отмечаются рекордные продолжительности маловодных лет. В связи с этим была поставлена цель исследовать причины и особенности формирования маловодий и проанализировать их изменения за период с 1946-2019 гг. для бассейнов рек Урал и Дон. Пространственно-временное распределение маловодий было изучено с помощью трех методов: метод, основанный на расчете модульных коэффициентов, метод пороговых значений и расчет индексов засух (SDI и SPI). Для моделирования засух был использован метод машинного обучения, основанный на регрессии – метод опорных векторов (SVR). Результаты актуальны для дальнейшего изучения природы затяжных маловодий и возможности прогнозировать их на реках Дон и Урал.

Ключевые слова: Экстремальные явления, гидрологическая засуха, метеорологическая засуха, маловодье, SVR, SPI, SDI, индексы засухи, метод пороговых значений

Modern features of low flow formation in the basins of Don and Ural

I.Y. Shirshova

*Lomonosov Moscow State University, Moscow
ireneshirsova@yandex.ru*

Abstract. Due to climate change in Russia, there is an increase in extremity, especially in the southern part in the basins of the Don and the Urals, record-breaking durations of low flow years have been observed in recent years. In this regard, the goal was set to investigate the causes and features of the formation of low flow and analyze their changes over the period from 1946-2019 for the basins of the Ural and Don rivers. The spatial-temporal distribution of low flow was studied using three methods: the method based on the calculation of modular coefficients, the threshold level method and the calculation of drought indices (SDI and SPI). A regression-based machine learning method, the Support vector regression Machine Method (SVR), was used to model droughts. The results are relevant for further study of the nature of prolonged low flow and the possibility of predicting them on the Don and Ural rivers.

Keywords: Extreme events, hydrological drought, meteorological drought, low flow, SVR, SPI, SDI, drought indices, threshold level method

Введение

В XXI веке экстремальные гидрологические явления, связанные с высокой и низкой водностью, все чаще происходят на реках Европейской территории России (ЕТР).

Особенно остро ощущается формирования глубоких маловодий, которые охватывают огромную площадь территории и их продолжительность может достигать несколько лет.

В связи с этим для исследования была выбрана южная часть ЕТР, а именно, бассейны р. Дон и р. Урал, так как в последнее время на этих территориях наблюдаются рекордные продолжительности маловодных лет. Также здесь сконцентрирована большая плотность людей, высокоразвиты промышленное и сельскохозяйственное производства, гидроэнергетика и т.д. Исходя из этого возрастает потребность в адаптации водного хозяйства к современным изменениям и условиям формирования водных ресурсов.

Материалы и методы исследования

Для оценки временной изменчивости маловодий на основе исследований прошлых лет было принято решение разделить временной ряд во всех используемых методах по переломному году на два периода 1946-1977 гг. и 1978-2019гг, так как к 1977-1978 гг. относят нарушение стационарности рядов стока [1].

В работе используются для определения групп с экстремальной низкой водностью в многолетних колебаниях стока *метод расчета модульных коэффициентов*, которые соответствуют определенной обеспеченности. Согласно [2] выделяют: маловодные годы ($66,7\% < P < 83,3\%$) и очень маловодные годы ($P > 83,3\%$). Для выделения маловодных групп по кривой обеспеченности были рассчитаны модульные коэффициенты:

$$K_1 = Q_1 / \bar{Q} - \text{для маловодных годов;}$$
$$K_2 = Q_2 / \bar{Q} - \text{для очень маловодных годов.}$$

Они были рассчитаны для двух обрабатываемых периодов до 1977 г. и после 1977 г. Для расчетов использовались среднегодовые расходы по всем гидрологическим постам. Посчитанные группы маловодных и очень маловодных лет по модульным коэффициентам, снятым с кривой обеспеченности, позволили рассчитать такие характеристики, как частота, которая рассматривалась, как повторяемость маловодных периодов больше 2-х лет и средняя продолжительность явления, которая рассчитывалась, как отношение суммы числа маловодных лет и очень маловодных лет к периоду наблюдения.

Для идентификации экстремальных гидрологических явлений на исследуемых реках в качестве пороговых величин расходов воды были выбраны значения повторяемости один раз в десять лет, что соответствует 10% и 90% обеспеченности, соответственно. Считалось, что период с расходами период, в течение которого наблюдается снижение расходов ниже порогового $Q_{90\%}$ - дефицитный. За каждый год определялся объем дефицитов и их продолжительность. В случае, если сток будет выше величины $Q_{10\%}$, будет наблюдаться экстремальное увеличение водности. В этом случае также считается суммарное превышение выбранного порогового значения и продолжительность данного периода. Кроме того, определялись интенсивности экстремальных явлений — отношение объемов дефицитов (превышений) к продолжительности соответствующего периода.

Анализ проводился для 19 гидрологических постов на основе среднемесячных расходов воды. Были также использованы индексы метеорологической и гидрологической засухи SPI (Стандартизированный индекс осадков) SDI (Стандартизированный индекс засухи стока). Гидрологический индекс рассчитывался на основе среднемесячных расходов, для расчета метеорологического индекса были использованы данные о среднемесячных осадках, полученных на основе реанализа ERA5. Для моделирования засухливых явлений была использована модель машинного

обучения – метод опорных векторов (SVR). В качестве входных данных были использованы полученные значения индексов SDI и SPI.

Результаты и выводы

Методы модульных коэффициентов показал, что до переломного года на р. Урал – пост Оренбург было самое крупное по продолжительности (5 лет) маловодье, которое длилось с 1973 года по 1977 год (рис.2). В целом, в 1950-1951 гг., 1954-1955 гг. и 1975-1977 гг. маловодье охватило большую часть бассейна. В период после 1977. максимальная продолжительность (6 лет) наблюдается на р. Илек – ст. Веселый1. Самыми маловодными годами оказались 2017-2019 гг., также 2010 г. и 2015 г. В среднем продолжительность маловодных групп составляет 3-4 года по всему бассейну р. Урал.

Для Дона до переломного года отмечаются крупные и длительные маловодья особенно в 50-е года и 70-е годы с максимальной продолжительностью 7 лет (рис.1). В период после 1977 года маловодные годы всё так же частые и продолжительные и могут достигать 6-7 лет с максимальной продолжительностью (до 11 лет) – прослеживается у реки Северский Донецкий с 2007г. по 2017г.



Рис. 1 Повторяемость группировок маловодных лет за период 1978 – 2019 гг. для рек донского бассейна.

Корреляция в летне-осенний период между метеорологической и гидрологической засухой колеблется от 0,3 до 0,7. Было отмечено, что засуха отчетливо проявляет себя именно в период с июня по октябрь в индексах SPI и SDI, поэтому был взят для изучения связи между ними именно этот сезон, в который наблюдается рост активного потепления и постепенного его спада. По результатам корреляции, не только летне-осеннего периода, но и периода в целом, можно сделать вывод, что гидрологическая засуха не полностью объясняется метеорологической засухой, а именно дефицитом осадков. И действительно, геологические, физические характеристики бассейна, почвенный, растительный покров, землепользование, а также взаимосвязь между реками и грунтовыми водами играет немалую роль на формирование маловодий.

На Рис. 3 представлены примеры достаточно высокой корреляции на реках уральского бассейна.



Рис. 2 Повторяемость группировок маловодных лет за период с 1978– 2019 гг. для рек уральского бассейна.

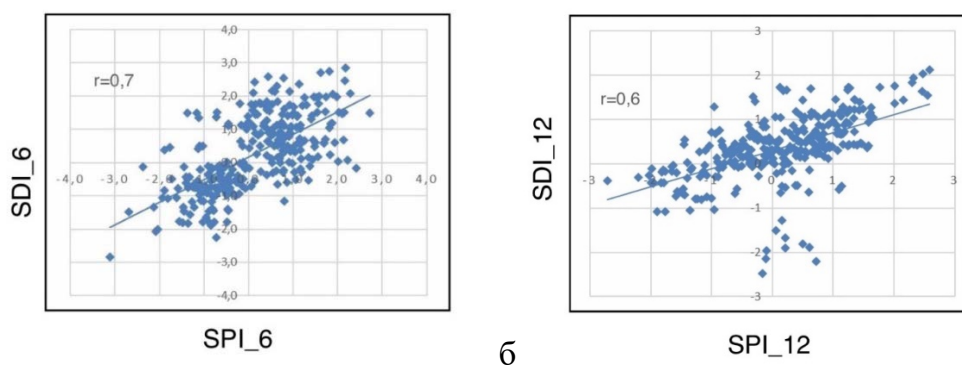


Рис. 3 Корреляции между SPI (6,1 2) и SDI (6, 12) (в качестве примеров разных временных масштабов с более высокой корреляцией) р. Таналык – Мамбетово (а) и р. Сакмара – Верхне-Галеево (б).

В методе пороговых значений временной ряд был разделен так же по переломному году. Можно отметить наибольшие суммарные дефициты на реке Дон ст-ца Казанская (7,7 км³) и Георгиу-Деж (6,3 км³). Также на этих постах самые продолжительные периоды низкой водности, которые в среднем в год делятся 5 месяцев, но во втором периоде заметно снизилась до $T_{ср} = 1,6$ мес. После 1977 года наибольшей продолжительностью дефицитных периодов обладают реки с меньшими водосборами р. Битюг и р. Калитва со средней продолжительностью 2,6 мес.

Сравнивая два периода, можно отметить, что самым маловодным годом был 1949-1950 годы, где отмечается продолжительность дефицита от 8 до 10 месяцев, а для второго периода значения стока находились ниже порогового значения в среднем в

течение 5 месяцев в 2010-2015 гг. Несмотря на снижение средней продолжительности после переломного года, интенсивность явления во втором периоде возросла. Это говорит о том, что в среднем объём дефицитов в месяц намного больше в период после 1977 года (рис.4).

Анализируя результаты, полученные при помощи индекса SDI, можно сказать, что экстремальных засух в период после 1977 года действительно намного меньше, чем в первый период. Экстремальность явления проявляется только в межсезонных и долгосрочных засухах. Наиболее экстремальный год был 2015 и 1983-1984 гг.

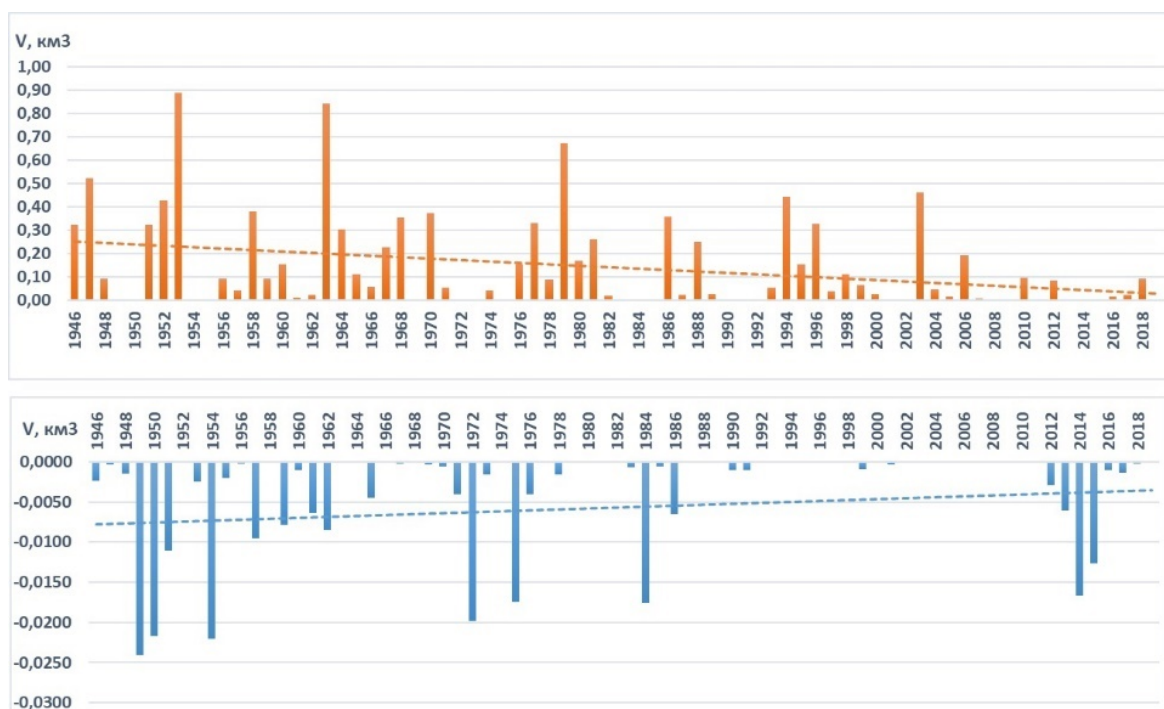


Рис. 4 Рассчитанные суммарные объемы превышений (оранжевый) и объемы дефицитов (синий) для р. Калитва – Погорелов.

Входные данные были разбиты на обучающую (1946-2005) и тестовую выборку (2005-2019). По результатам проделанного алгоритма можно отметить, что характер графика предсказанных значений синхронизирует с реальными значениями, так как локальные экстремумы совпадают в случае гидрологического и метеорологического индекса. Это означает, что модель была хорошо обучена, однако большие различия в предсказанных от фактических значений, может говорить о неправильном выборе алгоритма интерполяции, по которому идет предсказание (Рис. 5) Метрические показатели качества модели для SDI: $R^2 = 0,4$; MSE = 0,4; MAE = 0,5; RMSE = 0,6 и для SPI: $R^2 = 0,4$; MSE = 0,4; MAE = 0,5; RMSE = 0,6. В среднем для бассейнов р. Дон и р. Урал значение R^2 колеблется от 0,3 до 0,4, такие низкие показатели говорят о том, что интерполяционные методы алгоритма сильно сглаживают значения. Для повышения качества прогноза требуется регуляризация модели. Использование классического алгоритма SVR не дал надёжных результатов.

В данном исследовании были изучены формирования маловодий, возникающие в бассейнах рек Дон и Урал с помощью различных методов. В результате использованных методов были проанализированы характеристики аномалий стока до и после переломного года. Несмотря на то, что частота аномалий снизилась после 1977 года, в последнее десятилетие наблюдается интенсивное нарастание экстремальности засух,

особенно критичные значения ощутимы для Уральского бассейна. Донский бассейн тоже подвержен глубоким и рекордно длительным маловодьям.

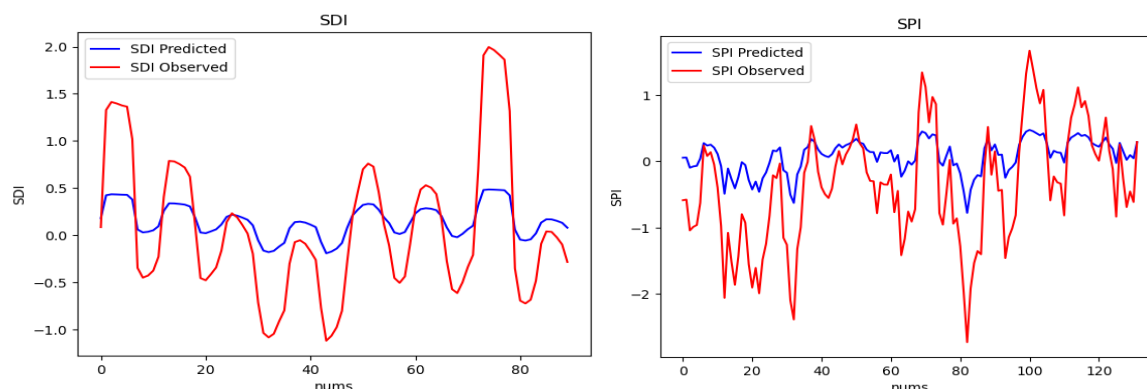


Рис. 5 Пример моделирования индексов SDI₆ и SPI₆ для р.Хопер – Бесплемяновский.

