

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
(Росгидромет)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ВЫСОКОГОРНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

**Сборник тезисов
Всероссийской открытой конференции**

**СОСТОЯНИЕ ГОРНЫХ ЛЕДНИКОВ
В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА
30-31 мая 2024 г.**

Под ред. Калова Р.Х., Докукина М.Д.



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
(Росгидромет)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ВЫСОКОГОРНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»



**Сборник тезисов
Всероссийской открытой конференции
СОСТОЯНИЕ ГОРНЫХ ЛЕДНИКОВ
В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА
30-31 мая 2024 г.**

Под ред. Калова Р.Х., Докукина М.Д.

г. Нальчик, 2024 г.

УДК 551.324+551.578.462

Сборник тезисов Всероссийской открытой конференции «Состояние горных ледников в условиях современного изменения климата». – Нальчик, 30-31 мая 2024 г./Под ред. Калова Р.Х., Докукина М.Д. – Нальчик: Издательская типография «Принт Центр», 2024. – 44.с.

Сборник содержит тезисы докладов Всероссийской открытой конференции «Состояние горных ледников в условиях современного изменения климата», состоявшейся 30-31 мая 2024 г. в Нальчике. Основная часть работ посвящена исследованиям современного состояния горных ледников в условиях изменяющегося климата, опасных процессов и явлений, связанных с деградацией горных ледников, а также методам их исследования.

В докладах представлены результаты полевых исследований, теоретических разработок и численного моделирования процессов и явлений, связанных с горным оледенением.

В работе конференции приняли участие ученые из России и зарубежных стран.

Сборник рассчитан на специалистов в области физической географии, гляциологии, гидрологии, метеорологии и климатологии.

Материалы публикуются в авторской редакции.

Collection of abstracts of the All-Russian Open Conference " The State of Mountain Glaciers in the Conditions of Modern Climate Change". - Nalchik, 30-31 May 2024/ Edited by R. Kh. Kalov, M.D. Dokukin - Nalchik: Print Centre Publishing House, 2024. - p.

The collection contains abstracts of reports of the All-Russian Open Conference "The State of Mountain Glaciers in the Conditions of Modern Climate Change" has been in Nalchik on 30-31 May 2024. The main part of the work is devoted to studies of the current state of mountain glaciers under changing climate conditions, hazardous processes and phenomena associated with the degradation of mountain glaciers, as well as methods of their research.

The reports present the results of field studies, theoretical developments and numerical modelling of processes and phenomena related to mountain glaciation. Scientists from Russia and foreign countries took part in the conference.

The collection is intended for specialists in physical geography, glaciology, hydrology, meteorology and climatology.

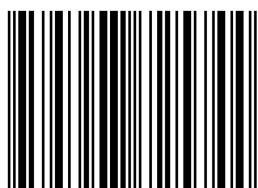
Materials are published in author's edition.

ISBN 978-5-907725-74-4

Подписано в печать 20.04.2024. Формат 60x84/16.
Печать цифровая. Бумага офсетная. 3.5 усл.п.л.
Тираж 100 экз. Заказ № 055
г. Нальчик, 2024

Изготовлено в издательской типографии
«Принт Центр»
г. Нальчик, ул. Братьев Кушховых 79 «А»
www.print07.ru

ISBN 978-5-907725-74-4



9 785907 725744 >

Секция 1
Методы исследования горных ледников

**КАТАЛОГ ЛЕДНИКОВ РОССИИ (2017-2019) КАК ОСНОВА
ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

Хромова Т.Е.

ФГБУН «Институт географии РАН», г. Москва

Оценки и прогнозы изменения ледников требуют интеграции всех доступных методов исследования. Мониторинг и каталогизация играют важную роль в комплексных исследованиях ледников, являются одним из быстро развивающихся направлений исследований. Актуальные границы ледников позволяют снизить неопределенности в гляциологических и климатических расчетах, оценить тенденции изменений ледников и связь их с изменениями климата.

До недавнего времени первая и единственная системная оценка ледников на территории России была сделана в Каталоге ледников СССР (Каталог ледников, 1965–1982) – многотомном издании, созданном большим коллективом советских учёных в 1965–1982 гг. Это был первый в мире каталог ледников, покрывающих обширную территорию; впоследствии, в соответствии с программой Международного гидрологического десятилетия он стал её частью. Этот каталог был создан на основе аэрофотоснимков середины XX века, топографических карт 1960-х годов и данных полевых наблюдений.

Для системной оценки современного состояния и изменений ледниковых систем на территории России в Институте географии РАН был создан каталог ледников, основанный на единых исходных данных, подходах и методах обработки спутниковых снимков и организации данных с использованием геоинформационных технологий (Хромова и др., 2021). Каталог аккумулирует результаты анализа снимков Sentinel-2, полученных в основном в 2017–2019 гг. и представляет собой информационную основу для дальнейшего исследования ледниковых районов России.

Структура базы данных включает основные параметры ледников и совместима с глобальными и национальными архивами. Дополнительно разработана классификация возможных катастрофических явлений ледникового генезиса: динамически неустойчивые ледники, ледниковые озёра, айсберги. База данных доступна онлайн (www.glacru.ru).

Новый Каталог позволил оценить современное состояние и изменения ледников на территории России. В конце второй декады XXI века в России насчитывалось 22 ледниковые системы общей площадью 54 531 км². Со времени составления Каталога ледников СССР (1965–1982 гг.) она сократилась на 5603,9 км², или на 9,3%.

Созданный информационный ресурс представляет собой основу для развития системы мониторинга состояния ледников на территории России. Формируется раздел Каталога, аккумулирующий информацию о размерах ледников на 2022-2023гг. Для ряда районов сделаны оценки изменений размеров ледников за несколько временных срезов. Такие исследования проведены, в том числе для Кавказа (Tielidze et al., 2022), Алтая (Торопов и др., 2020),

хр. Черского (Муравьев и др., 2022), гор Сунтар-Хаята (Муравьев и др., 2021). Выявлено увеличение темпов сокращения ледников в первой четверти XXI века.

Предлагаемая геоинформационная система обеспечит актуальной информацией научное сообщество и государственные структуры разного уровня. Она позволяет оценивать ресурсный потенциал ледниковых районов, выявлять территории, особо уязвимые к воздействию неблагоприятных явлений гляциального генезиса, разрабатывать рекомендации по хозяйственному освоению новых горных и арктических территорий, давать оценку связанных с этим рисков.

Задачами дальнейших исследований является определение оптимальных сроков повторных инвентаризаций, которые зависят от скорости изменений ледниковых параметров; совершенствование методов дешифрирования спутниковых снимков, включая комбинирование автоматизированных и экспертных подходов; расширение информационной инфраструктуры базы данных, в которую планируется включать результаты прямых наблюдений и дистанционных исследований на отдельных ледниках и узлах оледенения.

Список литературы

1. Каталог ледников СССР. - М., Л.: Гидрометеиздат, 1965–1982.
2. Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Глазовский А.Ф., Муравьев А.Я., Никитин С.А., Лаврентьев И.И. Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016–2019 гг.)//Лёд и Снег. - 2021. - Т. 61. - № 3. С. - 341–358. Doi: 10.31857/S2076673421030093
3. Муравьев А.Я., Носенко Г.А. Сокращение оледенения хребта Улахан-Чистай (горы Черского) в 1970–2018 гг.//Лёд и Снег. 2022; 62(2): 179-192. <https://doi.org/10.31857/S2076673422020124>
4. Муравьев А.Я., Носенко Г.А., Никитин С.А. Сокращение оледенения гор Сунтар-Хаята с середины XX века по 2018 год//Лёд и Снег. 2021; 61(4): 485-499. <https://doi.org/10.31857/S2076673421040103>
5. Торопов П.А., Алешина М.А., Носенко Г.А., Хромова Т.Е., Никитин С.А. Современная деградация горного оледенения Алтая, ее последствия и возможные причины//Метеорология и гидрология. - 2020. - Вып. 5. - С. 118–130.
6. Tielidze L.G., Nosenko G.A., Khromova T.E., Paul F. Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus between 2000 and 2020//The Cryosphere. - 2022. - V. 16. P. 489–504, <https://doi.org/10.5194/tc-16-489-2022>.

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЛЬДА И ИЗУЧЕНИЯ ПОДЛЁДНОГО РЕЛЬЕФА ЛЕДНИКОВ КАВКАЗА

Лаврентьев И.И., Киселёва Т.Д., Кутузов С.С., Смирнов А.М.
ФГБУН «Институт географии РАН», г. Москва

Метод радиолокационного зондирования для изучения ледников применяется с конца 1950-х годов, и наряду с методами прямых исследований и моделированием, используется всё чаще. С 1970–х гг. радиозондирование становится одним из основных инструментов для измерения толщины ледников, почти полностью заменив другие ранее используемые геофи-

зические контактные методы, включая сейсмондирование и гравиметрические измерения. В настоящее время метод продолжает активно развиваться и получил широкое распространение как наиболее удобный и точный метод определения толщины ледников. Основным достоинством является его высокая производительность, обусловленная простотой получения информации (по времени прихода отражённых от ложа импульсов), и возможность как наземного применения, так и дистанционных измерений с борта самолёта или вертолётa. С помощью современных георадаров изучают пространственное распределение различных параметров ледников, связанных с диэлектрической проницаемостью: при выделении границ между ледниковым льдом и коренными породами (толщина льда и рельеф ложа), при разделении тёплого и холодного льда в политермических ледниках (внутреннее строение), а также для выделения границ годовых или сезонных слоёв в снежно-фирновой толще (аккумуляция).

Толщина льда – один из основных параметров, который необходим для расчёта объёма и массы ледника, оценки запасов воды, заключённой в нём, а также для корректного прогноза изменений размеров и строения ледников. Кроме толщины льда радиолокационные измерения, совместно с данными о высоте поверхности ледника, дают возможность изучать подледниковый рельеф. Так, недавние исследования показали, что под ледниками Эльбруса существует значительное количество понижений в рельефе, которые в будущем, при отступании ледников, могут заполниться водой и стать озёрами. Процесс деградации ледников на Кавказе, как и в других горных районах, идёт всё быстрее, и это хорошо видно по результатам масс-балансового мониторинга и по данным повторных аэро-фото или космических съёмки. Сокращение ледников, в особенности отступление их языков, ведёт к формированию и росту ледниковых озёр. Прорывы таких озёр, сформировавшихся в последние десятилетия, уже привели к человеческим жертвам и значительному ущербу. И задача поиска и оценки объёмов потенциальных ледниковых озёр на Центральном Кавказе становится всё более актуальной, в том числе и благодаря развитию горнолыжной инфраструктуры и росту числа отдыхающих в Приэльбрусье.

За последние 20 лет сотрудники отдела гляциологии ИГРАН провели целый ряд исследований ледников на Кавказе, которые включали в себя измерения толщины льда методом радиозондирования. Так, в 2012-2014 гг. впервые на Кавказе были выполнены воздушные радиолокационные измерения толщины 5 крупных ледников в долине реки Черек (Безенги, Мижирги, Дых-Су, Айлама и Агаштан), и измерена толщина льда всех ледников Эльбруса. С помощью площадных наземных радиолокационных съёмок была измерена толщина льда и изучен подлёдный рельеф ледников Марух (2011 г.) и Джанкуат (2012-2013 гг.), частично исследованы ледники Безенги, Башкара (2017 г.) и Каяарты (2020 г.). Полученные данные были использованы в том числе для корректировки глобальных моделей толщины льда, что позволило оценить объём ледников всего Кавказа. Кроме того, на основе данных наземного и воздушного радиолокационного зондирования были выявлены участки возможного формирования озёр на коренном ложе некоторых ледников Приэльбрусья. Моделирование показало, что в настоящее время возможно наличие озёр различного размера под ледниками. Эти оценки могут содержать погрешности из-за низкого разрешения данных воздушной радиолокационной съёмки, ошибок ЦМР и моделирования толщины льда. Поэтому детальные наземные радиолокационные съёмки помогут уточнить сделанные ранее оценки площади и объёма будущих приледниковых озёр.

В 2020-2023 гг. такие подробные измерения были выполнены на леднике Гарабаши, который сейчас активно осваивается, а также в нижней части ледника Большой Азау вблизи

перевала Эхо Войны. Измерения проводились моноимпульсным георадаром ВИРЛ-7 с центральной частотой 20 МГц. Радиолокационное оборудование (блок управления, приёмник, передатчик, GPS и источники питания) было смонтировано на рюкзаках и перемещалось группой из трёх человек по сети профилей на доступной части ледников. В общей сложности было получено более 80 тыс. точек измерений. По результатам совмещения всех имеющихся данных были составлены схемы распределения толщины льда и рельефа коренного ложа ледника Гарабаши. Средняя толщина ледника составляет 41 м, а максимальное значение – 113 м. Анализ подлёдного рельефа показывает, что на языке ледника Гарабаши есть один участок, где при отступании края возможно образование приледникового озера. Глубина этого участка относительно окружающего рельефа составляет 7-10 м, однако ледниковые наносы могут заполнить это переуглубление и в этом случае озеро не образуется. На леднике Большой Азау результаты измерений показали значительную толщину льда (до 160 м), а также наличие внутри и подледниковых каналов стока воды из недавно образовавшихся воронок на поверхности ледника, заполняющихся водой. Продолжение этих исследований планируется в полевом сезоне 2024 гг.

ИЗУЧЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ЛЕДНИКА БАРКРАК ПО ДАННЫМ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ SENTINEL-1

Семакова Э.Р., Поторжинский М.Г.

Астрономический институт им. Улугбека Академии наук Республики Узбекистан,
г. Ташкент, Республика Узбекистан

Вопросам изучения состояния горных ледников в условиях современного изменения климата и проведения сравнительной оценки их изменения по разным регионам мира в настоящее время уделяется повышенное внимание. Особенно эти вопросы актуальны для засушливых районов Центральной Азии, где ледники рассматриваются как один из наиболее ценных природных ресурсов. В связи с возросшим потоком спутниковой информации и ее эффективным использованием в изучении труднодоступных районов, большое значение в исследованиях современного состояния ледников приобретает выбор методов космической съемки, технологий и алгоритмов в обработке полученных данных, подходов в интерпретировании и оценке результатов. При изучении изменения площади ледников по горным бассейнам Узбекистана за различные периоды, были использовали данные архивов оптической съемки серии Landsat, ALOS/AVNIR-2, Sentinel-2, материалы первых аэрофотосъемок и данные Каталогов СССР. Идентификация границ ледников при этом проводилась визуальным дешифрированием с применением единого подхода. Для оценки качества используемых снимков, покрытых зачастую облачностью и заснеженностью, и выявления тенденции площади оледенения применялись также спектры отражения снега и льда спектральных библиотек с применением математических моделей программных продуктов ENVI, методы отношения каналов и др.

В настоящем исследовании использовались преимущества всепогодной радиолокационной космической съемки, позволяющей уточнять границу ледников на когерентных интерферометрических снимках, выявлять влажность снега, проводить оценку изменения баланса массы ледников и происходящих деформаций поверхности Земли, в том числе ледни-

ков. По результатам обработки снимков Sentinel-1 на район верхней части бассейна реки Пскем был изучен процесс поверхностной деформации ледника Баркрак в направлении на спутник за период с 2017 по 2023 гг.

Данный ледник выбран в качестве тестового, поскольку на нем проводятся ежегодные гляциологические наблюдения за балансом массы с 2017 г.

Предельное пространственное разрешение радиолокационных снимков Sentinel-1 формата SLC составляет 27 метров на пиксель после проведения необходимой фильтрации. С использованием программного обеспечения SNAP осуществлялся выбор пар снимков с минимальной перпендикулярной базовой линией и оптимальных параметров развертки фазы интерферограмм. Из-за огромного объема вычислений приходилось ограничивать площадь фрагмента снимка и проводить обработку поочередно для различных участков. Критерием выбора оптимальных пар снимков являлось минимальное базовое время (12 дней) между пролетами спутника и минимальное базовое расстояние (менее 30 м). Однако специфика оценки изменения объема ледников привязана к годовым колебаниям, поэтому несмотря на невысокую когерентность таких интерференционных пар со значениями по поверхности ледников от 0,2 до 0,6, на таких снимках удалось выявить происходящие деформации ледников.

Существующие примеры изучения деформаций ледников Аляски на сайте службы предоставления спутниковых данных ASF NASA показывают сезонные деформации (оседание и поднятие) грунта в областях вечной мерзлоты и участков ледников до ± 3 см в год. Начало оседания грунта вечной мерзлоты приходится на начало июня, а поднятия из-за промораживания - на начало октября, при этом оседание не ограничено границей ледников, а расширено вокруг них. Для изучения деформаций используются как непрерывные 12-дневные интерференционные связи, так и межгодовые связи между снимками Sentinel-1. Из-за особенностей съемки пространственное разрешение выходных карт ограничивают диапазоном от 40 до 80 метров на пиксель.

Проведенные нами исследования выявили аналогичные взаимосвязи деформации ледника Баркрак с метеорологическими условиями; в некоторые периоды наблюдается чередование оседания и поднятия ледников и территории вокруг них в направлении на спутник. Просуммированные данные деформаций за период с 2017 по 2023 год съемки системы Sentinel-1 выявили оседание ледников Баркрак Средний и Баркрак Правый для восходящей и нисходящей орбит съемки от 10 см до 35 см. Средняя квадратичная ошибка расчета деформации составила 23% от величины суммарной деформации для каждого пикселя ледника. Таким образом, среднее значение поверхностной деформации ледников Баркрак за рассмотренный период составляет $(-200) \pm 46$ мм. Полученные результаты согласуются с расчетами баланса массы ледника гляциологическим и геодезическим, с использованием данных TerraSAR-X / TanDEM-X, методами.

ИССЛЕДОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В РОССИИ ПО КЕРНАМ ЛЬДА

Михаленко В.Н.¹, Торопов П.А.^{1,2}, Чижова Ю.Н.^{1,3}, Кутузов С.С.¹, Воробьев М.А.¹,
Хайрединова А.Г.¹, Виноградова М.М.¹, Владимирова Д.О.¹, Козачек А.В.⁴

1 - ФГБУН «Институт географии РАН», г. Москва,

2 - ФГБУ «Московский государственный университет им. Ломоносова», Москва

3 - ФГБУН «Институт геологии рудных месторождений, петрографии,
минералогии и геохимии РАН», Москва

4 - ФГБУ «Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт»,
г. Санкт-Петербург

В современных условиях, когда климатические изменения носят глобальный характер, ледниковые палеоархивы занимают особое место. Хорошо известно, что из кернов льда можно получить как прямые данные об изменении атмосферных осадков, палеопожарах, загрязнении и составе атмосферы, так и косвенные – о температуре воздуха, но на сегодняшний день главная проблема в изучении ледников как палеоархивов – эти архивы на наших глазах исчезают.

В период с 2009 по 2021 гг. на Эльбрусе, Казбеке и в верховьях ледника Безенги был получен ряд кернов льда. В результате исследования кернов льда с Западного плато Эльбруса было реконструировано изменение количества атмосферных осадков с 1750 по 2009 гг. с годовым и сезонным разрешением, определено содержание черного углерода, нитратов, аммония, нерастворимых микровключений. Проанализировано содержание стабильных изотопов кислорода и водорода, в результате чего мы вплотную подошли к реконструкции температуры воздуха за последние 400 лет. Изучение ледникового керна с Восточной вершины Эльбруса (5600 м) позволило восстановить содержание метана в атмосфере за последние 2 тыс. лет. Датирование льда современными методами показало, что возраст придонных слоев на Эльбрусе составляет около 2 тыс. лет.

Сравнение данных реконструкций с результатами метеорологических наблюдений на метеостанциях и в областях питания ледников позволило определить, для какой территории эта реконструкция является значимой.

Продолжение исследований керна льда, полученного на Безенгийской стене на высоте 4900 м, и на Казбеке позволит распространить наши реконструкции на весь Северный Кавказ.

Керны льда из высокогорных районов Камчатки и Алтая также содержат данные об изменении регионального климата.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ 22-17-00159

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БПЛА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ ЛЕДНИКОВ И ЛЕДНИКОВО-МОРЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Акаев А.Р.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Нальчик

В данной работе представлены результаты исследования ледников и ледниково-моренных комплексов в высокогорной зоне Кабардино-Балкарской республики.

Цель работы: разработка комплексной методики моделирования ледниковых поверхностей по данным беспилотной аэрофотосъемки.

В условиях высокогорий, межгодовая и внутригодовая динамика ландшафтов, помимо трансформации элементов водного баланса, а также биогеографических условий, будет проявляться и в особенностях протекания экзогенных геологических процессов, формирующих облик форм современного гляциального и флювиогляциального рельефа. При этом для их изучения требуются крупномасштабные картографические источники, одним из способов получения которых могут быть беспилотные летательные аппараты (БПЛА). При этом, не является секретом, что проведение аэрофотосъемки в высокогорье затрудняет сложный характер рельефа, непредсказуемые, а зачастую и экстремальные погодные условия и явления (ветер, дождь, колебания температуры и т. д.).

В процессе исследовательской и практической деятельности были проведены выездные экспедиционные работы в высокогорные районы республики, для изучения с использованием БПЛА различных экзогенных процессов, динамики ледников, обвалов, лавинных очагов и ледниково-моренных комплексов.

В дальнейшем полученные материалы съемки обработаны в приложении Agisoft Methashape, и получен ряд обработанных материалов (ортофотоплан, ЦММ, ЦМР, Карты глубины и т.д.). Эти материалы используются для определения объемов таяния ледников, изменения их площадей и т.д. Для их мониторинга и динамики используются разные методики и подходы.

ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА ПОЛЯ АККУМУЛЯЦИИ ЛЕДНИКА ДЖАНКУАТ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Чеховских А.М., Поповнин В.В., Губанов А.С.

МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Снегонакопление в районах распространения горного оледенения имеет решающее значение для существования ледников, определяя интенсивность процессов массообмена в ледниковых системах. Динамичность процессов, происходящих в глобальной климатической системе, приводит к ежегодному колебанию величины аккумуляции на горных ледниках. Метеорологические процессы на локальном уровне вкупе с особенностями морфологии поверхности горного ледника и рельефа окружающих склонов приводят к перераспределению выпадающих твердых осадков и пространственной неоднородности величины аккумуляции.

Ежегодно формируемое поле аккумуляции горного ледника является отражением совокупности процессов снегонакопления, лавинного и метелевого переноса. Сама величина го-

довой аккумуляции не позволяет проанализировать внутреннюю структуру поля аккумуляции и изучить сходство полей в годы равных или близких значений ледниковой аккумуляции. Целью исследования является определение степени подобия полей аккумуляции ледника Джанкуат (Центральный Кавказ) и выявление пространственных закономерностей распределения водозапаса.