В данном исследовании была произведена попытка использование модели SVR в классическом виде, которая показала не самые удачные результаты моделирования в связи с сильным сглаживанием значений, но совпадающие экстремумы фактических и предсказанных значений говорит о том, что обучение прошло достаточно успешно. Однако есть перспектива использования данного алгоритма уже в модифицированном виде и приблизить значения к реальным. Таким образом, исследование подтвердило, что длительные дефициты стока возникают в данных бассейнах в последние годы, создавая социально-экономические и экологические трудности. В связи с этим возрастает необходимость научиться эффективно предсказывать события гидрологической засухи и неотъемлемо с ней связанной метеорологической засухи. Это позволит достичь высоких результатов в прогнозировании гидрологических засух и поспособствует принятию грамотных решений, чтоб избежать тяжелых последствий от этого экстремального гидрометеорологического явления.

Список литературы

1. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Телегина А.А. Изменения поверхностного и подземного стока рек России и их режимов в условиях нестационарного климата // Вестник Российского фонда фундаментальных исследований. 2013. Том 6. № 78. С. 34-42.

2. СП 33–101–2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Госстрой России, 2004. 70 с.

Загрязнение Чудско-Псковского озера биогенными веществами (по данным за 2003-2020 гг.)

К.А. Шихирина^{1,2*}, О.В. Задонская¹

¹Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург

²Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, г. Санкт-Петербург
kristinashikhirinaa@gmail.com

Аннотация. Чудско-Псковское озеро – крупнейший трансграничный водный объект в Европе, со стоком которого в Балтийское море поступает значительный объем биогенных веществ, вызывающих его эвтрофирование. В данной работе были проанализированы и сопоставлены с предельно допустимыми концентрациями (ПДК) для рыбохозяйственных водоемов результаты лабораторного анализа 1138 проб для соединений фосфора и 1145 проб для соединений азота в придонном и поверхностном слоях водной толщи. Все пробы были отобраны и изучены в лаборатории Псковским ЦГМС. Установлено превышение ПДК в 33 пробах: в 17 по аммонийному азоту N-NH₄, в 8 по нитритному азоту N-NO₂; еще в 8 пробах концентрация N-NO₂ была равна ПДК. Предполагаемые причины наблюдаемых превышений имеют как антропогенную, так и естественную природу.

Ключевые слова: Чудско-Псковское озеро, эвтрофикация, биогенные вещества, предельно допустимые концентрации (ПДК), рыбохозяйственные водоемы, загрязнение воды.

Lake Peipus nutrients pollution in 2003-2020

K.A. Shikhirina^{1,2*}, O.V. Zadonskaya¹

¹State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

²Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg, Russia
kristinashikhirinaa@gmail.com

Abstract. Lake Peipus is the largest transboundary water object in Europe, which flow brings a significant amount of nutrients to the Baltic Sea causing its eutrophication. In this paper the results of laboratory analysis of 1138 samples for phosphorus and 1145 samples for nitrogen were compared with the standards of maximum permissible concentrations for fishery lakes, the excess was found in 33 samples: 17 with the excess of N-NH₄ and with N-NO₂; in 8 samples concentrations of N-NO₂ were maximum permissible for fishery lakes. It was supposed that both anthropogenic and natural ways of genesis could cause the observed cases of excess.

Keywords: Lake Peipus, eutrophication, nutrients, standards of maximum permissible concentrations for fishery lakes, water pollution.

Введение

Чудско-Псковское озеро – крупнейший трансграничный водный объект в Европе, со стоком которого в Балтийское море поступает значительный объем биогенных веществ [4; 10; 11]. Поступление биогенных веществ является основной причиной эвтрофирования Балтийского моря и на сегодняшний день представляет одну

из главных проблем в сфере управления водными ресурсами моря для множества государств, имеющих к нему выход [9; 10].

Целью данного исследования является выявление случаев превышения за период с 2003 по 2020 год ПДК по тем соединениям азота и фосфора, по которым в настоящее время разработаны нормативы для рыбохозяйственных водоемов – это азот аммонийный (N-NH₄), нитритный (N-NO₂), нитратный (N-NO₃), а также фосфор фосфатов (P-PO₄).

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являются результаты лабораторных анализов 1138 проб для соединений фосфора и 1145 проб для соединений азота в придонном и поверхностном (0-0,5 м) слоях водной толщи. Схема расположения точек отбора проб отображена на рис. 1.

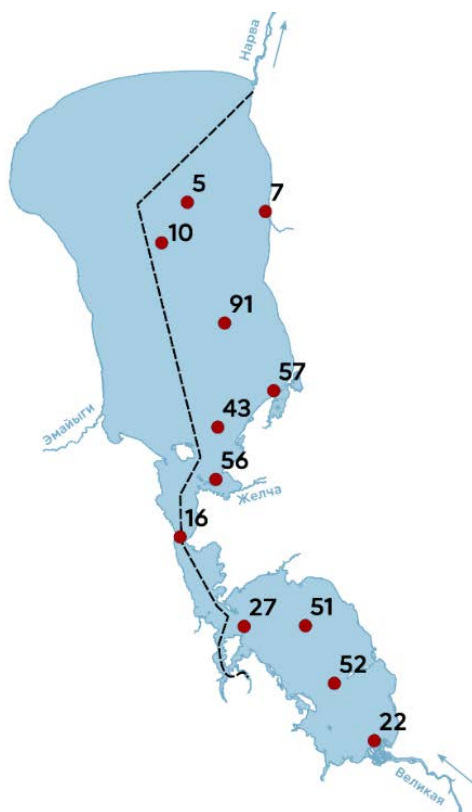


Рис. 1 Схема расположения точек отбора проб воды. Черной штриховой линией показан участок российско-эстонской государственной границы, проходящей по акватории озера.

Пробы отбирались 4 раза в год (1 раз за сезон) батометром Молчанова ГР-18. Отбор проб и лабораторный анализ осуществляется Псковским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Псковский ЦГМС) – филиалом Северо-Западного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СЗ УГМС). Согласно международному соглашению, данные передаются Российско-Эстонской комиссии по охране и рациональному использованию трансграничных вод и доступны все членам рабочих групп комиссии; один из авторов является членом российской рабочей группы. Все упомянутые учреждения находятся в составе Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), а все процедуры, включая отбор проб и лабораторные анализы, выполняются по ее стандартным методикам.

Результаты и выводы

В Табл. 1 представлены ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения по различным формам азота и фосфора [1] и число проб изучаемого ряда, в которых было зафиксировано превышение ПДК для рыбохозяйственных водоемов:

Табл. 1 ПДК азота и фосфора в растворенных минеральных формах и число случаев его превышения в поверхностном слое.

Вещество	N-NH ₄	N-NO ₂	N-NO ₃	P-PO ₄
ПДК, мг/дм ³	0,4	0,02	9,1	0,2
Число проб (кратность ПДК)	9 (от 1,35 до 4,1)	9 (от 1 до 2,4)	0	0

По аммонийному азоту в 9 пробах ПДК было превышено как минимум в 1,35 раз, максимальное было зафиксировано в 51 точке в августе 2014 года (4,1 ПДК). По нитритному азоту (N-NO₂) в 4 пробах содержание было равно ПДК, в 5 превышало его: максимум наблюдался в августе 2017 в точке 16 (2,4 раза). По нитратному азоту и фосфатному фосфору в изучаемый период превышений ПДК зафиксировано не было – все концентрации были в пределах нормативных. Подробнее информация о превышениях ПДК по аммонийному и нитратному азоту представлена в Табл. 2.

Табл. 2 Случаи превышения ПДК по N-NH₄ и N-NO₂ в поверхностном слое.

Год	Месяц	Чудское озеро	Псковское и Теплое озера	Кратность ПДК
2003	март	7 (N-NH ₄)	-	1,63
2009	октябрь	10 (N-NO ₂)	-	1,0
2012	август	-	51 (N-NH ₄)	1,83
2013	март	-	16, 22 (N-NO ₂)	1,0-2,0
	май	5 (N-NO ₂)	-	1,5
	август	-	27 (N-NO ₂)	1,0
2014	август	7, 10, 57 (N-NH ₄)	16, 51, 52 (N-NH ₄), 22 (N-NO ₂)	1,35-4,1
2017	август	7 (N-NO ₂)	16 (N-NO ₂)	1,4-2,4
	октябрь	-	27 (N-NO ₂)	1,0

Летом 2014 года наблюдался скачок концентраций азота во всем озерном комплексе, на тот же период приходятся и концентрации с наибольшей кратностью ПДК (например, по N-NH₄ до 4,1). В точке 22 (устье реки Великая) этот скачок наиболее вероятно имеет антропогенную природу, а в остальных точках точно обозначить причину сложно в силу взаимодействия множества внутриозерных процессов.

Для получения более полного представления о ситуации в озере, были также проанализированы пробы, отобранные в придонном слое озера (Табл. 3, 4).

Табл. 3 ПДК азота и фосфора в растворенных минеральных формах и число случаев его превышения в придонном слое.

Вещество	N-NH ₄	N-NO ₂	N-NO ₃	P-PO ₄
ПДК, мг/дм ³	0,4	0,02	9,1	0,2
Число проб (кратность ПДК)	8 (от 1,05 до 6,25)	7 (от 1,0 до 3,5)	0	0

В придонном слое наблюдается похожая ситуация – за тот же период отбора проб превышений ПДК по нитратному азоту и фосфатному фосфору зафиксировано не было. Максимальная кратность ПДК относится к пробе, отобранной в августе 2014 года

в точке 26 на глубине 14,5 метров. Высокие концентрации азота типичны для августа ввиду высокой активности фитопланктона и максимального прогрева водной толщи в этот период, но, тем не менее, за рассматриваемые 18 лет максимальные концентрации азота фиксируются именно в августе 2014 года, кратно отличаясь от значений в другие годы до и после 2014. Пиковое значение в поверхностном слое, зафиксированное в 22 точке, указывает на вероятную антропогенную природу и единичный характер выброса такого масштаба.

Табл. 4 Случаи превышения ПДК по N-NH₄ и N-NO₂ в придонном слое. В скобках глубина отбора проб.

Год	Месяц	Чудское озеро	Псковское и Теплое озера	Кратность ПДК
2008	октябрь	-	22 (4 м, N-NH ₄)	1,25
2009	март	5 (9,2 м, N-NO ₂)	-	1,0
	октябрь	10 (10,3 м, N-NO ₂)	-	1,0
2012	август	-	22 (3,1 м, N-NH ₄)	1,18
2013	март	-	22 (1,8 м, N-NO ₂)	3,5
2014	август	5 (9,2 м), 91 (7,5 м) (N-NH ₄)	16 (14,5 м), 51 (4,5 м), 22 (2,5 м) (N-NH ₄)	1,05-6,25
2015	август	-	27 (N-NH ₄)	1,33
2016	март	-	27 (5,2 м), 52 (3,5 м) (N-NO ₂)	1,0
2017	август	5 (9,2 м, N-NO ₂)	16 (14, N-NO ₂)	1,4-2,15

Доля природной составляющей в биогенной нагрузке составляет для азота 35-45% [6]. В антропогенной точечной биогенной нагрузке наибольший удельный вес (более 90%) от источников на российской стороне принадлежит предприятиям жилищно-коммунального хозяйства – очистным сооружениям канализации городских и районных водоканалов. Не меньшую роль играет и диффузный сток от сельскохозяйственных источников, включая диффузный вынос поверхностными водотоками с сельхозугодий и неорганизованный загрязненный сток с сельхозпредприятий [2; 7].

Экстремально высокие концентрации чаще всего появляются в результате взаимодействия нескольких факторов. Так, например, есть данные, что рост нитратного азота в весенний период коррелирует с активным развитием сине-зеленых водорослей в августе прошлого года [13]. Случаи превышения ПДК в зимний и весенний периоды, вероятно, вызваны высвобождением азота из поверхностных донных отложений [5], сформировавшихся не только в прошедший сезон вегетации, но в предыдущие годы и десятилетия. Было рассчитано, что в изучаемый период поступление азота со стоком реки Великая превышает ассимиляционную способность озера [7; 12], что вызывает отложение и накопление с годами азота в донных осадках. В ряде работ отмечается значительный запас биогенных веществ в почвах сельхозугодий, благодаря чему уровень биогенной эмиссии сможет сохраняться еще достаточно долго [6].

Причиной накопления донных осадков с повышенным содержанием азота и фосфора является высокая как антропогенная, так и природная биогенная нагрузка с водосбора. Высвобождаясь в зимний период, биогенные вещества вызывают не только вторичное загрязнение, но и способствуют изменению экосистемы озера. Таким образом, изучение содержания биогенных веществ и их распределения по акватории озера все еще остается актуальной проблемой, требующей дальнейших исследований.

Список литературы

1. Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 г. N 552 "Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения" (с изменениями и дополнениями от 10 марта 2020 года)
2. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Нарва. Книга 2. Оценка экологического состояния и ключевые проблемы речного бассейна реки Нарва. 2014. 106 с. Доступна online: https://www.nord-west-water.ru/upload/docs/skiovo/skiovo_narva-book-2.pdf. Дата обращения: 14.06.2023.
3. Задонская, О. В. Сравнительный анализ применения различных методов оценки поступления азота и фосфора от сельского хозяйства в бассейне реки Нарвы / О. В. Задонская, Н. С. Обломкова, А. Ю. Брюханов // *АгроЭкоИнженерия*. 2022. № 1(110). С. 142-155.
4. Задонская, О. В. Трансграничное Чудско-Псковское озеро: проблемы мониторинга и оценки состояния по биогенным веществам // *Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Материалы II Международной конференции, Казань, 19–24 мая 2019 года*. Казань: Академия наук Республики Татарстан, 2019. С. 83-88.
5. Игнатьева, Н. В. Роль донных отложений в круговороте фосфора в Псковско-Чудском озере // *Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах. Материалы V Всероссийского симпозиума с международным участием, 10–14 сентября 2012 г., г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2012. С. 99-103.*
6. Кондратьев С. А. Метод расчета внешней нагрузки на Чудско-Псковское озеро с Российской территории водосбора / Кондратьев С. А., Мельник М. М., Шмакова М. В., Маркова Е. Г., Ульянова Т. Ю. // *Общество. Среда. Развитие (Terza Humana)*. 2010. №1. С. 183-197.
7. Лозовик Петр Александрович, Фрумин Григорий Тевелевич Современное состояние и допустимые биогенные нагрузки на Псковско-Чудское озеро // *Труды КарНЦ РАН*. 2018. №3.
8. Никерина, Н. В. Особенности мониторинга и отчетности российской Федерации по нагрузке загрязняющими веществами в рамках Хельсинкской комиссии / Н. В. Никерина, О. В. Задонская // *Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития / MGO 2020 имени Л. Н. Карлина: труды IV Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 16–17 декабря 2020 года. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2020. С. 280-283.*
9. Официальный сайт Хельсинкской комиссии ХЕЛКОМ на русском языке Электронный ресурс. Доступна online: <http://www.helcom.ru>. Дата обращения: 8.05.2022.
10. Псковско-Чудское озеро / Науч. ред. Т. Тимм, А. Раукас, Ю. Хаберман, А. Яани. Тарту: Eesti Loodusfoto, 2012. 490 с.
11. Соколов, А. А. Чудско-Псковское озеро (монография, серия Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР) / Л.: Гидрометеиздат, 1941. 223 с.
12. Фрумин, Г. Т. Динамика поступления биогенных элементов в Псковско-Чудское озеро со стоком рек / Г. Т. Фрумин // *Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Материалы II Международной конференции, Казань, 19–24 мая 2019 года. Том Часть 2*. Казань: Академия наук Республики Татарстан. 2019. С. 199-203.
13. Mäemets, H., Haldna, M., Laugaste, R. and Palmik, K. Oscillations in nutrients and in macrophyte vegetation of lake Peipsi (Pskovsko-Chudskoe). // *Органическое*

вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах. Материалы V Всероссийского симпозиума с международным участием, 10–14 сентября 2012 г., г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2012. С. 97-99.