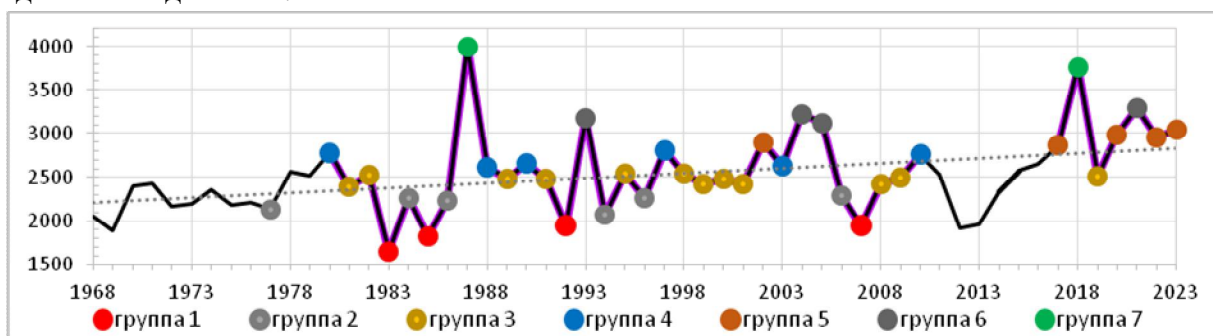


Рисунок 1. Серия годовых значений аккумуляции ледника Джанкуат (мм вод. экв.) и линейный тренд (пунктирная линия), классификация сезонов по величине аккумуляции и временной период анализируемых полей аккумуляции (фиолетовая линия).

Поле аккумуляции является континуальным полем, построенным по результатам полевой снегосъемки с применением интерполяции между пунктами измерений и косвенных расчетов на недоступные и опасные участки ледника. Архив полей аккумуляции содержит материалы 1976/77, 1980-2010 и 2017-2023 гг., анализируемых в данной работе.

Для исследования внутренней структуры полей снегонакопления проведена классификация лет по величине аккумуляции и выделены 7 групп лет с равными или близкими значениями (рис.1). Внутри отдельных классов размах значений не превышает 220 мм вод. экв. кроме сезонов аномально высоких (группа 7, размах 240 мм вод. экв.) и аномально низких значений аккумуляции (группа 1, размах 300 мм вод. экв.).

Изменчивость поля аккумуляции внутри каждой группы рассчитана с помощью коэффициента вариации в узлах регулярной сети 50 Ч 50 м, используемой для покрытия всей площади ледника равноудаленными пунктами известных значений водозапасов. Результаты расчетов показывают увеличение устойчивости поля аккумуляции с увеличением значения ледниковой аккумуляции (рис.2). Также с увеличением ледниковой аккумуляции замечено уменьшение разницы величины снегонакопления на заморененной и ледовой поверхности языка ледника. В малоснежные годы наблюдается резкое уменьшение устойчивости поля аккумуляции в зоне моренного покрова, на положительных формах рельефа ледниковой поверхности, в зонах транзита лавин и лавинных конусов, что частично согласуется с обратной зависимостью фоновой зимней аккумуляции и доли лавинного питания ледника Джанкуат [1].

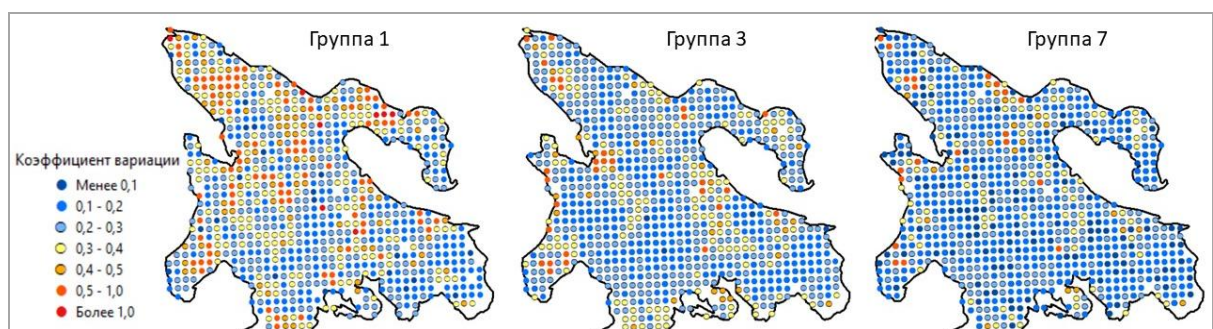


Рисунок 2. Значения коэффициента вариации аккумуляции в узлах регулярной сети в аномально малоснежные, среднеснежные и аномально многоснежные годы.

Корреляционный анализ, связывающий годовые реализации поля аккумуляции, не позволил установить подобие поля аккумуляции внутри каждой группы и выявить устойчивые пространственные закономерности влияния величины ледниковой аккумуляции на поле аккумуляции горного ледника.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект 22-17-00133).

Список литературы

1. Поповнин В.В., Сергиевская Я.Е. Об обратной связи доли лавинного питания с аккумуляцией ледника // Лёд и Снег. -Т.58, №4. – 2018. - С. 437-447.

ВЛИЯНИЕ РАЗРАСТАНИЯ МОРЕННОГО ПОКРОВА НА АБЛЯЦИЮ ЛЕДНИКА ДЖАНКУАТ

Губанов А.С.

МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

Поверхностная морена является неотъемлемой составляющей ледниковой поверхности. На современной стадии деградации ледников, при которой интенсифицируется привнос литогенного материала с обнажающейся из-под льда скальной облицовки, учёт влияния моренного покрова начинает играть всё более значимую роль в балансовых расчётах – поверхностные отложения существенно определяют абляцию глетчерного льда, что напрямую отражается в ледниковом стоке и в балансе массы ледника. Согласно [1], слой морены мощностью до 5-7 см ускоряет таяние, а более толстый – бронирует лёд, ослабляя таяние вплоть до полного прекращения.

Моренный покров ледника Джанкуат наблюдается уже более 55 лет - с самого начала масс-балансовых работ в 1967/68 г. За это время проведена уникальная серия из четырёх повторных мореносъёмок 1983, 1994, 2010 и 2022 гг., отражённых затем в крупномасштабных картах толщины моренного чехла, наглядно свидетельствующих об изменениях площади и объема моренного покрова. Покрываемость мореной за более чем полувековой интервал возросла с 3 до 20% от суммарной площади ледника. К 2020-ым гг. в области абляции ледника, помимо закономерного роста заморененности в краевых и конечных зонах языка, добавилось значительное количество моренного материала с верхних зон ледника, накопившегося там в результате обвалов 2001 и 2003 гг. (рис.1), что стало существенным образом влиять на поле абляции на языке Джанкуата.

Расчёт баланса массы на Джанкуате подразумевает построение полей компонен-



Рисунок 1. Ледник Джанкуат в 2022 г. Стрелками указан моренный материал, сформированный обвалами 2001 и 2003 гг.

тов баланса массы по топоосновам, обновляемым с периодичностью в 6-10 лет. После обработки материалов очередной мореносъёмки они отображаются на последней действующей топооснове.

Далее при построении поля абляции учитывается влияние моренного покрова: накладывается актуальная маска толщин морены, и в системе реперных точек вводятся коэффициенты усиления либо ослабления таяния. Результаты измерений мореносъёмки 2010 г. применялись для построения полей абляции вплоть до 2020/21 балансового года, тогда как начиная с 2021/22 г. поле абляции строилось с учётом новой карты моренного покрова, отображающей уже итоги мореносъёмки 2022 г. На рис.2 видна существенная разница в распределении значений толщины морены, осреднённых по принятой на Джанкуате системе высотно-морфологических зон.

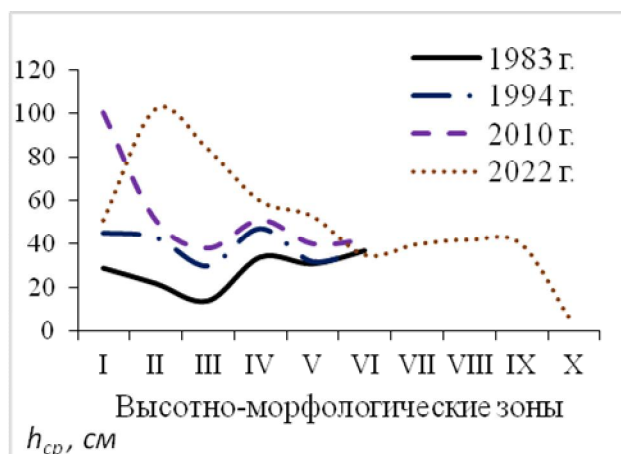


Рисунок 2. Изменение между мореносъёмками разных лет значений толщины моренного чехла (h_{cp}), осреднённой по системе высотно-морфологических зон Джанкуата.

В результате изменившаяся конфигурация моренного покрова на языке отразилась на конечных значениях абляции: 2020/21 и 2021/22 балансовые года, схожие по величинам абляции для всего ледника в целом, заметно различаются по темпам убыли вещества в самых нижних зонах ледника. В 2020/21 г., по маске морены 2010 г., среднезональные значения абляции на языке превышают 6000 мм вод. экв., тогда как в 2021/22 г. они варьируют в пределах 4800÷5000 мм вод. экв.

Таким образом, преобладание и разрастание на леднике Джанкуат заморененных участков с толщиной чехла >7 см усиливает общее бронирующее воздействие поверхностной морены и снижает абляцию льда. Ослабление таяния происходит на 81% заморененной части ледника, уменьшая общий объём стока на 35% и меняя структуру поля абляции на языке.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект 22-17-00133).

Список литературы

1. Божинский А.Н., Красс М.С., Поповнин В.В. Роль моренного чехла в теплофизике горных ледников // Материалы гляциологических исследований. – 1985. - №. 52. - С. 31-46.

Секция 2

Современное состояние и изменения горного оледенения

ТЕНДЕНЦИИ МАССООБМЕНА ЛЕДНИКА ДЖАНКУАТ (КАБАРДИНО-БАЛКАРИЯ) В ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ

Поповнин В.В.

МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Расположенный в Кабардино-Балкарии ледник Джанкуат является традиционным объектом комплексного гляциологического мониторинга Московского университета. Его непрерывный 56-летний ряд прямых инструментальных измерений баланса массы, самый продолжительный в России, позволяет считать его наиболее изученным ледником страны, а выбор Всемирной службы мониторинга ледников возводит Джанкуат в ранг одного из опорных ледников Земли. Главным достоинством этих работ служит максимальная достоверность получаемых здесь оценок баланса массы и его компонентов. Это достигается, с одной стороны, чрезвычайной густотой пунктов прямых измерений аккумуляции и абляции, а с другой, принятой концепцией расчёта балансовых характеристик по результатам обработки их полей, охватывающих 100% площади ледника. Именно на Джанкуате ежегодное построение полей аккумуляции, абляции и баланса массы было введено в практику гляциологических работ одним из первых в мире (первый опыт был получен более 50 лет назад), а по детальности прорисовки полей на сегодняшний день Джанкуат не уступает ни одному леднику на Земле.

Итоги непрерывных масс-балансовых измерений и расчётов с 1967/68 г. демонстрируют общую тенденцию к сокращению водно-ледовых ресурсов опорного ледника касательно и его размеров, и показателей в слое воды. Однако в этом ряду наблюдений выделяется несколько эволюционных этапов. Если отрезок до середины 1980-х гг. характеризовался невысокими темпами отступления фронта и умеренно отрицательными значениями баланса массы, то далее наступило десятилетие условий весьма благоприятных для оледенения Центрального Кавказа, судя по Джанкуату как репрезентативному объекту, не только в относительном, но и в абсолютном ключе: преобладали положительные значения баланса, а фронт ледника временно стабилизировался. Но на стыке веков тенденция кардинально сменилась, и вплоть до сегодняшнего дня наблюдается максимально устойчивая и стремительная деградация опорного ледника. Мало того, что ускорилось сокращение физической площади Джанкуата (с 3,234 до 2,505 км², т.е. на 22% за 50 лет), а отступление его фронта составило за весь период наблюдений с 1968 г. уже 557 м, но совершенно драматично стала выглядеть кумулята убыли массы ледника. После того, как в 2004/05 г. было зафиксировано последнее положительное значение баланса, в последующих 18 сезонах через 0 величина баланса не переходила ни разу (беспрецедентный случай за почти что полуторавековой интервал времени, судя по реконструкции [1] с 1871 г., построенной в своё время по метеоданным Пятигорска). Если до 2004/05 г. среднее значение баланса составляло -97 мм вод. экв. в год, то впоследствии до наших дней оно упало до -801 мм.

Причинами описанной динамики видится то, что на фоне наблюдающейся уже свыше 50 лет явной тенденции зимнего снегонакопления к росту (предопределившей в первую оче-

редь благоприятный для оледенения Кавказа эпизод 1980-90-х гг.) абляция ледника в летнее время обнаруживает неуклонный рост по модулю, перевешивая по своему балансовому эффекту позитивный тренд аккумуляции. Правда, некоторым наметившимся исключением выглядят заключительные 5-7 лет, когда рост снежности зим в гляциальном поясе немного увеличился, а темпы как усиления абляции, так и роста чистой убыли массы несколько замедлились. Впрочем, колебания баланса массы всё равно остаются в области отрицательных значений.

Важной представляется выявленная стойкая тенденция к росту обмена ледника (т.е. суммы аккумуляции и абляции, взятой по модулю), прослеживающаяся в течение всего многолетнего периода мониторинга с 1967/68 г. Этот показатель интенсивности круговорота вещества в гляциальном поясе служит косвенным индикатором ослабления в масштабе последних десятилетий свойств континентальности климата кавказского высокогорья, хотя пока остаётся неясным, является ли обнаруженная закономерность интенсификации массообмена ледника локальным или региональным свойством.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект РНФ 22-17-00133).

Список литературы

1. Дюргеров М.Б., Поповнин В.В. Реконструкция баланса массы, пространственного положения и жидкого стока ледника Джанкуат со второй половины XIX в. – Мат-лы гляц. иссл., вып.40, 1980 (1981), с.78-82.

УСКОРЕННОЕ СОКРАЩЕНИЕ ЛЕДНИКОВ МАССИВА МОНГУН-ТАЙГА (АЛТАЙ) В XXI СТОЛЕТИИ

Ганюшкин Д.А., Грига С.А., Горбунова Ю.А.

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Рассмотрено сокращение долинных ледников Восточный Мугур и Селиверстова на основе использования полевых материалов, аэро-фото и комических снимков и палеорекоstructions. В максимум малого ледникового периода (МЛП) площадь ледника Восточный Мугур составляла 4,44 км², длина - 4,1 км, ледник располагался в глубоком трогге северо-восточной экспозиции и подпруживался, упираясь в его разворот. До 2011 г. скорость отступления ледника составляла от 2 до 9 м/год, относительное сокращение площади - 0,1-0,3% в год. В 2011-2016 гг. отступление ускорилося до 10,1 м/год, сокращение площади до 0,4% в год. С 2016 г. отступление возросло до 41-43 м/год, сокращение площади до 0,5-0,9% в год. Ледник на 2023 год близок к разделению на два, наметилось разделение северо-западного ледникового потока на 2 языка, срединная морена с ядром из забронированного льда превращается в самостоятельное образование. Стаявшая за 2000-2023 гг. толщина льда в языковой части ледника оценена 45-68 м.

Ледник Селиверстова в максимум МЛП имел площадь 4,84 км², длину 4,9 км, пологий язык ледника длиной 3 км располагался в слабоврезанной долине восточной экспозиции. До 1966 года скорости отступления ледника не превышали 10 м/год, среднее относительное со-

кращение составляло 0,17%/год. В период с 1966 по 1999 гг. отступление ускори́лось, достигнув в конце периода скорости 35 м/год и 0,46%/год. До 2007 года скорости отступления ледника оставались высокими, но в 2007-2013 гг. снизились до 3-8 м/год. Аналогично, скорости относительного сокращения снизились с 1,06%/год в 2000-2006 до 0,34 %/год в 2006-2011 гг. После 2013 г. ледник отступает со средней скоростью 44-47 м/год, сокращение площади ледника достигло 1,23/год в 2019-2023 гг.

Оба ледника в последнее десятилетие демонстрируют реакцию на резкое потепление в конце 1990-начале 2000-х. Согласно нашим расчетам индекса баланса массы по методике Глазырина [1] (рис. 1), резкое ухудшение условий питания ледников началось около 1995 г., ускорение отступления ледников началось почти синхронно в 2013-2016 гг. Соответственно, время запаздывания фронта ледника на изменение климатических условий составило для Восточного Мугура 21 год и для ледника Селиверстова 18 лет.

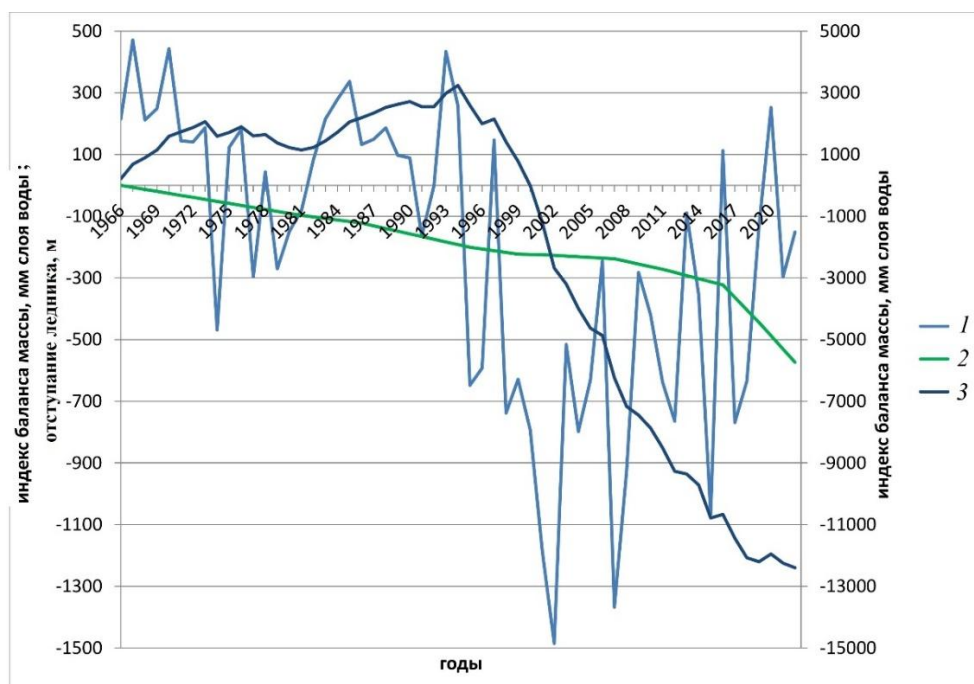


Рисунок 1. Изменение индекса баланса массы.

Улучшение условий питания в последнее десятилетие привело к началу 2020-х гг. к околонулевому балансу массы ледников, однако исходя из определенного нами времени реакции ледника на изменение климатических условий, стабилизации ледников можно ожидать не ранее окончания следующего десятилетия, что при текущих скоростях отступления ледников означает полную деградацию их языков и распаду ледников.

Благодарности. Исследования производились при поддержке РФФ и в рамках реализации проекта № 22-67-00020 “Изменения климата, ледников и ландшафтов Алтая в прошлом, настоящем и будущем как основа модели адаптации населения внутриконтинентальных горных районов Евразии к климатообусловленным изменениям среды”.

Список литературы

1. Глазырин Г. Е. Распределение и режим горных ледников / Г.Е. Глазырин, СПб: Гидрометеиздат, 1985. - 181 с.

ОЛЕДЕНЕНИЕ КУРАЙСКОГО ХРЕБТА

Горбунова Ю.А., Ганюшкин Д.А.

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Было проведено дешифрирование космических снимков и каталогизация ледников Курайского хребта (Восточный Алтай). Снимки для составления каталога - WorldView от 25.08.2021 с разрешением 0,3 м и LANDSAT 7 за 07.08.2000 и 22.07.2000. При определении параметров ледников после оцифровки снимка использовалась глобальная цифровая модель рельефа SRTM 3 (The NASA Version 3.0 SRTM Global 1 arc second) [Earth Resources Observation and Science (EROS) Center]. Минимальные и максимальные высоты, средние уклоны, экспозиции ледников определялись автоматически на основе ЦМР в программе Global Mapper v.18.0 (digitizer tool). Минимальная площадь при дешифрировании – 0,01 км².

На Курайском хребте картированы и каталогизированы 15 ледников 2021 года суммарной площадью 1,63±0,22 км², средневзвешенная по площади высота фирновой границы составила 3174 м.

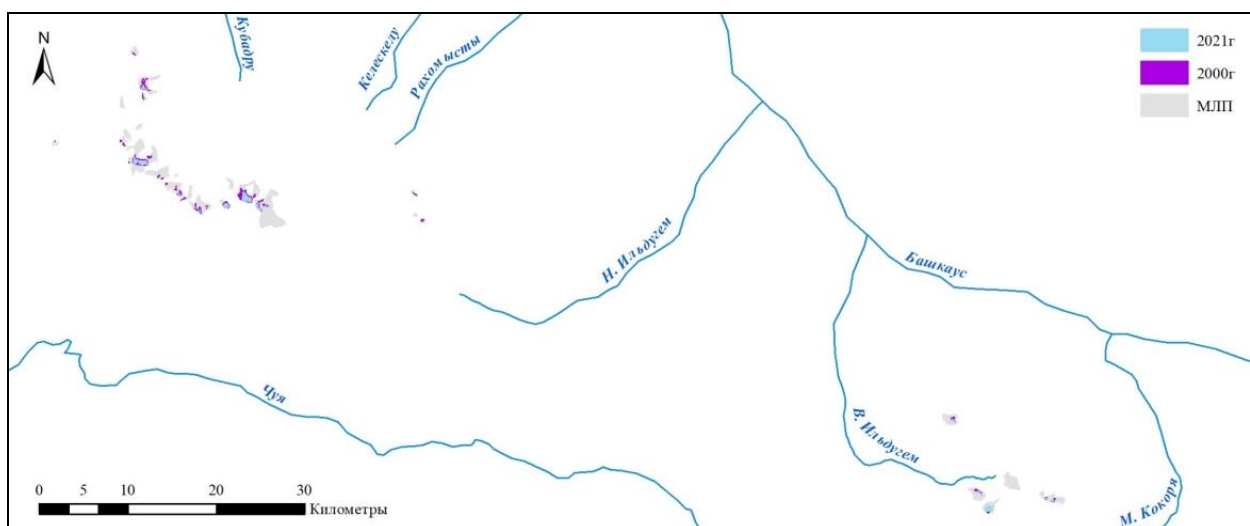


Рисунок 1. Картограмма оледенения Курайского хребта по трем временным срезам (2021 г., 2000 г., МЛП).

Реконструкция и каталогизация ледников по состоянию на 2000 г. проводилась на основе дешифрирования космических снимков LANDSAT 7. Применялось комбинирование каналов (естественные цвета каналов 321 и искусственные цвета 432). Всего на 2000 год реконструирован 31 ледник суммарной площадью 3,47±0,42 км², средневзвешенная по площади высота фирновой границы 3076 м.

Процедура каталогизации ледников малого ледникового периода была аналогичной использовавшейся при каталогизации современных ледников. Для максимума МЛП выделено 38 ледников суммарной площадью 51,30±1,16 км², средневзвешенная по площади высота фирновой границы 2985 м.