14. Opportunities for combining data of Estonian and Russian monitoring to reflect on water quality in large transboundary Lake Peipsi / O. Tammeorg, L. Tuvikene, P. Nõges [et al.] // Journal of Great Lakes Research. 2022.

Спутниковое картографирование негативного воздействия золотодобывающих предприятий на природную среду криолитозоны (на примере Магаданской области)

А.Н. Шихов^{1,2*}, П.Г. Илюшина^{2,3}, О.М. Макарьева^{2,4}, А.А. Землянскова^{2,4}

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь

²Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

⁴Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан

shikhovan@gmail.com

Аннотация. Золотодобыча на рудных и россыпных месторождениях сопровождается значительным воздействием на природную среду криолитозоны. В настоящей работе на основе разновременных снимков со спутников Landsat и Sentinel-2 оценена площадь нарушения земель при золотодобыче в Магаданской области, а также ее динамика за последние 20 лет. Общая площадь нарушенных земель оценена в 41 206 га в 2000–2002 гг. и 72 602 га в 2022 г., с увеличением на 26 031 га за последние 4–6 лет. При оценке не учитывались площади, занятые искусственными водоемами на участках разработки, а также участки добычи, на которых восстанавливается растительность. Основная площадь нарушенных земель приходится на западную часть области. Так, в поймах рек Берелёх и Дебин нарушенные земли с полным отсутствием растительности занимают соответственно 16,0 и 11,2% площади. В то же время, в пойме р. Берелех выявлено восстановление растительности на исторических участках золотодобычи на общей площади 19900 га. С применением модуля C2RCC программного пакета SNAP также оценено содержание взвешенных веществ в воде рек Берелёх, Аян-Юрях и Колыма в сравнении с фоновыми значениями. Установлено, что основным источником загрязнения рек взвешенными веществами являются разрабатываемые россыпные месторождения золота в пойме р. Берелёх. При этом сезонная изменчивость загрязнения определяется гидрологическими условиями (мутность уменьшается в период межени и растет при высоких уровнях воды).

Ключевые слова: золотодобыча, нарушение земель, загрязнение водотоков, взвешенные вещества, Landsat, Sentinel-2, NDVI, Магаданская область.

Satellite-based mapping of the impact of gold mining enterprises on the natural environment of the permafrost zone (on the example of the Magadan region)

A.N. Shikhov^{1,2*}, P.G. Ilyushina^{2,3}, O.M. Makarieva^{2,4}, A.A. Zemlianskova^{2,4}

¹Perm State University, Perm, Russia

²St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

³M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁴North-Eastern State University, Magadan, Russia

shikhovan@gmail.com

Abstract. Gold mining at ore and alluvial deposits causes a substantial impact on the natural environment in cryolithozone. In this study, we estimated the area of lands degraded due to gold mining in the Magadan region and its dynamics over the past 20 years using

multi-temporal images from the Landsat and Sentinel-2 satellites. The total area of gold-mining sites was estimated as 41,206 ha in 2000–2002 and 72,602 ha in 2022, with an increase of 26,031 ha over the past 4–6 years. Moreover, this is a lower-boundary estimate, without taking into account man-made reservoirs and historical mines recovered by vegetation. Most of impacted areas are located in the western part of the region. We found that the floodplains of the Berelekh and Debin Rivers are most heavily impacted by gold mining with a removed vegetation canopy occupying 16.0% and 11.2% of their area. Along with the land degradation assessment, we found that 19,900 ha of historical gold-mining sites in the Berelekh River basin are recovered by vegetation. Using the C2RCC processor (module of the SNAP software package), the content of suspended solids in the water of the rivers Berelekh, Ayan-Yuryakh and Kolyma, was estimated in comparison with natural values (typical for non-contaminated water). We found that the main source of suspended matter in the rivers is the alluvial gold deposits located in the floodplain of the Berelekh river. The seasonal variability of water contamination is determined by hydrological situation (water turbidity decreases during low-flow periods and increases during high-flow periods).

Keywords: gold mining, land degradation, watercourse pollution, suspended solids, Landsat, Sentinel-2, NDVI, Magadan region.

Введение

Золотодобыча на рудных и россыпных месторождениях сопровождается значительным воздействием на природную среду, в частности загрязнением рек взвешенными веществами [4] и тяжелыми металлами [5], нарушением земель, в том числе обезлесением и изъятием сельхозугодий [6]. В регионах с суровым климатом и сплошным распространением многолетней мерзлоты, к числу которых относится Северо-Восток России, восстановление ландшафтов на нарушенных участках занимает продолжительное время, что усугубляет перечисленные проблемы [1]. Магаданская область занимает первое место в России по добыче россыпного золота [2] Объем добычи увеличился с 14,5 т. в 2013 г. до 19,8 т. в 2021 г., что ведет к обострению существующих экологических проблем. С учетом значительной площади нарушенных земель, возрастает необходимость их регулярного спутникового мониторинга, а также оценки восстановления растительного покрова на ранее отработанных участках месторождений.

Материалы и методы исследования

Для оконтуривания участков нарушения земель при золотодобыче в Магаданской области использовались общедоступные данные со спутников Landsat и Sentinel-2, а также различные дополнительные данные для выделения из участков со сходными с ними спектральными характеристиками. Для территории Магаданской области были собраны три непрерывных покрытия безоблачных летних снимков, а именно Landsat-7 за 2000–2002 гг. и Sentinel-2 за 2016–2018 и 2022 гг.

Исторические участки золотодобычи (за 2000–2002 гг.) выделены на основе 16 снимков Landsat-7 ETM+, полученных в июле и августе. Идентификация проводится как двухэтапная процедура. На первом этапе были выявлены все лишённые растительности участки со значениями нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI 0,1 и ниже, а на втором этапе среди них были отобраны участки нарушенных при золотодобыче земель. Для автоматизации была создана модель геообработки в ArcGIS ModelBuilder.

Выделение нарушенных земель по снимкам Sentinel-2 выполнено аналогичным образом. Исходными данными были 26 пар снимков, полученных в июле-августе 2016 (для 11 участков – в 2017 или 2018 гг.) и 2022 г. В качестве дополнительных данных

был использован полученный в 2021 г. картографический слой горных отводов на территорию Магаданской области.

Как и при работе со снимками Landsat, оценка площади нарушенных земель выполнена на основе расчета NDVI и его разности (для выявления участков земель, нарушенных за период между съемками). При нарушении растительного покрова происходит резкое снижение NDVI. Участки земель, нарушенные при золотодобыче, полностью лишены растительного покрова и имеют характерные значения NDVI от 0,0 до 0,1, за исключением тех случаев, когда они покрыты водой. Эти критерии были использованы при создании модели геообработки в программном пакете ArcGIS для выделения нарушенных земель. Модель реализует расчет NDVI по парным снимкам, расчет разности NDVI, а также нормализованного разностного водного индекса NDWI для исключения водных объектов. В результате работы модели создаются два картографических слоя – нарушенные земли за период между двумя датами съемки, а также суммарная площадь нарушенных земель на всех участках, где производилась разработка в 2016-2022 гг. (пример приведен на рис. 1).

Для каждой пары снимков после автоматического выделения нарушенных земель проведена ручная верификация, которая включала удаление гарей от природных пожаров, а также отмелей на реках, которые образовались вследствие естественной изменчивости русел. Существенным ограничением метода является исключение из анализа водных объектов, которые образовались при разработках, поскольку до 10-20% общей площади разработок могут быть заняты искусственными водоемами.

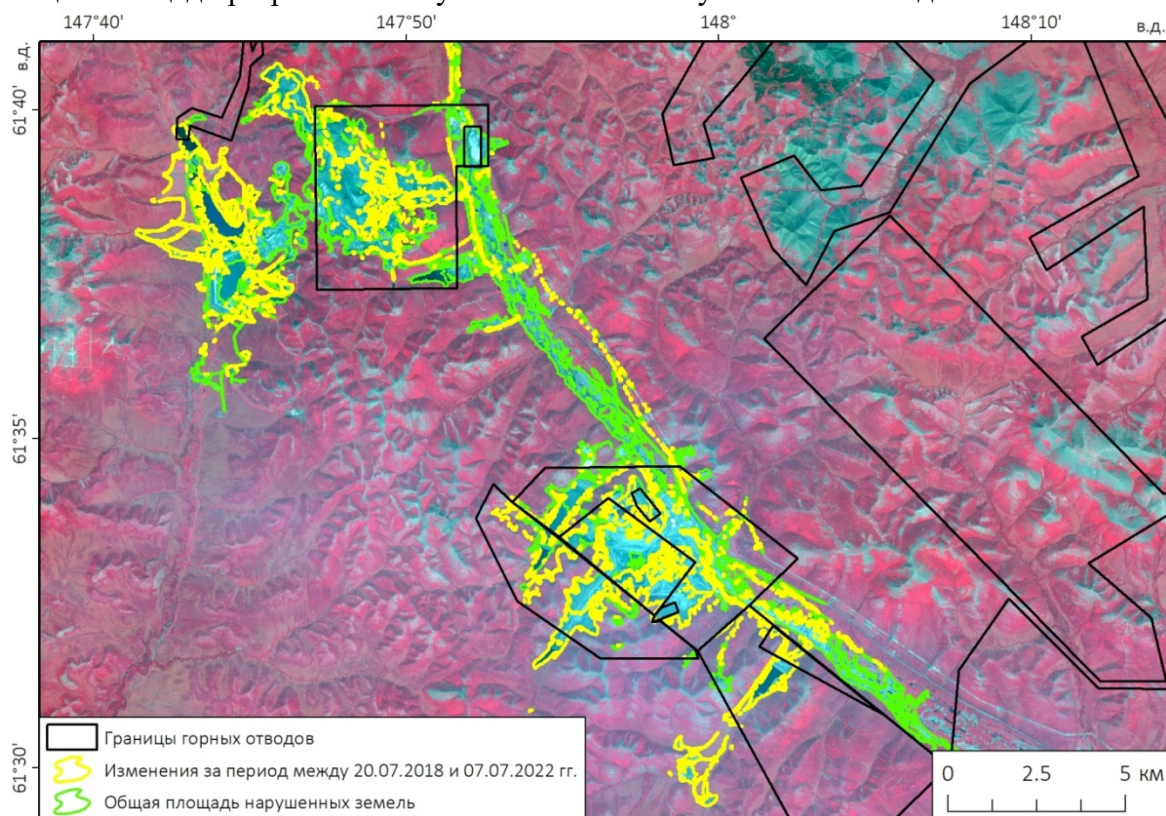


Рис. 1 Пример распознавания нарушенных земель в Тенькинском районе Магаданской области.

Восстановление растительности на участках разработок оценивалось только для бассейна р. Берелёх, где нарушенные земли занимают наибольшие площади. Для этого использовались три разновременных покрытия снимками Landsat полученными в 2000, 2009 и 2021 гг. На их основе был создан мультивременной композит из значений

вегетационного индекса NDVI и проведена его классификация методом CART (Classification and Regression Tree). Это позволило автоматически выделить участки восстанавливающейся растительности, где значения NDVI в 2009 и 2021 гг. оказались выше, чем в 2000 г. Более подробно методика и ее ограничения описаны в работе [7].

Оценка загрязнения поверхностных водотоков была выполнена с применением модуля C2RCC (The Case 2 Regional Coast Color Processor (C2RCC Processor, Brockmann et al., 2016), разработанного для программного пакета ESA SNAP. Данный модуль позволяет рассчитывать по спутниковым данным значение концентрации взвешенных веществ в воде (TSM), на основе оптических свойств водной поверхности. Расчеты выполнены по 27 сценам Sentinel-2, которые покрывают исследуемый участок от г. Сусуман до Колымского вдхр. Получены снимки за весь период действия съемочной системы Sentinel-2 (с 2016 по 2021 гг.). Более детально методика описана в работе [3].

Результаты и выводы

В целом по Магаданской области площадь участков золотодобычи по снимкам Landsat-7 ETM+, полученным в 2000–2002 гг., оценивается в 41 206 га. Согласно снимкам Sentinel-2, полученным в 2022 году, она увеличилась до 72 602 га. При сравнении снимков Sentinel-2, полученных в 2016–2018 и 2022 гг., выявлено 720 новых участков нарушения земель их общая площадь составляет 26 031 га (35,8% от общей площади воздействия в 2022 г.).

Расчитано отношение площади нарушенных земель к общей площади речных бассейнов за 2000–2002 гг. (по данным Landsat), так за 2022 г. (по данным Sentinel-2), а также для новых нарушенных участков, выделенных по снимкам Sentinel-2 в период с 2016–2018 по 2022 гг. Расчет выполнен для 319 водосборов в пределах Магаданской области. Наиболее интенсивному воздействию подверглись речные бассейны в западной части области. Так, добыча золота по реке Берелех и ее притокам началась более 80 лет назад и продолжается в настоящее время. Согласно снимкам Sentinel-2 за 2022 г., полностью нарушенные земли занимают 1,69% общей площади бассейна р. Берелёх (~16,5 тыс. га) и 1,47% площади прилегающего бассейна р. Дебин (~8 тыс. га). Пространственное распределение нарушенных земель за 20 лет существенно не изменилось. Существенно увеличились площади горных работ в бассейнах рек Берелёха, Дебина и Теньки, где разрабатываются многочисленные месторождения золота. Наблюдаемый рост площади нарушенных земель объясняется значительным увеличением объема добычи золота в Магаданской области за последние 10 лет.

Общая площадь восстановления растительности на исторических участках золотодобычи в бассейне реки Берелёх оценена по снимкам Landsat как 19,9 тыс. га, а новая площадь, затронутая добычей золота в период с 2000 по 2021 г., составляет 29,6 тыс. га. Это существенно выше, чем оценка по Sentinel-2 (16 500 га), поскольку из нее не исключались техногенные водоемы на нарушенных землях.

Наиболее существенное воздействие золотодобычи на наземные экосистемы связано с россыпной добычей в долинах рек. Оценена степень трансформации речных пойм в бассейнах рек Берелёх и Дебин, наиболее затронутых золотодобычей по сравнению с бассейнами других рек региона. Установлено, что площади нарушения земель в пределах 500-метровых буферных зон вдоль рек (с полностью удаленной растительностью) занимают 4,55% и 6,15% в бассейнах Берелёха и Дебина соответственно. Сами поймы рек Берелёх и Дебин нарушены гораздо сильнее (участки разработок занимают соответственно 16,0 и 11,2% от их площади). Также значительную площадь занимают техногенные водоемы. С учетом как существующих, так и исторических разработок, а также искусственных водоемов поймы рек Берелех и Дебин преобразованы более чем на 50%, а в некоторых их притоках до 90%. Столь

сильное воздействие на поймы приводит к значительному увеличению мутности воды, что особенно характерно для реки Берелех [3].

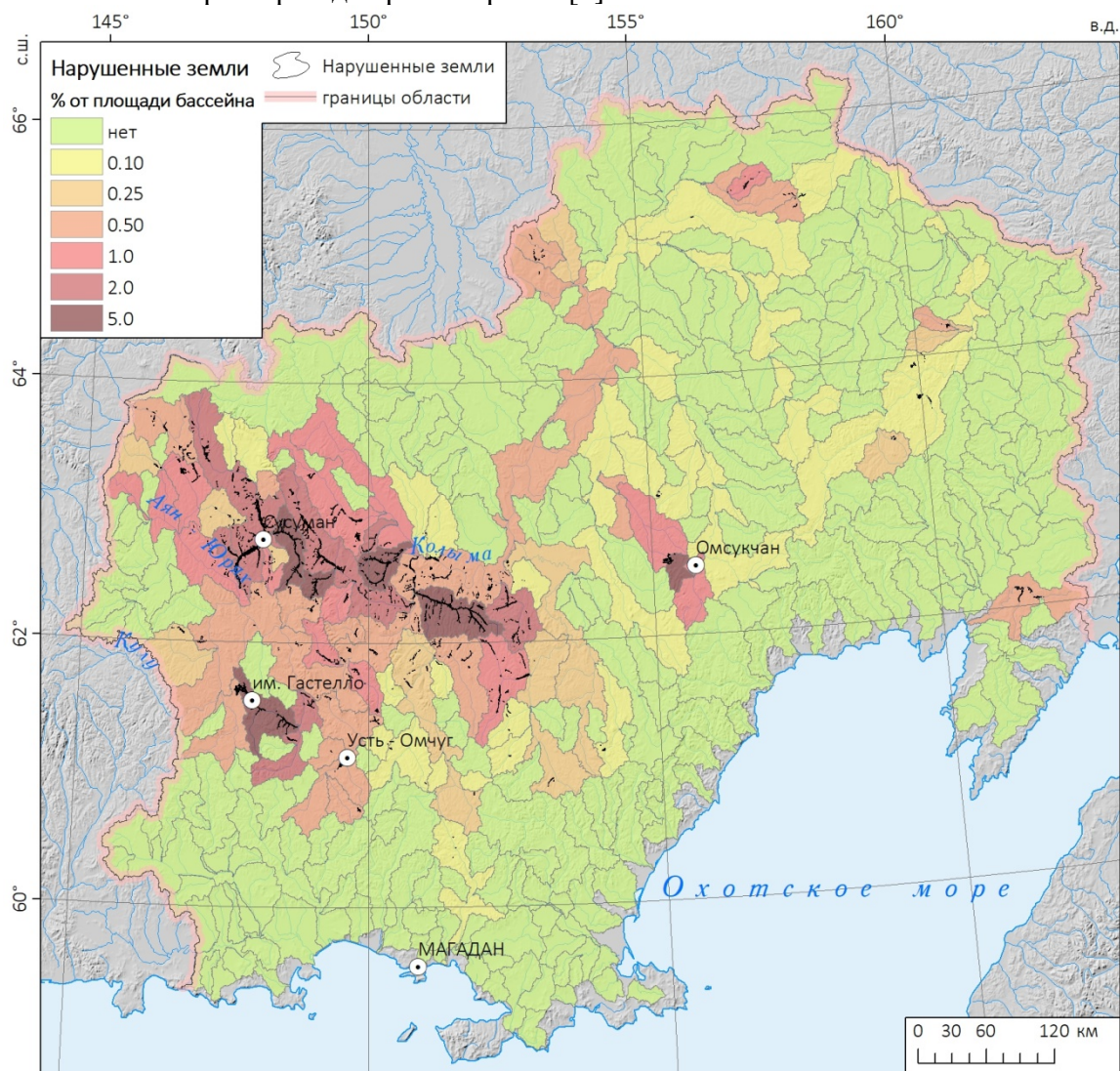


Рис. 2 Нарушенные земли при добыче золота в Магаданской области по спутниковым снимкам Sentinel-2 по бассейнам рек.

По снимкам Sentinel-2 за 2016-2021 гг. установлено, что основным источником загрязнения рек Сусуманского и Тенькинского районов в настоящее время являются разрабатываемые россыпные месторождения золота в пойме р. Берелёх. Крупнейший источник загрязнения находится в 10-15 км выше впадения р. Берелёх в р. Аян-Юрях. При слиянии этих рек отмечается значительное различие в мутности воды. Далее вода с высокой мутностью распространяется вниз по течению рек Аян-Юрях и Колыма вплоть до Колымского водохранилища, т.е. более чем на 200 км.

В 2021 г. было получено 5 безоблачных снимков на данную территорию за период с конца июня по сентябрь. Рассчитанное по этим снимкам значение TSM в воде р. Аян-Юрях ниже впадения загрязненной р. Берелёх в 2-10 раз превышало аналогичное значение, оцененное выше по течению от впадения этого притока. Максимальное значение TSM (115,4 г/м³) отмечалось 29 июня 2021 г. Однако ранее, в 2017-2019 гг., мутность воды р. Аян-Юрях выше и ниже по течению от устья р. Берелёх была сопоставимой. Это указывает на повышение значимости р. Берелёх как источника загрязнения именно в последние два года.

При слиянии р. Аян-Юрях и Кулу (дающих начало р. Колыма) также обнаруживается резкое повышение TSM (от 1,7 до 16 раз, в зависимости от даты съемки). Причем эта закономерность не менялась на протяжении шести лет (с 2016 по 2022 гг.). В пойме р. Кулу разработка россыпных месторождений не ведется, поэтому мутность воды может рассматриваться как фоновая.

Мутность загрязненных рек испытывает сильные внутригодовые и межгодовые колебания. Если межгодовая изменчивость может быть связана с увеличением площади разработок в пойме р. Берелёх, то внутригодовая изменчивость, вероятно, обусловлена режимом стока, т.е. мутность растет с увеличением расходов воды.

Дальнейшие исследования в данном направлении предполагают проведение полевой верификации полученных оценок TSM, а также выявление значимых источников загрязнения вод в других районах Магаданской области.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Проекта СПбГУ № 95413735.

Acknowledgments

The work was supported by Saint-Petersburg state university, Project ID 95413735.

Список литературы

1. Беликович А.В. Растительный покров Сусуманского района Магаданской области // Комаровские чтения. Владивосток: Дальнаука. 2001. Вып. 48. С. 125–154.
2. Добыча золота в Магаданской области. URL: <https://zolotodb.ru/article/11259> (дата обращения 01.09.2022).
3. Илюшина П.Г., Шихов А.Н., Макарьева О.М. Картографирование негативного воздействия золотодобывающих предприятий на природную среду криолитозоны по спутниковым данным (на примере Магаданской области) // Исследование Земли из Космоса. 2023. № 1. С. 41–52.
4. Egidarev E.G., Simonov E.A. Assessment of the Environmental Effect of Placer Gold Mining in the Amur River Basin // Water Resources 2015. 42. P. 897–908.
5. Jarsjö J., Chalov S.R., Pietroni J. et al. Patterns of soil contamination, erosion and river loading of metals in a gold mining region of northern Mongolia // Regional Environmental Change. 2017. 17. P. 1991–2005..
6. Schueler V., Kuemmerle T., Schröder H. Impacts of surface gold mining on land use systems in Western Ghana // Ambio. 2011. 40(5). P. 528–539.
7. Shikhov A., Pyushina P., Makarieva O., Zemlianskova A., Mozgina M. Satellite-Based Mapping of Gold-Mining-Related Land-Cover Changes in the Magadan Region, Northeast Russia // Remote Sensing. 2023. 15(14). Art. No. 3564.

Расчет снегонакопления в бассейне р. Камы на основе глобальных моделей численного прогноза погоды и реанализа

А.Н. Шихов, Е.В. Пищальникова, Н.А. Калинин

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь
shikhovan@gmail.com*

Аннотация. Выполнены расчеты снегонакопления в бассейне р. Камы за пять зимних сезонов (2019–2023 гг.) на основе выходных данных моделей численного прогноза погоды (ЧПП) ICON и GFS и наблюдений сети метеостанций. Валидация результатов расчета запаса воды в снеге перед началом таяния выполнена по данным снегомерных съемок на 35 маршрутах. Результаты также сопоставлены с расчетными снегозапасами согласно данным реанализа ERA5. Наибольшую точность расчета снегозапасов обеспечивает использование данных модели ЧПП ICON в качестве входной информации об осадках, тогда как по данным модели GFS имеется тенденция к завышению снегозапаса. Во всех случаях, за исключением 2019 г., минимальная величина среднеквадратичной ошибки составила менее 20%, что указывает на удовлетворительную точность расчета. Точность оценки снегозапасов по данным реанализа ERA5 оказалась ниже, чем при расчете с использованием данных модели ICON.

Ключевые слова: бассейн р. Камы, снежный покров, запас воды в снежном покрове, глобальные модели численного прогноза погоды, реанализ ERA5

Calculation of snow accumulation in the Kama river basin according to the data of global numerical weather prediction models and reanalysis

A.N. Shikhov, E.V. Pischalnikova, N.A. Kalinin

*Perm State University, Perm, Russia
shikhovan@gmail.com*

Abstract. In this study, we consider the results of calculations of the snow water equivalent (SWE) in the Kama river basin for five winter seasons (2019–2023) based on the outputs of the ICON and GFS numerical weather prediction (NWP) models and the data from weather stations. Validation of the results of SWE calculation before the start of snowmelt was carried out according to the data of snow surveys on 35 routes. The results are also compared with the estimated SWE from the ERA5 reanalysis. The most accurate calculation of SWE is provided by the use of ICON NWP model data as input information on precipitation, while the GFS model tend to overestimate snow accumulation. In all cases, except for 2019, the minimum value of the mean square error was less than 20%, which indicates a satisfactory accuracy of the calculation. The accuracy of SWE estimates based on ERA5 reanalysis is lower than using the ICON model data

Keywords: Kama river basin, snow cover, snow water equivalent, global numerical weather prediction models, ERA5 reanalysis.

Введение

Расчет максимального запаса воды в снеге (снегозапаса), накопленного к началу периода снеготаяния, является необходимым этапом среднесрочного и долгосрочного прогноза весеннего половодья. Традиционно снегонакопление в бассейнах рек оценивается на основе снегомерных съемок. Снегомерные съемки регулярно (каждые 5 или 10 сут) проводятся на сети метеостанций Росгидромета. Однако сеть снегомерных съемок отличается пространственной неравномерностью, в труднодоступной и горной местности измерения почти не проводятся. Частота проведения снегосъемок также недостаточна для ряда практических приложений [6-7].

В настоящее время для расчетов снегонакопления часто используются математические модели снежного покрова различной сложности. Они применяются в качестве блоков в распределенных моделях формирования речного стока ECOMAG [4], Гидрограф [1], или в моделях поверхности суши [2]. Схемы параметризации снежного покрова также необходимы для описания подстилающей поверхности в глобальных и региональных моделях численного прогноза погоды (ЧПП) [6-7]. Данные об осадках для моделирования могут быть получены как с сети метеостанций, так и по моделям ЧПП. Если в бассейнах равнинных рек снегонакопление весьма успешно воспроизводится на основе данных метеостанций [4, 8], то для горной местности предпочтительнее использовать прогнозы осадков по моделям ЧПП [3, 10-11]. Также применяются различные комбинированные подходы, к числу которых относится разработанная в Гидрометцентре РФ технология расчета снегонакопления SnoWE [7].

С 2018 г. выполняются расчеты снегонакопления на основе данных глобальных моделей ЧПП для бассейна р. Камы [5, 12]. В результате был накоплен архив результатов расчетов за пять лет, существенно различающихся по условиям снегонакопления и снеготаяния на водосборе. В настоящей работе оценивается точность расчетов запасов воды в снеге на основе прогнозов осадков по моделям ЧПП ICON (Германия) и GFS/NCEP (США) в северо-восточной части бассейна Камы на основе сопоставления с материалами снегомерных съемок на метеостанциях Пермского ЦГМС. Также выполнено сопоставление полученных оценок с данными реанализа ERA5-Land с пространственным разрешением 9 км [9].

Материалы и методы исследования

Общая схема методики расчета снегонакопления и снеготаяния показана на рис. 1, а ее описание приведено в работах [5, 12]. Расчет основан на комбинировании выходных данных моделей ЧПП ICON и GFS/NCEP с данными наблюдений на метеостанциях. Выходные данные моделей ЧПП загружаются в режиме реального времени с серверов национальных метеослужб. Для получения данных моделей и их конвертации в формат Geotiff разработаны скрипты на языке Python. Выходные данные моделей имеют пространственное разрешение от 13 до 25 км, однако расчет снегонакопления производится с более высоким пространственным разрешением – 3 км, так как при расчетах также проводится коррекция по цифровой модели рельефа (ЦМР). Оценка достоверности результатов расчета снегозапасов выполнена на основе их сравнения с материалами снегомерных съемок на 35 снегомерных маршрутах (17 лесных и 18 полевых), полученных в период перед началом снеготаяния.

Результаты и выводы

Результаты сопоставления расчетных и измеренных значений снегозапасов приведены в Табл. За 2023 г. данные снегосъемок на момент начала снеготаяния не получены, поэтому использовались последние доступные данные за 28.02.2023 г. Также за 2021 г. не были получены данные модели GFS, а за 2023 г – данные реанализа ERA5. Помимо результатов расчетов снегозапасов, полученных на основе разных источников

данных об осадках (модели ЧПП ICON, GFS и данные сети метеостанций), оценивались также результаты их осреднения (за исключением 2021 г., когда данные модели GFS не были получены). Пример результатов расчета приведен на рис. 2.



Рис. 1 Общая схема методика расчета запасов воды в снежном покрове.