Ледники Курайского хребта потеряли с максимума малого ледникового периода по 2021 год 97% площади, что больше, чем в среднем по другим центрам Алтая, по которым проводилась подобная реконструкция (59%) [Ganyushkin и др., 2022]. По данным Каталога ледни-

ков СССР суммарная площадь ледников Курайского хребта на 1968-1974 гг. составляла 7,9 км², при этом долинные ледники в этот период уже отсутствовали, но сохранялось 2 карово-долинных ледника. Если разделить весь период сокращения на этапы (1850-условный 1971 г., как средняя дата по Каталогу ледников СССР, 1971-2000 гг. и 2000- 2021гг.) то всего 4% от этого сокращения приходится на период с 2000 по 2021 г. Основное абсолютное сокращение пришлось на интервал с максимума МЛП по 1971 г., но относительные скорости сокращения продолжали увеличиваться от 0,7% площади/год до 1,44 и 2,53%/год, соответственно. Подобная картина практически аналогична поведению малых ледников периферии Южно-Чуйского хребта. При текущем состоянии климата ледники еще могут существовать 20-30 лет, но дальнейшее потепление приведет к их быстрому полному исчезновению уже в ближайшие 20 лет (по аналогии с полным исчезновением малого оледенения бассейна р. Тархата (Южно-Чуйский хр.) хр. Сайлюгем и Чулышманского нагорья).

Настолько большое сокращение ледников Курайского хребта, в настоящее время близких к полному исчезновению, связано со сравнительно малой высотой хребта (максимальная высота 3446 м, водораздельная часть в пределах 3000-3400 м. 200-метровое поднятие фирновой границы до 3174 м в среднем, произошедшее в период с максимума МЛП по 2021 г, оказалось критическим для существования большинства ледников). Отметим, что подобные высоты на периферии Южно-Чуйского хребта и массива Монгун-Тайга позволяют лишь существовать малым формам оледенения, в настоящее время близким к исчезновению.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ № 22-67- 00020 «Изменения климата, ледников и ландшафтов Алтая в прошлом, настоящем и будущем как основа модели адаптации населения внутриконтинентальных горных районов Евразии к климатообусловленным изменениям среды.: 2023 г. этап 2»

МЕХАНИЗМЫ СОКРАЩЕНИЯ ОЛЕДЕНЕНИЯ ОСНОВНЫХ ГОРНО-ЛЕДНИКОВЫХ РАЙОНОВ РОССИИ

Торопов П.А.^{1,2}, Муравьев А.Я.¹, Корнева И.А.¹, Алешина М.А.¹

¹ ФГБУН «Институт географии РАН», г. Москва

² ФГБУ «Московский государственный университет им. Ломоносова», Москва

e-mail: tormet@inbox.ru тел: +79166471450

В течение последних 30 лет статистически значимое, а местами катастрофическое сокращение горного оледенения отмечается по всем горно-ледниковым районам мира. Кавказ, Алтай и горные районы Камчатки не являются исключением. По результатам анализа спутниковых данных, а также результатов масс-балансовых измерений на отдельно взятых ледниках, в горах Большого Кавказа средний темп уменьшения площади горных ледников составляет 0.7–1% год, примерно такие же значения отмечаются в горных районах Камчатки и Алтая. Эта тенденция хорошо согласуется с наблюдаемым увеличением летнего стока рек Кубань и Терек на Кавказе, и Катунь на Алтае на 5-10% в 2008–2017 гг. по сравнению с периодом 1960–1990 гг. Традиционно такого рода изменения связывают с глобальным потеплением, который наиболее ярко выражается в изменение средней годовой и сезонной температуры воздуха. Основные тенденции температурно-влажностного режима Кавказа, Алтая и Камчатки, были восстановлены на основе инструментальных, а также данных реанализов

ERA-Interim и ERA5. Показано, что в 2010–2020 гг. в течение теплого полугодия статистически значимого изменения годовых сумм осадков по всем горно-ледниковым районам не происходит. Однако при этом отмечается заметный рост температуры, в среднем, на 0.5–0.7°C по сравнению с периодом 1981–2010 гг. Это означает, что турбулентный теплообмен между атмосферой и ледниковой поверхностью в теплое полугодие в современных условиях примерно на 4 Вт/м² выше, чем в 1981–2010 гг. Это может вызвать увеличение слоя таяния на 100 мм водного эквивалента (в. э.). Однако в реальности в 2010-2021 гг. слой абляции на ледниках Кавказа, Алтая и Камчатки увеличился на 400-500 Вт/м² по сравнению с периодом 1981–2010 гг. В работе показано, что основная причина деградации оледенения трех основных горно-ледниковых районов России связана с увеличением потока нисходящей солнечной радиации, достигающего 5 Вт/м² за декаду. Увеличение приходящей радиации вызвало рост годового слоя стаивания на 365 мм в. э. Положительный тренд приходящей солнечной радиации по всем горно-ледниковым районам хорошо согласуется с уменьшением количества облаков, которое по всей видимости связано с увеличением повторяемости антициклонов. С одной стороны, это может быть откликом на ослабление крупномасштабных зональных ветров в средней тропосфере, а на Кавказе – результатом так называемой «экспансии тропиков»: процесса расширения ячейки Хэдли, а значит и сферы действия субтропических антициклонов, в более высокие широты.

О ВЛИЯНИИ ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА И ДЕГРАДАЦИИ ОЛЕДЕНЕНИЯ НА ЛЕДНИКОВЫЙ СТОК РЕК СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

Лурье П.М.

ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС»

Потепление климата на Северном Кавказе заметно началось в семидесятых годах XX ст. Температура воздуха за 1971-2020 гг. повысилась в среднем на 0,72°C. Годовая сумма атмосферных осадков увеличилась за этот же период в среднем на 95 мм, или на 7,2%. Потепление климата привело к деградации оледенения. Его размеры в последние два десятилетия в среднем уменьшились более, чем на 20%.

На Северном Кавказе хорошо развита речная сеть. Реки берут начало высоко в горах и основным их питанием в верховьях являются ледники. Данные последних лет подтверждают, что доля ледникового питания в годовом стоке в устьях рек составляет 5-15%. В тёплый период, когда наблюдается интенсивное таяние ледников, доля ледникового стока увеличивается и в бассейнах малых рек в непосредственной близости от ледников достигает 50-70%.

Важной особенностью ледникового питания рек является увеличение его долевого участия в стоке маловодных лет и уменьшение в многоводные годы. В особо маловодные годы, когда ледники являются единственным источником питания рек, доля ледникового питания 2-4 раза превышает долю ледникового стока в многоводные годы.

Сокращение ледникового стока от одного десятилетия к другому происходит неравномерно. По мере деградации оледенения оно колеблется, но с общей тенденцией к уменьшению. Это объясняется как уменьшением темпа деградации оледенения, так и тем, что по мере сокращения площади оледенения объём таяния льда становится меньше несмотря на повышение температуры воздуха.

В ближайшие десятилетия по существующим климатическим сценариям ожидается дальнейшее потепление климата и, следовательно, уменьшение размеров оледенения, что повлечёт за собой сокращение ледникового стока и, как следствие, повлияет на водообеспеченность территории.

Список литературы

1. Лурье П. М., Панов В. Д. Влияние изменения климата на современное оледенение и сток рек северного склона Большого Кавказа//Устойчивое развитие горных территорий. - 2013. - № 2 (16). - С. 70-77.
2. Панов В. Д. Эволюция современного оледенения Кавказа. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. - 431 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛЬБЕДО ГОРНОГО ЛЕДНИКА ВНУТРЕННЕГО ТЯНЬ-ШАНЬ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Швец П.А., Симакина Т.Е.

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Всего на территории Кыргызской Республики насчитывается 9 959 ледников общей площадью 6 683,9 км², размеры доминирующей части более 0,1 км². На горных хребтах Тянь-Шаня распространены ледники практически всех известных типов. Оледенение Внутреннего Тянь-Шаня отличается широкое распространение ледников плоских вершин, которые занимают остатки высоко поднятых денудационных поверхностей. Всего во Внутреннем Тянь-Шане 3732 ледника, их общая площадь 3481,8 км².

Одним из факторов, влияющих на регулирование температуры на глобальном уровне, является альbedo подстилающей поверхности. По наблюдениям за период 1990–2015 гг. на метеорологической станции Тянь-Шань (3610 м над ур. моря) проанализированы происходящие климатические изменения в районе высокогорного массива Тянь-Шань. Определены характеристики линейного тренда температуры воздуха, построено уравнение регрессии для зависимости температуры воздуха и альbedo ледника, предсказано уменьшение альbedo в ближайшие годы, которое будет способствовать ускорению таяния ледника в горном массиве Тянь-Шань в Центральной Азии.

Ключевые слова: Альbedo, горные ледники, Тянь-Шань, температура, корреляция, прогноз.

В настоящее время происходит значительное изменение климата Земли. Согласно данным наблюдений, за период с 1976 по 2012 год средняя скорость потепления на поверхности Земли для всей планеты составляет 0,17°C за 10 лет, в то время как в России температура увеличивается со скоростью 0,43°C за 10 лет [1]. Одним из ключевых компонентов климатической системы является альbedo, которое представляет собой долю солнечной энергии, отраженной от поверхности Земли. Альbedo также характеризует долю солнечной энергии, поглощенной поверхностью и преобразованной в тепло. Изменения земной поверхности, такие как уменьшение площади снежного покрова и увеличение сельскохозяйственных угодий, влияют на количество поглощаемого тепла, что, в свою очередь, влияет на климат. Величина альbedo зависит от множества факторов, включая зенитный угол солнца, облачность и характер подстилающей поверхности [2]. Теоретически значения альbedo могут изменяться от нуля для абсолютно черной поверхности до единицы. При положительных температурах происходит таяние снега и льда, что приводит к уменьшению альbedo. Большие величины альbedo способствуют увеличению суммарной радиации [3].

Задача данной работы – оценка и нахождение связи между температурой воздуха и альбедо в районе центрального горного массива Тянь-Шань, используя спутниковые данные и данные ГМС Тянь-Шань.

Объектом исследования стал горный массив Тянь-Шань в Центральной Азии (обозначен 1 на рис.1).



Рисунок 1. Спутниковый снимок исследуемого района [4]

Данные альбедо были взяты из публикации [5] и помещены в табл. 1. Авторами работы [5] выполнены оценки альбедо в летние периоды 1991–2016 гг. на основе космических снимков TM/Landsat-5, ETM+/Landsat-7, OLI/Landsat-8. Снимки удовлетворяли следующим условиям: съемка в теплое время года, хорошая погода в момент проведения съемки (минимальная облачность или ее отсутствие), минимальное покрытие ледников свежес выпавшим снегом. В рассматриваемый период наблюдалось максимальное количество снежного покрова в горном массиве. Значения альбедо сопоставлены среднесуточным значениям температуры воздуха, измеренным в те же даты на ближайшей метеостанции ГМС Тянь-Шань (обозначена 2 на рис.1), расположенной на 41,9° с. ш. и 78,2° в. д. Значения температуры взяты с сайта Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA) [6] и помещены в табл. 1.

Таблица 1

Часть анализируемых данных альбедо и температуры

Номер	ID снимка	Дата съемки		Среднее альбедо ⁵	δ*	Температура, °С
1	LT51480311991263	20.09.1991		0.60	9.4	0.0
...						
16	LT51480312009136	16.05.2009		0.61	82.5	-1.67
...						
24	LC81480312015169	18.06.2015		0.61	0.01	5.00
...						
27	LC81480312016172	20.06.2016		0.57	0.09	5.00

По значениям альбедо и температуры построена диаграмма рассеяния и найдено уравнение регрессии – рисунок. 2.