Как следует из Табл., наибольшую точность расчета снегозапасов обеспечивает использование данных модели ЧПП ICON в качестве входной информации об осадках. Во всех случаях, за исключением 2019 г., минимальная величина среднеквадратичной ошибки составила менее 20%, что сопоставимо с ранее опубликованными результатами [3, 5, 11-12], и указывает на удовлетворительную точность расчета. Второй важный вывод состоит в том, что точность оценки снегозапасов по данным реанализа ERA5 оказалась ниже, чем точность расчета с использованием данных моделей ЧПП. Реанализ систематически завышает снегозапасы на 5–15%, такое же завышение отмечается и при расчете по модели GFS. При расчете по данным метеостанций есть тенденция к занижению снегозапаса. Осреднение результатов, полученных по трем источникам данных об осадках, не дает существенного повышения точности расчета снегозапаса.

Зависимость величины ошибок от накопленного снегозапаса не выявлена. В многоснежные зимы (2019–2020, 2021–2022 гг.) соотношение фактических и расчетных снегозапасов оказалось примерно таким же, как в относительно малоснежные зимы 2020–2021 и 2022–2023 гг. Влияние погодных условий периода снегонакопления на точность расчета снегозапасов требует дополнительного изучения. Также остались неопределенными причины сильного превышения расчетного снегозапаса над результатами его измерений, наблюдавшегося в 2019 г.

Табл. Сопоставление результатов расчета запаса воды в снеге на момент начала снеготаяния с данными маршрутных снегомерных съемок в 2019-2023 гг. Выделены минимальные значения среднеквадратичной ошибки RMSE

Дата снего-съемки	Средний запас воды в снеге по маршрутам, факт/расчет, мм						Среднеквадратичная ошибка (RMSE) результатов расчета, % от фактического снегозапаса				
	факт	ICON	GFS	метеостанции	среднее*	ERA5	ICON	GFS	метеостанции	среднее	ERA5
31.03.2019	141	158	181	158	166	201	38	55	45	44	50
29.02.2020	178	184	200	176	188	211	18	22	16	16	24
25.03.2021	155	168	-	145	-	165	22	-	16	-	21
31.03.2022	196	200	237	197	211	211	18	31	19	19	21
28.02.2023	136	134	147	128	137	-	19	25	21	19	-

*Среднее по данным моделей ЧПП ICON, GFS и сети метеостанций

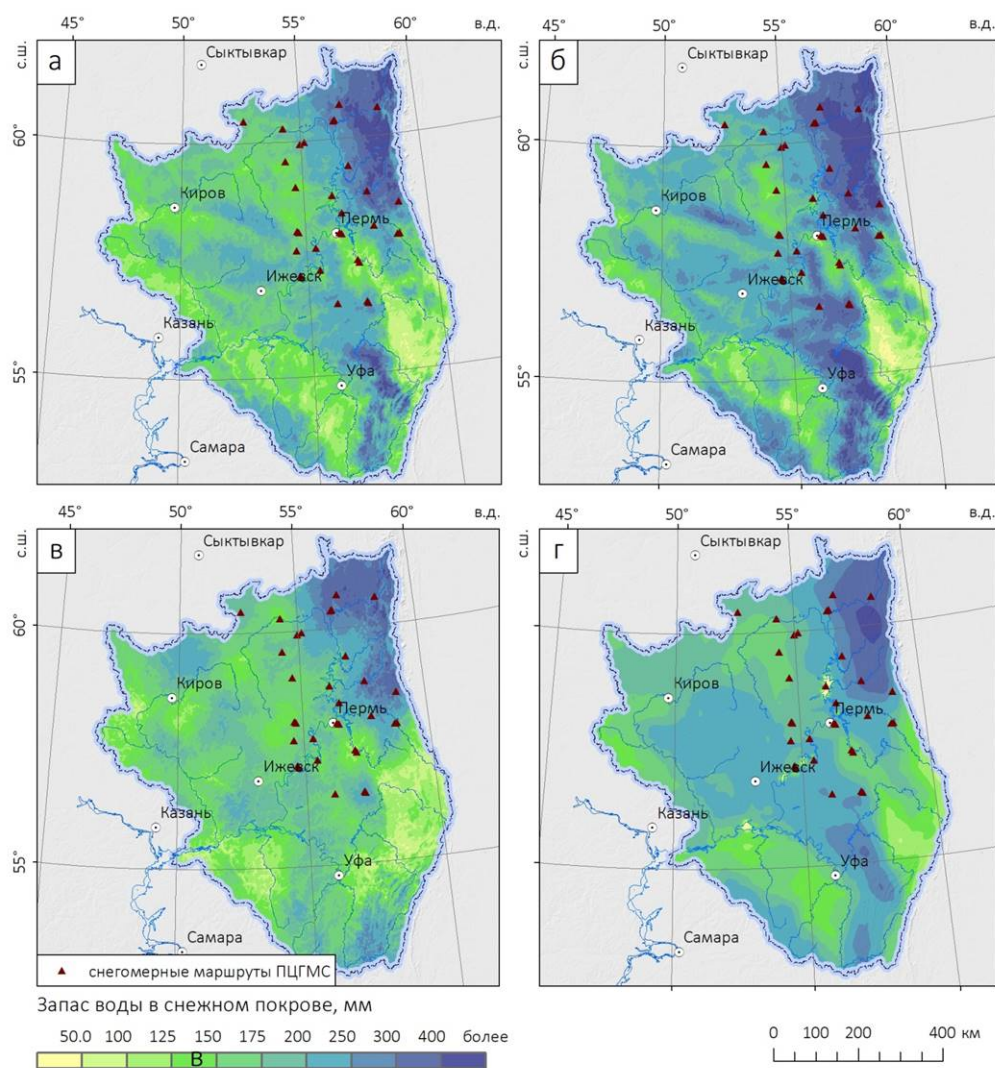


Рис. 2 Расчетный запас воды в снеге 31.03.2022 г. по данным модели ICON (а), по данным модели GFS (б), по данным метеостанций (в) и по данным реанализа ERA5 (г).

Список литературы

1. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. М.: Изд. центр «Академия», 2010. 304 с.
2. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 327 с.
3. Калинин Н.А., Свиязов Е.М. Шихов А.Н. Моделирование процессов снегонакопления и снеготаяния на водосборе Воткинского водохранилища с использованием модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология, 2015, №11, С. 57–68.
4. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: ИВП РАН, 2018. 296 с.
5. Пьянков С.В., Шихов А.Н., Михайлюкова П.Г. Моделирование снегонакопления и снеготаяния в бассейне р. Кама с применением данных глобальных моделей прогноза погоды // Лёд и Снег. 2019. №. 59(4) с. 494–508.
6. Турков Д.В., Сократов В.С. Расчёт характеристик снежного покрова равнинных территорий с использованием модели локального теплообмена SPONSOR и данных реанализа на примере Московской области // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. №3. С. 369–380. doi:10.15356/2076-6734-2016-3-369-380.
7. Чурюлин Е.В. Использование спутниковой и модельной информации о снежном покрове при расчетах характеристик весеннего половодья. дисс. канд. геогр. наук. 25.00.27. М., 2019. 175 с.
8. Kuchment L.S., Romanov P.Yu., Gelfan A.N. and Demidov V.N. Use of satellite-derived data for characterization of snow cover and simulation of snowmelt runoff through a distributed physically based model of runoff generation // Hydrology and Earth system science. 2010. Vol. 14(2). P. 339–350. doi: 10.5194/hess-14-339-2010.
9. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D. G., Piles M., Rodríguez-Fernández N. J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.-N. ERA5-land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications // Earth System Science Data, 2021. V. 13(9). P. 4349–4383. doi:10.5194/essd-13-4349-2021.
10. Quéno L., Vionnet V., Dombrowski-Etchevers I., Lafaysse M., Dumont M. & Karbou F. Snowpack modelling in the Pyrenees driven by kilometeric-resolution meteorological forecasts // The Cryosphere. 2016. Vol. 10. P. 1571–1589. doi: 10.5194/tc-10-1571-2016.
11. Pyankov S.V., Shikhov A.N., Kalinin N.A., Sviyazov E.M. A GIS-based modeling of snow accumulation and melt processes in the Votkinsk reservoir basin // Journal of Geographical Sciences, 2018. Vol. 28(2), P. 221–237. doi: 10.1007/s11442-018-1469-x.
12. Shikhov A.N., Churiulin E.V., Abdullin R.K. Assessment of the accuracy of snow water equivalent calculation with the use of global numerical weather prediction models and SnoWE snowpack model (by the example of the Kama River basin) // Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences. 2021. V. 66(1). Doi:10.21638/SPBU07.2021.110

Последствия потенциального прорывного паводка и селевого потока в долине р. Хозгуни (Памир) по результатам сценарного моделирования

В.А. Юдина^{1*}, С.С. Черноморец¹, В.М. Кидяева¹, К.С. Висхаджиева¹, И.В. Крыленко¹, Е.А. Савренюк¹, А.Г. Гуломайдаров², И.И. Зикиллобеков², У.Р. Пирмамадов², Ю.Х. Раимбеков²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

²Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан, г. Душанбе, Таджикистан
viktoriakurovskaia@gmail.com

Аннотация. Приведены результаты моделирования потенциального прорывного паводка и селевого потока в долине р. Хозгуни (Памир, Таджикистан) с помощью программного комплекса FLO-2D. Рассматривалось два возможных сценария: I – сход селевого потока гляциального генезиса (объем около 600 тыс. м³); II – одновременный прорыв верхнего и нижнего озер, расположенных в верховьях реки, (общий объем 184 тыс. м³) с последующим формированием селевого потока. Показано, что наибольшее затопление (в том числе зданий) наблюдалось при сценарии I, во втором сценарии инфраструктура оказалась не затронута. Однако использованная модель не позволяет учесть возможную боковую и донную эрозию, а также насыщение потока в селевом очаге. Чтобы провести более точное моделирование, принимая во внимание указанные процессы, необходимо применять комплекс математических моделей.

Ключевые слова: селевой поток, прорывной паводок, моделирование, Памир, FLO-2D.

Consequences of a potential GLOF and debris flow in Khozguni River valley (Pamir): simulation results

V.A. Iudina^{1*}, S.S. Chernomorets¹, V.M. Kidyayeva¹, K.S. Viskhadzhieva¹, I.V. Krylenko¹, E.A. Savernyuk¹, A.G. Gulomaydarov², I.I. Zikillobekov², U.R. Pirmamadov², Yu.Kh. Raimbekov²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in the Republic of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan
viktoriakurovskaia@gmail.com

Abstract. The results of simulation a potential GLOF and debris flow in the Khozguni River valley (Pamir, Tajikistan) are presented using the FLO-2D software. Two possible scenarios were considered: I – glacial debris flow (volume about 600 thousand m³); II – simultaneous outburst of the upper and lower lakes located in the upper reaches of the river (total volume 184 thousand m³) with the subsequent formation of a debris flow. It is shown that the biggest flooding zone (including buildings) was observed in scenario I, in the second scenario, the infrastructure was not affected. However, the model does not allow taking into account possible lateral and bottom erosion, as well as flow saturation in the debris flow origination site. To conduct more accurate simulation, considering these processes, it is necessary to apply a complex of mathematical models.

Keywords: debris flow, GLOF, simulation, Pamir, FLO-2D.

Введение

Современные климатические изменения приводят к тому, что в районах горного оледенения по всему миру происходит активизация опасных природных процессов. Особое место среди них занимают паводки и сели гляциального генезиса, а также формирующиеся в результате прорывов горных озер [4; 6; 8; 9].

Целью представленной статьи стала оценка последствий потенциального прорывного паводка и селевого потока, которые могут сойти по долине р. Хозгуни, на основе сценарного гидродинамического моделирования. Этот метод часто применяется в тех случаях, когда нужно оценить потенциальную опасность подобных опасных гидрологических явлений для инфраструктуры и местного населения для удаленных и труднодоступных районов, для которых полевые данные и ряды наблюдений сильно ограничены или практически отсутствуют.

Река Хозгуни протекает на территории Западного Памира. Ее устье находится в 33 км к югу от г. Хорога – административного центра Горно-Бадахшанской Автономной области (Таджикистан). Эта река впадает с левого борта в р. Гармчашма, которая в свою очередь являет правым притоком р. Пяндж.

В верховьях реки расположены два озера (Хозгуни Верхнее и Нижнее). Их плотины представляют собой скальные ригели, перекрытые сверху мореной. Абсолютная отметка оз. Хозгуни Нижнее составляет 4456 м, оз. Хозгуни верхнее – 4484 м.

В долине реки присутствует современное горное оледенение, которое находится на стадии деградации (об этом свидетельствует анализ разновременных космоснимков). На склонах и в днище долины р. Хозгуни накоплены рыхлые четвертичные отложения (моренные, склоновые, аллювиальные, в том числе селевые). Эти факторы, а также факты сходов катастрофических селевых потоков прорывного генезиса в рядом расположенных долинах [2] объясняют актуальность проведенного исследования.

Материалы и методы

Расчет осуществлялся в гидродинамической модели FLO-2D [5]. В основе данной модели лежат уравнения Сен-Венана, расчет ведется на регулярных прямоугольных расчетных сетках [3, 5]. Одной из важных особенностей модели является возможность расчета селевых потоков как низкой, так и высокой плотности. При моделировании движения селевого потока используется реологическая модель Бингама [5]. Для селя в модели были заданы следующие параметры: $\alpha_1 = 0,1$; $\beta_1 = 20$; $\alpha_2 = 0,005$; $\beta_2 = 20$ [7]. Концентрация наносов была принята равной 33–35%. Коэффициент шероховатости задавался в диапазоне 0,04–0,05 согласно типичным для данных русел значениям [1]. В качестве данных о рельефе использовались цифровая модель рельефа (ЦМР) ALOS PALSAR (разрешение – 12,5 м/пиксель) и ЦМР, полученная в результате съемки с беспилотного летательного аппарата (разрешение – 6,2 см/пиксель).

Результаты моделирования

Для долины р. Хозгуни было рассмотрено два сценария формирования селевых потоков. В первом моделировалось прохождение селевого потока гляциального генезиса объемом около 600 тыс. м³, объем водной составляющей – 400 тыс. м³ при объемной концентрации селя 0,35 (сценарий I). Во втором сценарии рассматривался одновременный прорыв верхнего и нижнего озер общим объемом 184 тыс. м³ с последующим формированием селевого потока с объемной концентрацией 0,35 (сценарий II). Прорыв только нижнего озера не рассматривался из-за его малого объема и низкой вероятности прорыва в связи со скальным основанием подпруживающей плотины. Максимальный расход воды и селя для сценария I составили 70 и 107,7 м³/с соответственно, а для сценария II – 30 и 53,9 м³/с. Входные гидрографы во всех

сценариях симметричные. В р. Пяндж поток рассматривался как водный, базовый расход задавался равным $200 \text{ м}^3/\text{с}$ для меженного периода. Фоновый меженный расход в р. Гармчашма задавался равным $10 \text{ м}^3/\text{с}$, из них $5 \text{ м}^3/\text{с}$ приходится на приток – р. Хозгуни.

Максимальный расход селевого потока от верховий на р. Хозгуни до п. Гармчашма дойдет за 40 мин и составит $107 \text{ м}^3/\text{с}$ (практически не уменьшится). Участок в районе поселка поток преодолеет за 25 мин, максимальный расход ниже поселка уменьшится до $87 \text{ м}^3/\text{с}$. Через еще 30 мин поток достигнет п. Андароб. В районе п. Хасхоруг на р. Пяндж поток окажется приблизительно через 1,5 ч. Водный паводок на р. Пяндж будет превышать фоновый расход воды на $60 \text{ м}^3/\text{с}$.

Максимальные глубины селевого потока при сценарии I в русле р. Хозгуни в сужениях достигнут 2 м, на небольших пойменных расширениях – 1 м. Скорость течения в русле р. Гармчашма составит 5–7 м/с. В п. Гармчашма в зоне затопления оказались несколько строений в районе главного моста, глубина затопления достигла 3 м, скорость течения – 6 м/с, мост, вероятно, будет разрушен. На конусе выноса у п. Андароб поток растечется по пойменным расширениям выше моста, но в целом по поселку пройдет по узкому и глубокому руслу без затопления прилегающей территории. Особое внимание следует обратить на мост, расположенный в центре поселка. Если селевой поток соберет поваленные деревья выше по течению и заблокирует проем под мостом, то будут затоплены окружающие строения (Рис. 1), однако и в этом случае поток по поселку не пойдет. Максимальная глубина выше моста достигнет 7 м, скорость течения – 8 м/с.

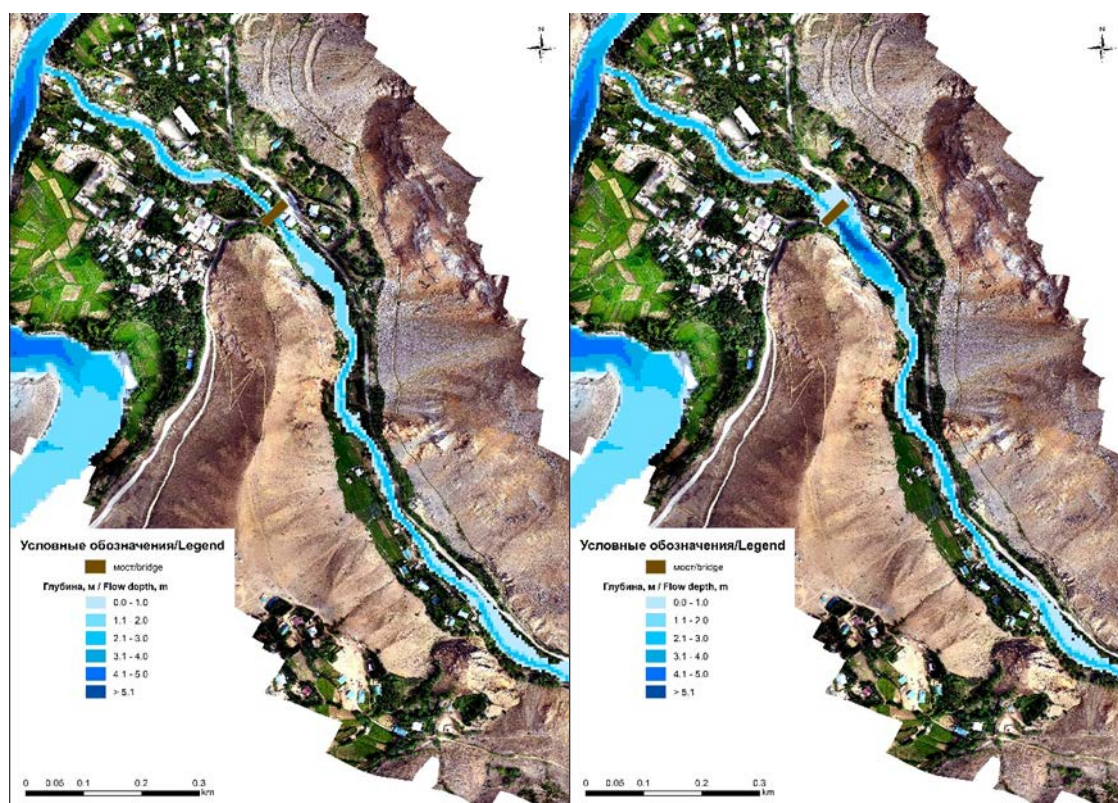


Рис. 1 Глубины зоны затопления по результатам моделирования на основе программного комплекса FLO-2D при селевом потоке по долине р. Гармчашма в районе п. Андароб, сценарий I, слева – без учета моста, справа – при занесении пролета моста селевым материалом.

При прохождении относительно небольшого селя по сценарию II по долине р. Хозгуни гидрограф трансформируется в двухпиковый за счет задержки части потока в пойменных расширениях. Первый пик селевого потока подойдет к п. Гармчашма через

1,5 ч после максимального пика при прорыве озер, второй пик – через 2,7 ч. Максимальный расход селя составит 40–52 м³/с. Ниже поселка максимальный расход снизится до 35–43 м³/с. Водный паводок на р. Пяндж составит около 20 м³/с (Рис. 2).

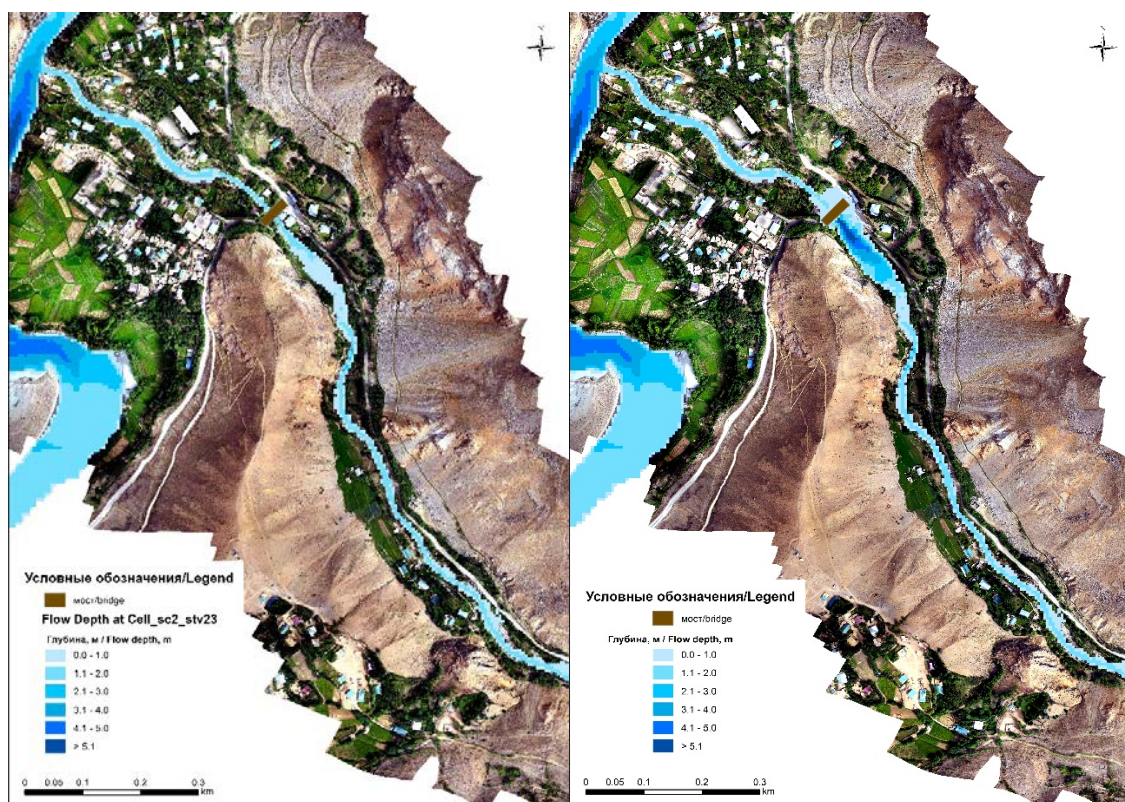


Рис. 2 Глубины зоны затопления по результатам моделирования на основе программного комплекса FLO-2D при селевом потоке по долине р. Гармчашма в районе п. Андароб, сценарий II, слева – без учета моста, справа – при занесении пролета моста селевым материалом.

Максимальные глубины селевого потока при сценарии II в русле р. Хозгуни в сужениях достигают 3 м. Скорость течения в русле р. Гармчашма достигает 3–5 м/с. Существенных затоплений в районе п. Гармчашма нет. На конусе выноса, у п. Андароб, поток не растекается, однако в случае заполнения пролета моста глубина потока выше по течению увеличится до 6 м

Выводы

В работе рассмотрены последствия прохождения прорывного паводка и селевого потока в долине р. Хозгуни, расположенной на территории Западного Памира. Сценарий I предполагает формирование гипотетического селевого потока объемом 600 тыс. м³ в долине р. Хозгуни, сценарий II – одновременный прорыв озер в верховьях р. Хозгуни максимальным объемом 184 тыс. м³. Наибольшее затопление п. Гармчашма наблюдалось при сценарии I, поток достиг поселка через 40 мин, оказались затоплены несколько зданий в районе центрального моста. При моделировании по сценарию II пик потока достиг п. Гармчашма через 1,5 ч, затопления зданий не было. Прохождение обоих потоков по п. Андароб в целом безопасно, если не учитывать возможную боковую и донную эрозию. Однако в модели FLO-2D не рассматривается влияние этих видов эрозии, а также насыщение потока в селевом очаге. Для учета данных процессов следует применять комплекс математических моделей.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам Филиала Агентства Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан Р.А. Бобову, Т.З. Сабзалиеву, Н.С. Абдуласанову, А. Акимбекову, М. Гуломносирову, М. Мародмамадову, Ф. Фидолиеву за помощь в организации полевых работ.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова, раздел 1.7 (ЦИТИС 121051300175-4).

Acknowledgments

The authors thank the staff of the Aga Khan Agency for Habitat Branch in the Republic of Tajikistan R.A. Bobov, T.Z. Sabzaliev, N.S. Abdulasanov, A. Akimbekov, M. Gulomnosirov, M. Marodmamadov, F. Fidoliev for help in organizing field work.

The work has been carried out within the framework of state assignment of the Lomonosov Moscow State University, section 1.7 (CITIS 121051300175-4).

Список литературы

1. Барышников Н.Б. Динамика русловых потоков. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2007. 313 с
2. Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х. и др. Каменные глетчеры – очаги формирования катастрофических селей. ГеоРиск. 2020. Т. XIV, № 2. С. 52–65. <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2020-14-2-52-65>.
3. Кюнж Ж., Холли Ф., Вервей Ф. Численные методы в задачах речной гидравлики / пер. с англ. Ю.В. Абрамова, Е.И. Масса. М.: Энергоатомиздат, 1985. 255 с.
4. Ahmed R., Wani G.F., Ahmad S.T., et al. A review of glacial lake expansion and associated glacial lake outburst floods in the Himalayan region // *Earth Systems and Environment*. 2021. Vol. 5, No. 3. P. 695–708. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00230-9>.
5. O'Brien J.S., Julien P.Y., Fullerton W.T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation // *J. Hydraulic Eng.* 1993. Vol. CXIX, No. 2. P. 244–261.
6. Petrakov D.A., Krylenko I.V., Chernomorets S.S., et al. Debris flow hazard of glacial lakes in the Central Caucasus // 4th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment (DFHM-4), Chengdu, China, 10–13 September 2007. P. 703–714.
7. Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Aleinikov A.A., et al. Monitoring of Bashkara Glacier lakes (Central Caucasus, Russia) and modelling of their potential outburst // *Natural Hazards*. 2012. Vol. LXI, No. 3. P. 1293–1316. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9983-5>.
8. Veettil B.K., Kamp U. Glacial lakes in the Andes under a changing climate: a review // *Journal of Earth Science*. 2021. Vol. 32. P. 1575–1593. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1118-z>.
9. Zaginaev V., Petrakov D., Erokhin S., et al. Geomorphic control on regional glacier lake outburst flood and debris flow activity over northern Tien Shan // *Global and Planetary Change*. 2019. Vol. 176. P. 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.03.003>.

Моделирование прорыва озера Бирджал-Чиран-2006–5 в 2006 году на северо-восточном склоне г. Эльбрус

В.А. Юдина*, В.М. Кидяева, С.С. Черноморец, И.В. Крыленко

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, г. Москва
viktoriakurovskaia@gmail.com*

Аннотация. Проведено моделирование прорыва высокогорного ледникового озера, подпруженного ледяной плотиной. Для оценки расхода прорывного паводка использовалась модель прорыва ледникового озера, реализованная в программе FLOVI. Моделирование прорывного паводка в зоне транзита и аккумуляции осуществлялось с помощью двумерной модели FLO-2D. Для моделирования использовались уникальные данные полевого обследования озера до и после прорыва, космические снимки и цифровые модели рельефа. Показано, что результаты моделирования сопоставимы с натурными данными по объемам, времени добегания и площади затопления, что доказывает, что использованная методика подходит для оценки последствий прорывов ледниковых озер в горных регионах.

Ключевые слова: прорыв ледникового озера, моделирование гидрографа прорыва, двумерное математическое моделирование потока.

Modeling of Lake Birjal-Chiran-2006–5 outburst in 2006 on the northeastern slope of Elbrus

V.A. Iudina*, V.M. Kidyaeva, S.S. Chernomorets, I.V. Krylenko
*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia
viktoriakurovskaia@gmail.com*

Abstract. The glacial lake outburst flood was simulated. The outburst flood discharge was estimated using the lake outburst model implemented in the FLOVI program. Outburst flood modeling in the transit and accumulation zone was carried out using the two-dimensional FLO-2D model. For modeling, unique data from a field survey of the lake before and after the outburst, satellite images, and digital elevation models were used. It is shown that the simulation results are comparable with field data in terms of volumes, lag time and flooded area, which proves that the method used is suitable for assessing the consequences of outbursts of glacial lakes in high mountains.

Keywords: GLOF, outburst hydrograph modelling, two-dimensional mathematical flow modelling.

Введение

Прорывы ледниковых озер происходят по двум основным сценариям [6; 7; 9]: перелив через плотину с ее возможным последующим разрушением и опорожнением котловины по внутриледниковым каналам стока в случае наличия в плотине ледяного ядра или льда [1; 6; 7; 9].

Модель прорыва озера по подледниковым каналам стока с использованием схемы «короткой трубы» описана в работах [1]. В случае опорожнения ледникового озера могут наблюдаться прорывные паводки и селевые потоки, приводящие к значительным разрушениям в нижележащих долинах и человеческим жертвам.

В данной работе приведена попытка моделирования прорывного паводка от ледникового озера на северо-восточном склоне Эльбруса, который произошел в 2006 году

[3]. Для оценки расхода прорывного паводка использовалась модель прорыва озера [1], реализованная в программе FLOVI [5]. Моделирование прорывного паводка в зоне транзита и аккумуляции осуществлялось с помощью двумерной модели FLO-2D [8].

Объект исследования

Система ледниковых озёр на северном склоне г. Эльбрус активно развивается, многие озера подвержены динамичным изменениям котловины, уровенного режима и других гидрологических характеристик. Прорывы ледниковых озёр на северном склоне г. Эльбрус наблюдались в 1909 г. и 1993 г.