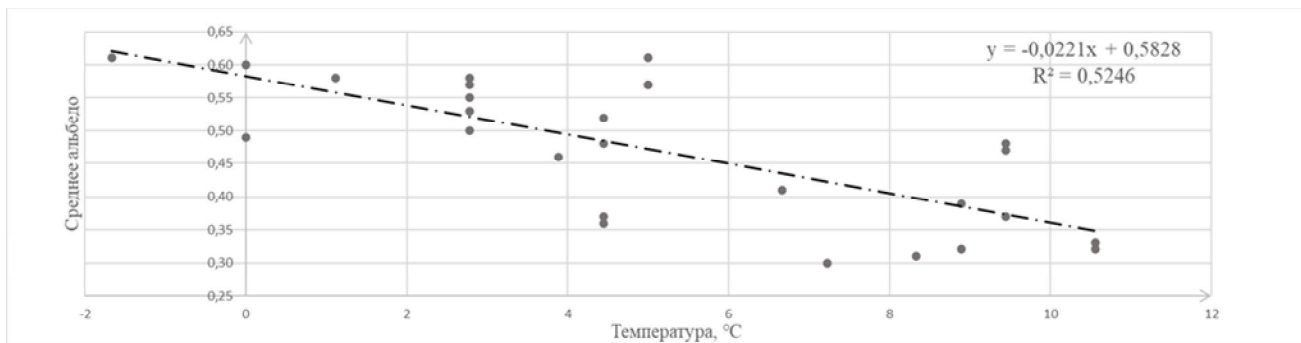


Рисунок 2. Зависимость температуры воздуха и значений среднего альbedo.

Анализ данных показал тесную связь температуры воздуха и способности поверхности ледника отражать солнечное излучение (коэффициент корреляции $R = -0.72$, стандартная ошибка $\sigma = 0.07$). Во время нагревания воздуха температура поверхности снежного покрова также повышается, что приводит к его таянию. С таянием снега уменьшается его альbedo, поскольку вместо отражения солнечного света от снежной поверхности, энергия солнечного излучения поглощается снегом и приводит к его дополнительному нагреву. Чем холоднее воздух, тем больше снежного и ледяного покрова, и значение альbedo также больше. Действительно, максимальное значение альbedo ледника Тянь-Шань (0.61, 0.61 и 0.60) было в двух случаях из трех при минимальной температуре (-1.67, 5.00 и 0.00 соответственно). При повышении температуры на градус Цельсия значение альbedo понижается на 0,022 единицы. Таким образом, нагрев воздуха и уменьшение альbedo взаимосвязаны и могут усиливать друг друга.

Полученное уравнение регрессии позволяет дать прогноз изменения альbedo ледника Центрального Тянь-Шань в ближайшие годы.

По значениям среднесуточной температуры за период с 1990 по 2024 гг. найден временной тренд: $y = 0,0002x - 13,064$ – рисунок 3. При установлении и сохранении данного тренда на потепление, через 10 лет средняя температура вырастет на $0,73^{\circ}\text{C}$. Это, в свою очередь, приведет к таянию снега и уменьшению альbedo снежного покрова в данном горном массиве на 1,5%.

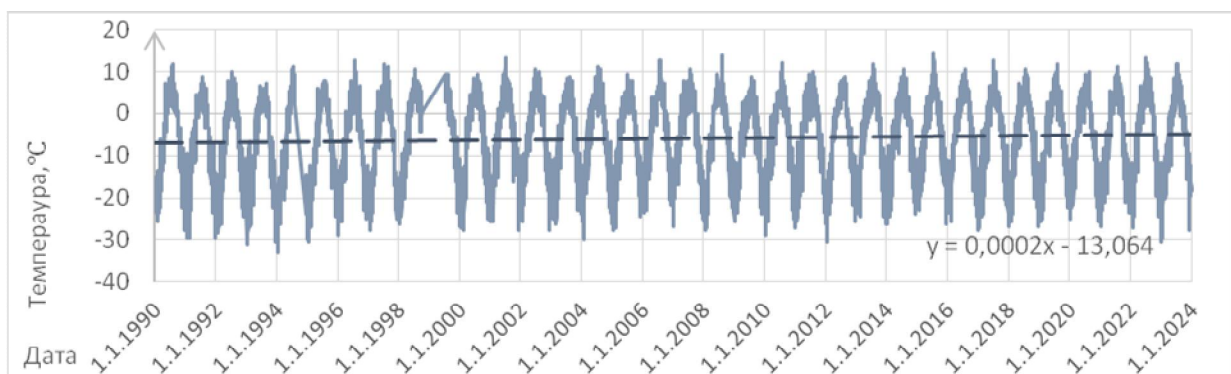


Рисунок 3. Температурный ход за период 1990-2024

Как было сказано ранее, в горном массиве Тянь-Шань распространены ледники практически всех известных типов, в данной работе рассматривались ледники морфологических типов: висячий ледник, простой долинный ледник, висячий долинный ледник. Данные лед-

ники характеризуются залеганием в слабо выраженных впадинах на крутых склонах гор, также расположением в долине [7].

Температура воздуха и альbedo имеют сильную взаимосвязь между собой, при увеличении температуры альbedo будет уменьшаться, что в свою очередь, приведет к уменьшению снежного и ледового покрова. Уравнение регрессии репрезентативно рассматривать только в пределах данных типов ледников.

Список литературы

1. Гидрометцентр России: [электронный ресурс]. URL: <https://meteoinfo.ru/news/1-2009-10-01-09-03-06/10150-24112014/>
2. Дроздов О.А., Васильев В.А., Кобышева Н.В., Раевский А.Н., Смекалова Л.К., Школьный Е.П. Климатология, Гидрометиздат, 1989.– 568 с.
3. Гаврилова М.К. Радиационный климат Арктики. Л., 1963.– 224 с.
4. База спутниковых снимков: [Электронный ресурс]. URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>
5. Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Шпунтова А.М., Коваленко Н.В., Усубалиев Р.А., Азисов Э.А., Михайлюкова П.Г. Оценка альbedo ледников массива Ак-Шийрак (Тянь-Шань) по наземным данным и снимкам со спутников landsat//Криосфера Земли, 2019. - Т. XXIII. - № 3. - С. 13–24.
6. Сайт Национального управления океанических и атмосферных исследований: [электронный ресурс]. URL: <https://www.noaa.gov/weather>
7. Шабунин А.Г. Каталог ледников – Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли, Бишкек, 2018.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ЛЕДНИКОВ ЭЛЬБРУСА В XXI ВЕКЕ

Постникова Т.Н.¹, Рыбак О.О.^{1,2,3}, Губанов А.С.⁴, Зеколлари Х.³, Хусс М.^{5,6,7}

¹Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия

²Институт природно-технических систем, Севастополь, Россия

³Earth System Science and Department of Geography, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium

⁴Географический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

⁵Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zürich, Zürich, Switzerland

⁶Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL), Birmensdorf, Switzerland

⁷Department of Geosciences, University of Fribourg, Fribourg, Switzerland

tasinidze@gmail.com

Эльбрус – высочайшая вершина Европы (5642 м), ныне спящий вулкан, покрытый тридцатью ледниками. При самых теплых сценариях изменения климата, почти все оставшиеся на Северном Кавказе ледники будут сконцентрированы на Эльбрусе (Postnikova et al., 2023). Нами рассмотрены вероятные изменения ледников Эльбруса в соответствии с климатическими сценариями из проекта CMIP6 (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) в XXI веке. Ожидаемое отступление фронтов ледников приведет к формированию проглящи-

альных озёр в локальных депрессиях ложа, которые были идентифицированы ранее (Лаврентьев и др., 2020). Нами было определено наиболее вероятное время их образования и уточнены их характеристики. Кроме того, было спрогнозировано время и место образования областей погребенного под мореной мертвого льда, которые в определенных обстоятельствах будут подпруживать озёра, увеличивая, тем самым, вероятность их прорыва. Для проведения данного исследования была использована глобальная гляциологическая модель GloGEMflow (Zekollari et al., 2019) со встроенным в нее блоком эволюции моренного покрова. В ней процессы энергообмена и динамики ледников описываются в упрощенной форме. Это является причиной неизбежной неопределенности в прогностических расчетах характеристик оледенения. Однако с ростом заблаговременности прогнозов всё возрастающую роль начинает играть разброс в исходных климатических сценариях. Эти вопросы также обсуждаются в настоящем исследовании.

Согласно прогностическим расчетам, к 2100 году ледники на Эльбрусе отступят выше 4000 м н.у.м., и на их месте на Эльбрусе вероятно будет образовано до 17 новых озер. При умеренном потеплении (сценарии SSP1-1.9, SSP1-2.6) возможна стабилизация положения фронтов ледников на высоте 3600-3700 м. При этом на Эльбрусе будет сформировано до 8 озер. Самое большое озеро на месте ледового плато Джикиуганкёз, возможно, будет подпружено мореной с погребенной под ней областью мертвого льда толщиной до 60 м предположительно в 2040 \pm 10 годах, и вероятно будет представлять значительную селевую опасность ниже по течению р. Малка.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта 23-27-00050.

Список литературы

1. Лаврентьев И.И., Петраков Д.А., Кутузов С.С., Коваленко Н.В., Смирнов А.М. Оценка потенциала развития ледниковых озёр на Центральном Кавказе // Лёд и Снег. – 2020. – Т. 60, № 3. – С. 343–360. DOI: 10.31857/S2076673420030044
2. Postnikova T., Rybak O., Gubanov A., Zekollari H., Huss M., Shahgedanova M. Debris cover effect on the evolution of Northern Caucasus glaciation in the 21st century // Frontiers in Earth Science. – 2023.
3. Zekollari H., Huss M., Farinotti D. Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble // The Cryosphere. – 2019. – Vol. 13. – P. 1125–1146.

ДИНАМИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ БАЛАНСА МАССЫ ЛЕДНИКА ГАРАБАШИ (ЭЛЬБРУС) В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА

Носенко Г.А., Смирнов А.М., Лаврентьев И.И., Кутузов С.С., Абрамов А.А.
ФГБУН «Институт географии РАН», г. Москва

Ледник Гарабаши, являясь частью ледникового массива Эльбруса, расположен на обширном открытом склоне южной экспозиции. Наблюдения за балансом массы ледника были начаты гляциологами Института географии РАН в 1983 г. и непрерывный ряд измерений

продолжается до сих пор. Все составляющие баланса массы определяются прямыми измерениями. На основе ряда ежегодных наблюдений за балансом массы и состоянием ледника Гарабаши выделены два периода: 1983–1997 гг. и с 1998 г. - по настоящее время. Первый период завершился для ледника небольшим, но положительным балансом массы (+0,54 м в. э. – за весь период). Вторым – 1998-2023 гг. - отличался повышением летних температур воздуха, незначительным увеличением зимних осадков и сопровождался катастрофическим таянием в 2010-2024 гг. За этот период кумулятивный баланс массы составил -17,8 м в. э.

В последние 5 лет из-за интенсивного таяния льда и возрастающей активности рекреационного освоения ледника сеть стационарных вех сокращается, а оставшиеся находятся под угрозой исчезновения. Поэтому был начат поиск альтернативных методов измерений баланса массы и возможностей их реализации для ледника Гарабаши. Для этого привлекалась радиолокация, геодезическое оборудование и данные дистанционного зондирования с БПЛА и из космоса. Была восстановлена и расширена сеть стационарных вех, а также возобновлены снегомерные работы по всей площади ледника. В настоящий момент количество стационарных абляционных реек, по которым измеряется изменение высоты поверхности ледника увеличено до 17-ти. Снегомерные работы включают измерения толщины снега в 205 точках, равномерно распределенных по 100-метровой сетке по поверхности ледника. Такой подход обеспечивает максимально равномерное распределение точек измерений для последующей интерполяции и построения полей компонентов баланса массы.

За последние пять лет минимальные толщины снега (0–5 см) зафиксированы в верхней части ледника, выше 4400 метров в зоне ветрового сноса. Максимальные величины (370–380 см) - в верхней части языка в зоне наметания под ледопадом. Плотности снега, измеряемые в шурфах или с помощью кернового бурения в разных частях ледника в интервале высот 3700–4000 метров находятся в диапазоне 0,45- 0,55 г/см³.