11 августа 2006 г. произошел прорыв крупного озера, повлекший образование селя по р. Бирджалы-Су [3]. Объем воды в озере достигал 550 тыс. м³ при максимальной глубине 17 м. Озеро было подпружено ледником Чунгурчат-Чиран высота ледяной дамбы составляла от 0,8 до 20 м [3]. Прорывной паводок, трансформировавшийся в сель, разрушил павильоны курорта Джилы-Су, расположенные в русле в 10 км ниже озера (Рис. 1).

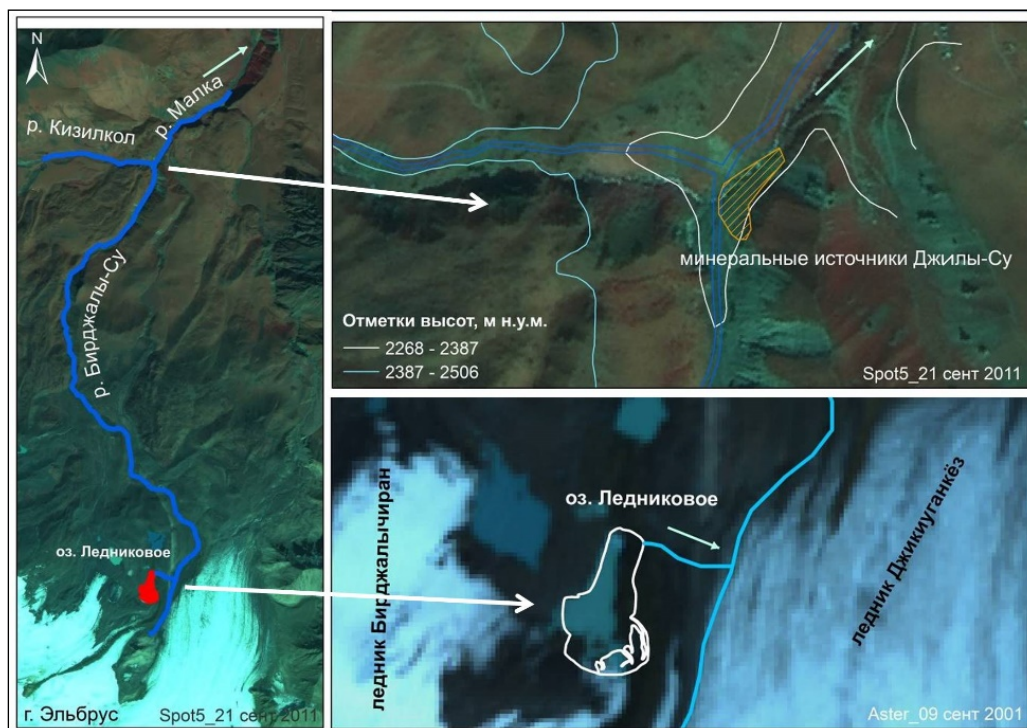


Рис. 1 Схема долины р. Бирджалы-Су.

Детальные полевые исследования результата схода гляциального селя позволили поставить задачу по математическому моделированию прорыва озера и получения параметров потока, прошедшего по долине р. Бирджалы-Су.

Объем воды, вытекшей из озера в результате прорыва, составил около 400 тыс. м³. Продолжительность паводка составила около 20 ч. Прорывной паводок прошел по поверхности ледника Чунгурчат-Чиран и через 2-4 км вышел в русло р. Бирджалы-Су, где трансформировался в водокаменный сель. По оценкам, полученным на основе полевых данных, расход водокаменного селя составил не более 150 м³/с, что связано с длительным опорожнением озера [3]. Объем обломочного материала составил 300–350 тыс. м³, в том числе в зоне курорта отложилось 50 тыс. м³ [3]. По другим оценкам, максимальный расход потока составил 125 м³/с [2].

Наносоводный паводок продвигался ниже долины источников Джилы-Су, постепенно расплываясь по долине р. Малка. На гидрологическом посту с. Каменноостское максимальный расход воды 11 августа 2006 г. составил 42,6 м³/с (при расходе в предыдущий день 30,7 м³/с).

Методы

В работе для оценки максимального расхода прорывного паводка использовалась модель прорыва озера, предложенная Ю.Б. Виноградовым [1]. Входными данными для моделирования стали: объем озера перед прорывом, начальная температура воды в озере, длина канала, превышение точки входа над выходом, батиметрическая съемка на основании которой определяются морфометрические параметры чаши озера. На выходе из модели были получены гидрографы прорывного паводка.

Для моделирования селевого потока в долине применялась гидродинамическая модель FLO-2D [8]. В основе модели лежат уравнения Сен-Венана, расчет ведется на регулярных прямоугольных расчетных сетках. Исходными данными для моделирования были: цифровая модель рельефа и гидрограф. С учетом водной составляющей потока, объемная концентрация наносоводного селя составила 0,37. В расчетах был использован средний коэффициент шероховатости $n=0,07$. Средняя плотность потока принята равной 1500 кг/м^3 . На выходе была получена площадь и глубина затопления, а также скорость течения.

Результаты

Максимальный расход воды прорывного паводка при начальной температуре воды, равной $0 \text{ }^\circ\text{C}$ составил $142 \text{ м}^3/\text{с}$, время добегающего максимального расхода – 8.6 часа от начала прорыва, (Рис. 2), что соответствует результатам полевого обследования. При этом прорывной гидрограф имеет ассиметричную форму и характеризуется пологим подъемом и резким спадом. Такая форма характерна для прорывов ледниковых озер [1; 6].

Ранее в работе [4] было продемонстрировано, что одним из самых чувствительных параметров модели прорыва озера является начальная температура воды в озере. При увеличении в расчетах исходной температуры воды в озере на $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$, максимальный расход в среднем возрастал на 8 %. Разница во времени добегающего максимума при этом сокращается с 4 ч до 0,5 ч. Таким образом, разница в начальной температуре воды в озере является одним из механизмов, который приводит к образованию внутрiledникового канала стока, по которому осуществляется сброс воды.

Время добегающего максимального расхода, равного $142 \text{ м}^3/\text{с}$, до поляны Джилы-Су составило 3-4 ч. При этом трансформации гидрографа практически не произошло. На расширенных участках долины максимальные глубины достигали 2 м, а максимальные скорости – 3 м/с. В сужениях долины скорости течения увеличивались до 4 м/с и более в долине р. Бирджалы-Су. Ширина селевого потока в 100 м выше источников Джилы-Су составляла около 30 м, в районе источников выше слияния с р. Кызылкол около 15 м, в месте слияния – около 90 м. Ниже источников Джилы-Су поток из селевого трансформировался в водный, большая часть наносов отложилась на месте слияния двух рек. В истоке р. Малка ширина водного потока была не более 15 м из-за сильного сужения русла. Согласно расчетам, максимальная глубина затопления минеральных источников поляны Джилы-Су составила 3 м. В районе источников поток имел максимальную транспортирующую способность и разрушительную силу.

Моделирование прорыва озера, подпруженного ледяной плотиной, с использованием комплекса моделей: модели Виноградова и двумерной модели FLO-2D позволили воспроизвести параметры селевого потока, который возник в долине р. Бирджалы-Су в августе 2006 г. Результаты моделирования прорывного паводка соотносились с натурными данными об изменении объема озера, его гидрологических характеристиках и сведений о продолжительности селя [2; 3].

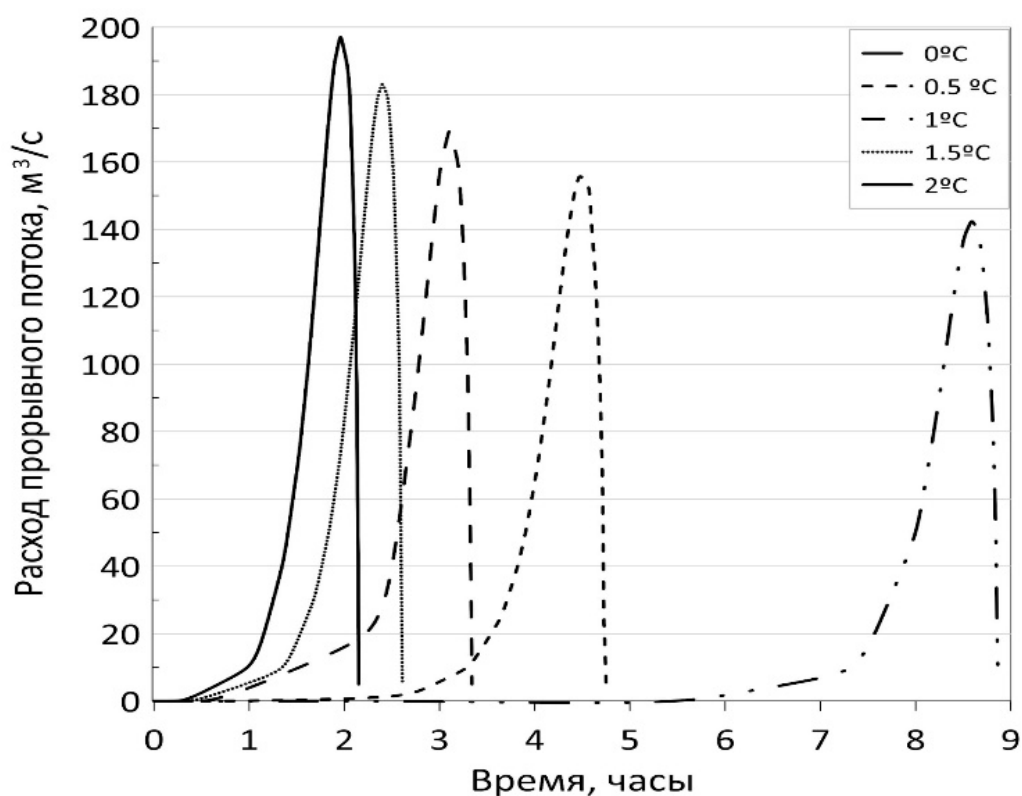


Рис. 2 Гидрографы прорывного паводка, полученные в программе FLOVI, с изменением начальной температуры воды в озере от 0 до 2 °С.

Список литературы

1. Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Л., Гидрометеиздат, 1977, 154 с.
2. Запороженко Э.В. Селевые потоки по рр. Кара-Кая-Су и Бирджалы-Су в Кабардино-Балкарии: сравнительный анализ прошлой и новейшей истории // Вестник Владикавказского научного центра. Часть 1, т. 8, № 1, 2008. С. 33-43. Продолжение: т. 8, №2, 2008. С. 27-33.
3. Черноморец С.С., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Сейнова И.Б., Крыленко И.В. Прорыв ледникового озера на северо-восточном склоне Эльбруса 11 августа 2006 г.: прогноз, событие и последствия. // Материалы гляциологических исследований. 2007. Вып. 102. С. 211-215.
4. Юдина (Куровская) В. А. Оценка характеристик гляциального селевого потока с использованием цепочки математических моделей // Географический вестник. — 2022. — Т. 4, № 63. — С. 67–79.
5. Юдина В.А., Юдин Н.Е., Виноградова Т.А. Программа для расчета прорывного паводка и селевого потока FLOVI, номер 2022683748, 2002.
6. Harrison S., Kargel J.S., Huggel C. et al. Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods. // *The Cryosphere*, 12, 1195–1209.
7. Kornilova E.D., Krylenko I.N., Rets E.P., Motovilov Y.G., Bogachenko E.M., Krylenko I.V., Petrakov D.A. Modeling of extreme hydrological events in the Baksan River basin, the Central Caucasus, Russia. *Hydrology* 2021, 8, 24.
8. O'Brien J., Julien P., Fullerton W. Two-dimensional water flood, mudflow simulation // *J. Hydraulic Engineering* // ASCE. 1993. V. 119. № 2. P. 244–259.
9. Rushmer E.L., Russell A.J., Tweed F.S., Knudsen O., Marren P.M. The role of hydrograph shape in controlling glacier outburst flood (jökulhlaup) sedimentation/ *The Structure, Function and Management Implications of Fluvial Sedimentary Systems (Proceedings of an international symposium held at Alice Springs, Australia. September 2002).* IAHS Publ. no. 276, 2002.

Оценка возможности прогнозирования характеристик заторов льда на основе методов машинного обучения (на примере реки Сухоны)

Цуй Юйсюань*, Н.Л. Фролова, Н.К. Семенова

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва
1606398766@qq.com*

Аннотация. В Великом Устюге каждые 3-4 года наблюдается затор льда. В тяжелых случаях он может вызвать наводнение и затопить города, что приведет к огромным экономическим потерям и человеческим жертвам. Целью данной работы является разработка методики прогноза возникновения ледового затора на р. Сухона при слиянии ее с р. Юг на основе методов машинного обучения и статистического моделирования. Данная работа начинается с анализа влияющих факторов на основе процесса образования ледяного затора и его определения. Затем был использован метод машинного обучения. Были использованы дихотомическая классификация и мультиклассовая классификация. Прогнозы были сделаны с использованием кросс-валидации $K=4$ для последних лет и LOO для всего набора данных, соответственно. Наилучшие результаты показал алгоритм KNN. Метод случайного леса (Random Forest) также показал хорошие результаты.

Ключевые слова: затор льда, метод машинного обучения, бинарная классификация, мультиклассовая классификация.

Possibility of ice-jams parameters prediction using machine learning methods (case study of the Sukhona river)

Cui Yuxuan*, N.L. Frolova, N.K. Semenova

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
1606398766@qq.com*

Abstract. Veliky Ustyug experiences ice jam every 3-4 years. In severe cases it can cause flooding and inundate cities, resulting in huge economic losses and human casualties. The purpose of this paper is to develop a methodology for forecasting the occurrence of ice jam on the Sukhona River at its confluence with the Yug River based on machine learning and statistical modeling methods. This work begins with the analysis of influencing factors based on the process of ice jam formation and its definition. Then machine learning method was used. Dichotomous classification and multiclass classification were used. Predictions were made using $K=4$ cross-validation for recent years and LOO for the whole dataset, respectively. The KNN algorithm showed the best results. Random Forest method (Random Forest) also showed good results.

Keywords: ice jam, machine learning method, binary classification, multiclass classification.

Введение

Для рек севера Европейской части России, как и для многих других районов мира, во время весеннего половодья часто образуются заторы льда, являясь весьма опасным природным явлением. Из-за большого числа факторов, влияющих на формирование заторов льда, часто при экстремальных погодных условиях, прогнозирование заторов льда затруднено. В России основные результаты этих работ изложены в монографии В.А. Бузина [1]. Один из крупнейших специалистов в этой области S.Beltaos [2] разработал модель

разрушения и движения ледяного покрова при вскрытии рек. В Китае прогнозирование заторов в последние годы основывается на методах машинного обучения. S. Chen и H. Ji [3] предсказали дату вскрытия участка Нин-Мэн на Хуанхэ на основе модели нейронной сети. T. Wang и др. [4] создали экспертную систему для прогнозирования ледовых явлений на Хуанхэ на основе геоинформационных систем и нейросетевой модели прогнозирования, которая может эффективно прогнозировать дату вскрытия участка р. Нин-Мэн с точностью около 10 дней. X. Guo и др. [5] использовали алгоритм Levenberg-Marquardt для улучшения модели нейронной сети для прогнозирования ледовых явлений в верховьях р. Хэйлунцзян (Китай).

Материалы и методы исследования

Исследуемый участок реки расположен в низовьях р. Сухона, к северу от д. Каликино и к югу от г. Котлас, он один из наиболее проблемных с точки зрения заторных наводнений в этом бассейне. Наводнения впервые были описаны здесь в 1517 г., а в XIX в. катастрофы случались 6 раз. Известно, что за период наблюдений г. Великий Устюг сталкивался с наводнениями 22 раза [1].

Большинство наводнений в районе Великого Устюга связано с формированием заторов льда в период прохождения весеннего половодья. Все факторы, определяющие их формирование, условно разделим на две группы – тепловые и механические [1]. Они будут отражать как толщину и прочность ледяных образований, так и энергию и мощность водного потока, взламывающего лед на реке.

Кроме того, при изучении заторов льда важно иметь в виду, что гидрометеорологические условия во все фазы ледового режима взаимосвязаны, поэтому нас будут интересовать как осенние условия замерзания реки, так и зимние условия ледостава, и весенние условия вскрытия (Табл.).

Табл. Гидрометеорологические факторы заторообразования [1].

Условия замерзания	Условия ледостава	Условия вскрытия
Гидрологические условия		
Предледоставный уровень воды Продолжительность шугохода Наличие зажоров	Прочность и толщина льда Образование донного льда и шуги	Интенсивность роста расходов и уровней воды
Метеорологические условия		
Особенности температурного режима в период замерзания (наличие потеплений и похолоданий)	Сумма отрицательных температур воздуха Особенности температурного режима в период ледостава (наличие потеплений) Сумма осадков за холодный период	Дружность весны Характер температурного режима в период вскрытия (наличие похолоданий) Сумма осадков в период вскрытия

В качестве исходных данных был выбран ряд наблюдений за 61 год (1960-2020 гг.) по 6 гидрологическим постам (г. Великий Устюг, г. Котлас, г. Тотьма, д. Каликино, д. Березовая Слободка, пос. Подосиновец) и 3 метеостанциям (с. Нюксеница, г. Никольск и г. Великий Устюг). Данная информация взята из архива кафедры гидрологии суши и дополнена данными за последние годы, предоставленными Вологодским ЦГМС. Из исходных данных были выбраны гидрологические показатели для каждого поста и метеорологические для каждой станции. Наиболее детально проанализированы особенности предледоставного уровня воды, продолжительности

осеннего ледохода, максимальной толщины льда, расхода воды во время весеннего половодья (Рис.).



Рис. Изменение максимальных уровней воды р. Сухоны (в/п Великий Устюг) и их заторной составляющей (а), уровней воды в период установления ледостава (б), максимальной толщины льда (в), продолжительности замерзания (г) и шугохода (д).

Из анализа данной информации следует, что для периода замерзания характерна общая тенденция снижения уровней воды, при этом в последние годы ледостав устанавливается позже, а максимальная толщина льда постепенно уменьшается.

В данной работе для оценки заторов льда на реке Сухона был использован подход машинного обучения. Были использованы дихотомическая классификация (был затор льда или не был затор льда) и мультиклассовая классификация (не был затор льда, 500-700 см и >700 см в соответствии с максимальным уровнем воды в г. Великом Устюге в периоде затора). Прогнозы были сделаны с использованием кросс-валидации $K=4$ для последних лет и LOO для всего набора данных, соответственно.

Результаты и выводы

Для бинарной классификации в случае 4-х кратной кросс-валидации лучшим классификатором оказался KNN с Accuracy-71%, 100% recall и 65% precision. Ансамблевые алгоритмы Random Forest и Adaboost также дали хорошие результаты. Для метода LOO лучшим классификатором оказался ансамблевый алгоритм Adaboost с Accuracy 75%, 83% recall и 77% precision. Метод случайного леса (Random Forest) также показал хорошие результаты. Видно, что ансамблевые алгоритмы превосходят отдельно взятые алгоритмы.

Для мультиклассовой классификации использовались две отдельные стратегии, OvO и OvR. Почти все классификаторы не дали хороших результатов, кроме алгоритма KNN.

Одной из причин этого можно считать небольшое количество наблюдений, при которых ледовый затор вызывал подъем уровня воды свыше 700 см.

Благодарности

Авторы выражают благодарность научному руководителю Профессор, д.г.н. Фролова Наталья Леонидовна за общий анализ работы и консультанту Семенова Наталья Кирилловна за изменения в коде и рекомендации. Рецензентам Василенко Александр Николаевич также выражается благодарность за предложения по работе.

Acknowledgments

The authors thank their supervisor Professor, Dr. Natalia Leonidovna Frolova for general analysis of the work and consultant Natalia Kirillovna Semenova for changes in the code and recommendations. Reviewers Vasilenko Alexander Nikolayevich is also thanked for suggestions on the work.

Список литературы

1. Бузин В.А. Зажоры и заторы льда на реках России. Санкт-Петербург, ООО «Эс Пэ Ха», 2015. 240 с.
2. Beltaos S. A conceptual model of river ice breakup // Canadian Journal of Civil Engineering. 1984. Pp.516-529. DOI:10.1139/I84-071.
3. Chen S., Ji H. Fuzzy optimization neural network BP approach for ice forecasting // Journal of Hydraulic Engineering. 2004. 6. doi:10.13243/j.cnki.slxb.004.06.20 (на кит. языке).
4. Wang T., Yang K.-L., Yongxin Guo, Huo S.-Q. Application of artificial neural networks to forecasting of river ice condition // Journal of Hydraulic Engineering. 2005. 36(10). Pp. 1204-1208.
5. Guo X., Wang T., Fu H., Guo Y., Li J. Ice-Jam Forecasting during River Breakup Based on Neural Network Theory // Journal of Cold Regions Engineering, 2018. 32(3), 04018010. doi:10.1061/(asce)cr.1943-5495.0000168.

Динамика стока реки Охта в районе г. Мурино

А.А. Ярмалоян*, Е.С. Урусова

*Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург
armanyarmaloyan@yandex.ru*

Аннотация. Целью исследования является оценка динамики среднегодового, минимального и максимального стока реки Охта в г. Мурино за период 1970 – 2020 гг. Рассчитаны числовые характеристики стока реки Охта и проведена проверка на однородность двух периодов с 1970 – 1994 и с 2005 – 2020. В результате исследования было выявлено, что значения расходов воды за исследуемый период не претерпели существенных изменений.

Ключевые слова: река Охта, сток реки, речной сток, расход воды.

Dynamics of the flow of the Okhta River in the area of Murino

A.A. Yarmaloyan*, E.S. Urusova

*Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia
armanyarmaloyan@yandex.ru*

Abstract. The aim of the study is to assess the dynamics of the average annual, minimum and maximum flow of the Okhta River in Murino for the period 1970 – 2020. Numerical characteristics of the flow of the Okhta River are calculated and the homogeneity of the two periods from 1970 to 1994 and from 2005 to 2020 is checked. The values of water consumption during the study period did not undergo significant changes.

Keywords: Okhta river, river flow, water flow.

Введение

Река Охта – крупнейший приток р. Невы, протекающий в Ленинградской области во Всеволожском районе, а также в северо-восточной части г. Санкт-Петербург с площадью водосборного бассейна 768 км². Протяженность р. Охты составляет 99 км. Прямолинейное расстояние от истока до устья около 45 км [1].

Исследование параметров стока реки Охта является актуальной в связи с тем, что в последние десятилетия водосбор реки подвергся существенным изменениям. Территория в районе города Мурино становится более урбанизированной, так как все новые и новые территории отводятся под строительство жилых кварталов. В связи с этим важно оценить сказываются ли подобные изменения водосбора на водности реки.

Цель исследования – оценить динамику среднегодового, минимального и максимального стока реки Охта в г. Мурино за период 1970-2020 гг.

Материалы и методы исследования

Пункт наблюдения на реке Охта расположен в д. Новое Девяткино. Карта представлена на Рис.1, пост находится в 300 м к западу от деревни, в 500 м выше устья ручья Лесного.

Прилегающая местность представляет собой слабоволнистую равнину, сложенную суглинистыми и супесчаными грунтами, занятую в основном,

сельскохозяйственными угодьями, местами хвойным лесом и луговой растительностью. Долина реки шириной 200-300м, с 1973 года на реке ледостав отсутствует. Это связано со сбросом теплой воды Северной ТЭЦ. С июня 1994 года утрачен перекидной гидрометрический мостик и расходы воды не измеряются. Шоссейный мост в 300 м ниже поста разрушен.

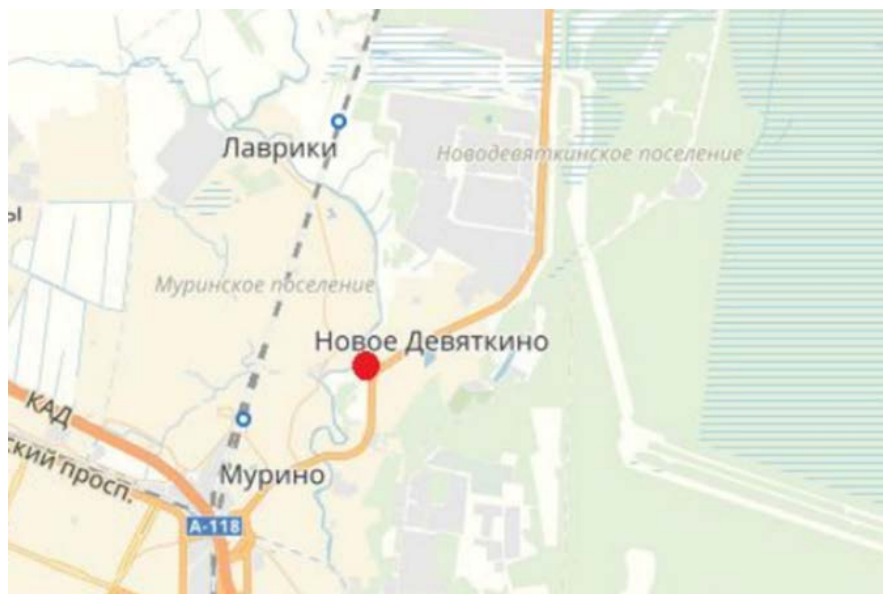


Рис. 1 Действующий гидрологический пост р. Охта – д. Новое Десяткино.

В исследовании используется программа для работы с электронными таблицами Microsoft Excel и программа для проверки на однородность StokStat.

Объектом исследования являются данные о среднегодовых, минимальных и максимальных расходах воды в реке Охта с 1970 – 2020 гг., полученные в ежегодных данных о режиме и ресурсах поверхностных вод суши [2].

Результаты среднегодовых значений расхода воды представлены на Рис. 2.



Рис. 2 График значения среднегодовых расходов воды в реке Охта, м³/с.

Результаты и выводы

Были вычислены такие числовые характеристики, как среднее, среднеквадратическое отклонение, коэффициент вариации и коэффициент асимметрии. Результаты представлены в Табл.1.

Табл. 1 Результаты расчетов числовых характеристик.

1970-2020			
	Среднегодовое	Максимальное	Минимальное
Среднее	4,286	25,257	0,736
СКО	1,000	7,527	0,341
Cv	0,233	0,298	0,464
Cs	-0,272	0,205	-0,118
1970-1994			
Среднее	4,218	25,200	0,686
СКО	1,010	7,553	0,312
Cv	0,239	0,300	0,455
Cs	-0,165	1,052	0,005
2005-2020			
Среднее	4,391	25,346	0,814
СКО	1,008	7,732	0,380
Cv	0,230	0,305	0,467
Cs	-0,435	-1,065	-0,427

Результат оценки числовых характеристик среднегодового стока показал, что ряды обладают низкой вариативностью и отрицательной асимметрией. В общем, ряды среднегодовых, минимальных и максимальных расходов воды за период 2005-2020 годы обладают большей степенью асимметрии, по сравнению с другими периодами.

Далее была проведена проверка на однородность двух периодов с 1970 – 1994 и с 2005 – 2020 в приложении StokStat, результаты представлены в Табл.2.

Табл.2 Результаты проверки на однородность двух периодов (1970 – 1994 и 2005 – 2020).

Результаты проверки на однородность по критерию Фишера, Стьюдента и Уилкоксона							
		Среднегодовые значения		Максимальные значения		Минимальные значения	
Критерий Фишера	F	1,004	Ряды однородны	1,048	Ряды однородны	1,479	Ряды однородны
	Fa	1,980		1,98		1,980	
Критерий Стьюдента	t	0,518	Ряды однородны	0,058	Ряды однородны	1,141	Ряды однородны
	ta	1,677		1,677		1,677	
Критерий Уилкоксона	U	219,000	Ряды однородны	172,00	Ряды однородны	248,00	Ряды однородны
	U1	138,263		138,263		138,26	
	U2	261,737		261,737		261,74	

Как видно из представленных данных, для среднегодовых, максимальных и минимальных рядов стока за два исследуемых периода гипотезы об однородности не опровергаются ни по одному из критериев. Следовательно данные за период 1970-1995 и 2005-2020 принадлежат к одной генеральной совокупности.

В результате проведенного исследования оценки динамики среднегодовых, минимальных и максимальных расходов воды реки Охты в г. Мурино показала, что:

1. Наибольшей вариативностью обладают ряды минимального стока. Наименьшей вариативностью — ряды среднегодового стока.

2. Ряды расходов воды за период 2005-2020 гг. обладают большей отрицательной асимметрией, что говорит о присутствии в рядах отдельных лет с низкими значениями расходов воды.

3. Оценка однородности по критериям Стьюдента, Фишера и Уилкоксона показала, что ряды расходов воды за периоды 1970-1994 и 2005-2020 принадлежат к одной генеральной совокупности.

4. В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что значения расходов воды за исследуемый период не претерпели существенных изменений. Следовательно, факторы, формирующие сток реки Охта не изменились. Однако учитывая тенденции периода 1995-2020 гг. исследования динамики стока реки Охта необходимо продолжить.

Список литературы

1. Охта // Информационный сайт о реках России. Все реки URL: <https://vsereki.ru/atlanticheskij-ocean/bassejn-baltijskogo-morya/neva/oxta>

2. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. (Гидрологические ежегодники из библиотеки ГГИ).

Научное издание

**Сборник докладов
международной научной конференции
памяти выдающегося русского ученого
Юрия Борисовича Виноградова
ПЯТЫЕ ВИНОГРАДОВСКИЕ ЧТЕНИЯ.
ГИДРОЛОГИЯ В ЭПОХУ ПЕРЕМЕН**

Санкт-Петербург, 2023 год

Электронное текстовое издание

Редакция: О.М. Макарьева, П.А. Никитина

Верстка: О.М. Макарьева, П.А. Никитина

Оформление: Л. Иванова-Ефимова, О.М. Макарьева, П.А. Никитина

Сборник разработан с помощью программного обеспечения

Microsoft Office Word, Adobe Acrobat Pro

Подписано к использованию 15.12.2023

Усл. печ. л. 134,38. Заказ № 1191.

Издательство ВВМ.
198095, Санкт-Петербург, ул. Швецова, 41.