Изменение высоты границы питания является одним из показателей состояния баланса массы ледника. За период наблюдений с 1983 г. по 2023 г. она поднялась с 3800 м до 4100 м, что свидетельствует об ухудшении условий питания ледника. Показатель AAR, оцененный по рассчитанному после интерполяции данных полю баланса массы, составил всего 6.5% при площади с положительным балансом массы 0.2312 км², преимущественно в верхней части ледника выше 4100 метров.

Изменения баланса массы сопровождаются изменениями размеров ледника. Если во время первого периода наблюдений высота поверхности ледника оставалась практически неизменной, то за второй период она уменьшилась в среднем на 21 м. Площадь ледника в начале 80-х годов XX-го столетия была 4,47 км². К сентябрю 2023 г. она сократилась до 3,63 км² (на 19%). Если на рубеже столетий сокращение площади шло в основном за счет языка ледника, то в последнее десятилетие, в результате интенсивного таяния, стали увеличиваться свободные ото льда площади и на более высоких уровнях от 3500 до 4100 метров.

Данные о наблюдениях за балансом массы регулярно передаются во Всемирную службу мониторинга ледников (WGMS) и находятся там в открытом доступе.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЛЯЦИАЛЬНЫХ СЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЁТКИХ МНОЖЕСТВ

Зимин М.И.¹, Кумукова О.А.², Зимина С.А.¹

¹2554620 Ontario Ltd., Toronto, Canada

²ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Гляциальные сели – это нередкое и очень опасное природное явление. Катастрофические сели наблюдались, например, в расположенном в Приэльбрусье (Северный Кавказ) Тырныаузском селеопасном районе в 2000 году и привели к человеческим жертвам [1]. Весьма опасны даже небольшие сели. Поэтому совершенствование методов прогноза этих склоновых процессов представляет определённый интерес.

По результатам математического моделирования с помощью нечётких множеств строились прогностические зависимости, показывающие возможность схода селя расчётного объёма в зависимости от наличия прогностических факторов. При этом требовалось, чтобы вероятность схода не предсказанного селя не превышала 0,000001. Учитывается взаимовлияние прогностических факторов при расчёте степени принадлежности ситуации к селеопасной.

Принимаются во внимание осадки, температура воздуха, объём рыхлого материала и погребённого льда в селевом очаге, сейсмическая нагрузка, биологические предвестники. На последующие сутки выдаётся один из следующих прогнозов:

Сход селей не ожидается;

Возможен сход селей малого объёма (до 10 тыс. м³);

Ожидается сход селей среднего объёма (10 – 100 тыс. м³);

Ожидается сход крупного селя (100 тыс. – 1 млн. м³);

Ожидается сход очень крупного селя (1 – 10 млн. м³);

Ожидается сход гигантского селя (> 10 млн. м³).

Анализ известных ситуаций показывает, что на основе подобного подхода в принципе можно построить единый алгоритм прогнозирования селей для любых очагов. Это позволяет организовать предсказание данного явления в зонах с очень большим разнообразием напряженных и деформированных состояний в разных потенциально опасных местах. Возможен как локальный, так и фоновый прогнозы, если организована достаточно широкая сеть для сбора информации.

Список литературы

1. Сейнова, И. Б. Ледники и сели Приэльбрусья / И. Б. Сейнова, Е. А. Золотарёв. – М.: Научный мир, 2001. – 204 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЛАНСА МАССЫ ЛЕДНИКОВ ЭЛЬБРУСА С 1984 ПО 2022 г. С ПОМОЩЬЮ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Елагина Н.Э.¹, Рец Е. П.², И. А. Корнева¹, Лаврентьев И.И.¹

¹ФГБУН «Институт географии РАН», г. Москва

²ФГБУН «Институт водных проблем РАН», г. Москва

Гора Эльбрус - самая высокая на Кавказе (5642 м н. у. м.) с общим ледниковым покровом $\sim 109 \text{ км}^2$ в 2017 г., или $\sim 10\%$ от общего ледникового покрова Кавказа и Ближневосточного региона.

С ледниками Эльбруса связано развитие рекреации. Сток рек, берущих начало на ледниках Эльбруса, используется для орошения сельскохозяйственных земель на недостаточно увлажненных равнинах Предкавказья.

В работе проводится реконструкция баланса массы, его компонентов и ледникового стока Эльбруса с 1984 по 2022 год с помощью физико-математической модели с распределенными параметрами A-Melt, разработанной Е. П. Рец. Модель основывается на уравнениях теплового баланса, и в данной работе используется в сочетании с предыдущими оценками геодезическим методом, а также с орографической моделью осадков. Реконструкция баланса массы и ледникового стока показывает, что темп уменьшения баланса массы ледников составил $-0,55 \text{ м в. э. в год}$ с 1997 по 2022 год и $-0,04 \text{ м в. э. в год}$ с 1984 по 1997 год. С 1984 года наиболее значительные потери массы составили $-0,77 \text{ м в. э. в год}$ для южного склона Эльбруса. Большие потери массы демонстрируют малые ледники, такие как Бассейн 312, Ирикчат и Бассейн 310, с величиной потери массы более $-1,0 \text{ м в. э. в год}$. В течение всего моделируемого периода только два ледника (Бассейны 313 и 317) всегда находились в состоянии положительного баланса массы более $0,7 \text{ м в. э. в год}$. Кумулятивный баланс массы ледников Эльбруса с 1984 года составил $-14,88 \text{ м в. э.}$

Впервые был оценен вклад ледникового стока Эльбруса в сток рек различных бассейнов. Результаты этого исследования дополняют предыдущие выводы о прохождении «пика водности» для ледников Северного Кавказа тем, что все рассчитанные величины стока ледников Эльбруса имеют тенденцию к увеличению, в отличие от стока малых горно-долинных ледников.

Также впервые были получены данные о распределении снежного покрова, имеющего сложные пространственные паттерны, где максимальное накопление снега в основном перемещается в нижние высотные зоны ледников из верхних зон.

Усиление таяния ледников Эльбруса по всей видимости связано с увеличением средних летних температур, особенно выраженным начиная с 1997 года, сопровождающегося почти стабильным уровнем осадков, в то время как увеличение коротковолнового излучения также способствовало ускорению отступления ледников.

Подход к моделированию баланса массы был разработан в рамках темы № FMWZ-2022-0001 Государственного задания ИВП РАН и гранта РНФ «Развитие параметризации горного оледенения для моделей земной системы» № 23-17-00247

МАЛЫЕ ФОРМЫ ОЛЕДЕНЕНИЯ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТАЙМЫРА: НОВЫЕ ОЦЕНКИ

Ананичева М.Д., Корнева И.А.

ФГБУН «Институт географии РАН», г. Москва

ananicheva@igras.ru, maranan@gmail.com, comissa@mail.ru

В работе представлены новые оценки оледенения Таймыра: ледники гор Бырранга – самые северные континентальные горные ледники, представленные в основном малыми формами оледенения. Они до конца 20-го века находились в относительно стабильном состоянии, но уже к 2003 г их площадь уменьшилась на 17% (снимки Landsat) по сравнению с Каталогом ледников СССР (1967), а к 2022 г. (Sentinel-2) площадь сократилась на 35-46% (снимки CORONA, 1966) для разных бассейнов, которые были определены для всех групп ледников. Использование ArcticDEM позволило уточнить границы ледоразделов переметных ледников в центре оледенения. Если сравнивать результаты 2022 г. с Каталогом 1967 г., то сокращение более интенсивное – от 48,8% до 56%. Соответственно, проверка по снимкам Corona 1966 г., показала расхождение с Каталогом от 3 до 20% для разных бассейнов. Выполнены оценки климатических изменений, на фоне которых сокращаются ледники Бырранга. На Таймыре произошло самое интенсивное потепление на территории России – за период 1966-2021 гг. среднегодовая температура воздуха возросла на 4-5°C, однако в летний период скорость потепления в 2 раза ниже, чем в среднем за год. Это означает, что помимо повышения температуры воздуха, ускоренному таянию ледников способствовали иные факторы. Так, по данным реанализа ERA5 обнаружено существенное повышение радиационного баланса (до 10 Вт/м²/10 лет, что за период 1966-2021 гг. составило 23% от среднего регионального значения), которое вероятно произошло за счет снижения альбедо поверхности.

Секция 3

Опасные процессы и явления, связанные с деградацией горных ледников в условиях современного изменения климата

ПЕРИГЛЯЦИАЛЬНАЯ ЗОНА КАК ОБЪЕКТ КОМПЛЕКСНЫХ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Гуля А.Н.

ФГБУН «Институт географии РАН», г. Москва, Центр горных исследований

Перигляциальная зона в горах состоит из природных комплексов, примыкающих к снежно-ледниковым ареалам и испытывающих влияние ледников и снежников на весь комплекс природных условий: рельеф, растительность, почвы, водно-климатический режим, проявление стихийно-разрушительных, криогенных и других процессов. Вследствие этого в перигляциальной зоне формируются особые природные комплексы и ландшафтная структура, оказывающие существенное влияние на хозяйственное освоение. Современные быстрые изменения климата в горах привели к резкой трансформации перигляциальной зоны, изменению динамики процессов в ней. Перигляциальная зона стала объектом комплексных геоэкологических исследований как пространство, требующее особых мероприятий по освоению и адаптации к изменению климата. Эти исследования так или иначе включают несколько блоков вопросов: 1) методологические вопросы выделения и моделирования перигляциальной зоны как сложной социально-экологической системы, 2) организацию специальных исследований для получения данных об изменениях в перигляциальной зоне, 3) моделирование связей между процессами и компонентами, лежащих в основе трансформации перигляциальных ландшафтов, 4) выявление проблем освоения и обоснование стратегий адаптации к ним.

Надежными источниками данных о трансформации перигляциальных ландшафтов стали данные дистанционного зондирования (в частности, тематические продукты, созданные на основе последовательно обработанных данных Landsat Analysis Ready Data), стационарные и полустационарные измерения и наблюдения непосредственно в перигляциальной зоне, а также полевые обследования (картографирование, отбор проб и др.).

Использование комплекса этих данных в изучении динамики перигляциальной зоны Северного Кавказа позволили выявить несколько закономерностей: 1) уменьшение площади нивально-гляциальных ландшафтов, 2) продвижение высокогорных лугов на место нивально-гляциальных ландшафтов, 3) повышение верхней границы леса (в основном на относительно выположенных склонах южной экспозиции), 4) уплотнение лесных массивов во всей горно-лесной зоне, в том числе и на нижних этажах за счет снижения интенсивности хозяйственной деятельности. При этом наблюдаются большие различия в проявлении указанных трендов на разных участках и регионах Северного Кавказа, в одних ареалах перигляциальная зона испытывают существенные изменения, в других - остается относительно стабильной. Это заметно как по границам перигляциальных ландшафтов, так и по трансформации природных компонентов внутри самих ландшафтов (в первую очередь, почв и растительности), а также по нарушению сезонной ритмики и усилению межгодовых контрастов в тепло- и

влагообеспеченности. Все это приводит к неустойчивости ведения различных типов природопользования, в первую очередь, отгонно-пастбищного животноводства и туризма, повышению рисков проявления мощных стихийно-разрушительных процессов.

Требуется ряд научно-обоснованных мероприятий по оптимизации природопользования и адаптации к изменениям в перигляциальной зоне. Трансформация перигляциальной зоны требует нового зонирования с обоснованием выделения границ «красных» зон (запрет хозяйственной деятельности), ужесточением контроля за хозяйственной деятельностью в «желтых» зонах, встраиванием в ландшафтную структуру, природные режимы и ритмы. Необходимо переосмысление стратегии хозяйственного освоения высокогорья с выработкой предложений по изменению в формах и методах высокогорного природопользования, изучение и применение традиционного опыта и местных практик, повышение густоты сети наблюдений. Междисциплинарный коллектив ученых должен сосредоточиться над разработкой концепций стрессоустойчивого развития перигляциальной зоны, опирающейся на долговременное планирование и превентивные меры, основанные на долгосрочных прогнозах.

ПРИРОДНАЯ КАТАСТРОФА АКСАУТСКОГО ЛЕДНИКА 2022 ГОДА

Онищенко В.В., Тохчуков Ш.Ю.

ФГБОУ ВО «Карачаево-Черкесский государственный университет

имени У.Д. Алиева»,

Карачаево-Черкесское региональное отделение ВОО «Русское географическое общество», г. Карачаевск

Аксаутский ледник расположен на северо-восточном склоне верховий р. Аксаут, Карачаево-Черкесской республики. Верхняя узловая граница ледника, на высоте 3446 м, не имеет скального обрамления, которое расположено значительно ниже. Крутой язык ледника оканчивается на высоте до 2100 м., в зоне субальпийского пояса. По морфологическим признакам это долинный ледник узкого глубокого ущелья северо-восточной экспозиции. Площадь ледника составляет около 1.5 км², максимальная протяженность – 3.4 км, по климатическим изменениям и характеру отступления [2]. Верхняя область питания расположена в цирке ледника. Пологое поле ледника, шириной до километра, на крутом языке сужается до 250 – 300 м [1].

В январе 2022 года верховья троговой долины Аксаут подверглись разрушительному воздействию стремительного потока ледниково-каменной лавины. Экспедицией Карачаево-Черкесского отделения РГО (в КЧГУ), с участием проф. Ю.В. Ефремова (сентябрь 2023 г), произведено обследование характерных признаков возникновения и катастрофических природных последствий, изменивших геоморфологическую структуру рельефа верховий долины, протяженностью до 4500 м.

Срыв ледниковой лавины зарегистрирован в наиболее холодный зимний период, когда на поверхности трансформирующегося в узком ложе ледника и верховьях долины накапливается много снега [4]. На высоко расположенной ступени «бараньих лбов», под вершиной Марух-Кая (3799 м), находится большой висячий каровый ледник, который в результате срыва ледопада с «бараньих лбов», в недавнем прошлом отделился от основной части ледника. В последнем десятилетии, в нижней части висячего ледника периодически отмечался

срыв ледяных глыб. Есть основания предположить, что в этом месте произошел ледяной обвал, вызвавший ледово-каменный поток, следы которого отмечены моренными отложениями на поверхности ледника, не фиксируемые до катастрофического события.

В данном процессе отмечается случай, когда продвинувшаяся часть ледника на крутых участках разрушается, образуя гигантский снежно-ледово-глыбовый обвал. На огромной скорости он устремляется вниз, сметая потоком рыхлые скальные обнажения, обрамляющие ледник и выступающие на его поверхности. Такие процессы, как отмечали В.М. Котляков (1977) и А.Б. Бажев (1987), не редки на Северном Кавказе и активность их проявлений значительно увеличивается в настоящее время [3].

Надвинувшиеся массы перемещенного материала ледниково-каменной лавины заполнили верховья боковой долины Аксаут, протяженностью до 4.5 км. Образовавшаяся плотина (по свидетельству государственного инспектора лесной охраны И.И. Кипкеева), предварительно уничтожив растительность и почвенный покров, застыла на расстоянии до 1 км от заброшенного горняцкого поселка. Мощность нагромождения достигала 40–50 м. Ширина перемещенной массы по дну долины составила 500–1000 м. В периметре плотины образовались 3 озера, одно из которых первоначально имело площадь 2,13 га (Докукин и др., 2022).



Фото 1. Панорама ПТК после схода ледниково-каменной лавины в верховье Аксаутской долины.

Высокая гигроскопичность перемещенного лавинного материала в холодный период года не причинили дальнейших разрушений. Не наблюдалось также повышения сброса воды в ближайших населенных пунктах. Почвенно-грунтовые и каменные нагромождения стабилизировались на дне верховий долины Аксаут. В значительной степени трансформировалась экологическая ситуация на площади около 320 га в стесненных условиях высокогорий. Преобразовалась структура и функциональность ландшафтов на локальном уровне, существенно нарушились биогеографические закономерности, требующие системного мониторинга ориентированного на адаптацию научно-технологического природопользования.

Список литературы

1. Ефремов Ю. В., Ильичев Ю. Г., Панов В. Д. Ледяное ожерелье Кубани / Ю. В. Ефремов, Ю. Г. Ильичев, В. Д. Панов. - Краснодар: Традиция, 2012. - 230 с
2. Онищенко В.В., Дега Н.С. Экосистемный мониторинг горных районов Карачаево-Черкесии в условиях техногенного прессинга и изменения климата // Безопасность в техносфере. Изд – во «Русский журнал» Вып. 6, М.: 2009 – С.14 – 18.
3. Онищенко В.В., Дега Н.С., Тохчуков Ш.Ю. Геоэкологические особенности трансформации современного оледенения Карачаево-Черкесии // Известия Дагестанского государ-

О ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ТЕМПОВ ДЕГРАДАЦИИ ЛЕДНИКОВ МЕТОДАМИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОСАДКОВ

Имамджанов Х.А.¹, Кадыров Б.Ш.¹, Умурзаков Г.У.², Филиппов С.Г.¹

¹Научно исследовательский гидрометеорологический институт, г. Ташкент, Узбекистан

²Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, г. Ташкент, Узбекистан

В Узбекистане, как и повсюду в мире, повышение температур вследствие изменения глобального климата и уменьшение атмосферных осадков может привести к сокращению водоснабжения и увеличению спроса на воду. Спрос на воду стремительно возрастает. В настоящее время 70–80% пресной воды требуется на орошение, 20% необходимо для удовлетворения промышленных нужд, около 6% - на бытовые нужды.

Основная часть ледников Узбекистана находится в бассейне реки Пскем, находящейся в Ташкентской области. Всего в бассейне р. Пскем на 1957г. было выделено 250 ледников, среди которых 214 имеют размеры больше 0,1 км² [1]. Наиболее крупные узлы оледенения располагаются в верховьях рек, составляющих р. Пскем. Основное количество ледников имеет С, СЗ, СВ и В экспозиции. В целом, в бассейне р. Пскем 82,4% площади оледенения сосредоточено в высотной зоне 3400-4000 м, а максимальная площадь оледенения приходится на зону 3600-3800 м (36,4%). В зоне выше 4000м сосредоточено всего лишь 2,2% площади оледенения, что объясняется незначительной высотой хребтов, обрамляющих бассейн. Деградация выразилась в том, что суммарная площадь ледников бассейна р. Пскем (основной объект исследования) за период 1957-2007г.г. сократилась на 29% от общей площади оледенения 1957 года [2].

Но в последние годы деградация ледников ускорилась. Это видно на примере ледника Баркрак Средний (см.таблицу). В современных условиях задача замедления темпов деградации ледников может быть решена только методами активных воздействий.

Увеличение осадков в планируемом районе может быть достигнуто двумя методами. Первый это вызывание осадков из облаков, не дающих осадки, второй – это интенсификация естественных осадков. Площадь бассейна реки Пскем порядка 5100км². Учитывая то, что район приграничный, в качестве средств воздействия можно использовать наземные генераторы [3].

Таблица

Результаты измерения баланса массы ледника Баркрак Средний за период 2016 – 2023 гг.

Название ледника	Номер ледника в WGMS	Гидрологический год	Площадь, км ²	Годовой баланс массы, см	Погрешность, см
Баркрак Средний	818	2016-2017	2.39	-29.5	±0.5
	818	2017-2018	2.23	-22.5	±0.5
	818	2018-2019	2.20	-32.5	±0.5

	818	2019-2020	2.12	-28.1	±0.5
	818	2020-2021	1.86	-67.1	±0.5
	818	2021-2022	1.90	-57.1	±0.5
		2022-23	1.85	-81.1	±0.5

Что касается облачных ресурсов, то общее число пасмурных дней за год колеблется от 84 до 101, максимальное число пасмурных дней приходится на март месяц - 15 дней. Минимальное количество пасмурных дней наблюдается в октябре - от 5 до 7 дней.

Число дней с осадками совпадает с числом пасмурных дней. Так в декабре, в среднем, наблюдалось 16 дней с осадками в Ойгаинге при 12 днях в Пскеме, который находится ниже по долине реки Пскем. Самые высокие нормы осадков в марте и апреле. Так, для метеостанции Пскем в марте норма месячных осадков составляет 118мм, а в апреле 116мм. С другой стороны, на более высокогорной метеостанции Ойгаинг норма осадков в марте ниже и составляет 89мм, а в апреле 101мм. В целом в бассейне реки Пскем годовая норма осадков составляет от 857мм (Пскем) до 738мм (Ойгаинг).

Учитывая то, что высота хребтов Пскемской долины порядка 4100м, понятно, что облачные слои с граничными температурами -4°С и -12°С лежат ниже хребтов. Таким образом, в долине реки Пскем имеются облачные ресурсы для вызывания и интенсификации осадков.

Работа выполнялась в рамках гранта (№АЛМ-202107010) «Разработка системы мониторинга изменений баланса массы горных ледников и технологий, характеризующих их будущее состояние в условиях глобального изменения климата».

Список литературы

1. Балашова Е. Н., Житомирская О. М., Семенова О.Н. Климатическое описание республик Средней Азии. -Л.: Гидрометеиздат, 1960. - 240 с.
2. Тойчиев Х.А., Ни А.А., Тихановская А.А. и др. Горное оледенение, климат, сток. – Ташкент: НУУз.- 2008.- 83 с.
3. Облака и облачная атмосфера // Справочник. Под ред. Д-ра физ-мат.наук Мазина И.П. и д-ра геогр. наук Хргиана А.Х.

ТРАНСФОРМАЦИЯ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА В ВЫСОКОГОРНОЙ ЧАСТИ БАССЕЙНА Р. ТЕРЕК ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА И ДЕГРАДАЦИИ ОЛЕДЕНЕНИЯ

**Корнилова Е.Д.^{1,2}, Крыленко И.Н.^{1,2}, Мотовилов Ю.Г.², Рец Е.П.², Корнева И.А.³,
Постникова Т.Н.², Рыбак О.О.²**

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, г. Москва

²ФГБУН «Институт водных проблем РАН», 119333, г. Москва

³ФГБУН «Институт географии РАН», 119017, г. Москва

Глобальные изменения климата приведут к серьезным изменениям условий формирования стока в горных регионах. Особенно это скажется на оледенении и снежном покрове, что вызовет значительную трансформацию водного режима. В современных исследованиях в различных высокогорных бассейнах мира широко используются модели формирования сто-

ка. Однако, для Северного Кавказа комплексных оценок возможных изменений стока с учетом изменения оледенения на основе методов моделирования не проводилось.

В качестве ключевого бассейна для исследования был выбран бассейн р. Терек, площадь оледенения внутри которого составляет около 684 км². В ходе исследования для высокогорной части бассейна р. Терек была адаптирована модель формирования стока ECOMAG [Motovilov et al., 1999] на основе обширной гидрометеорологической информации, данных о почвах, ландшафтах, оледенении. Для учета региональных особенностей был подключен дополнительный блок модели, учитывающий оледенение. Достигнуто удовлетворительное совпадение модельных гидрографов стока с наблюдениями. Расчетные изменения площади оледенения, выполненные на глобальной гляциологической модели GloGEMflow-debris [Postnikova et al., 2023], и региональные климатические изменения, оценка которых была выполнена по данным проекта CORDEX [Корнева, Рыбак, 2020], были использованы в численных экспериментах с моделью ECOMAG.

Оценка вероятных изменений стока р. Терек в 21-м в. с учетом изменений климата и оледенения в бассейне показала, что изменение стока составит от -2 до +5 % в сценарии RCP2.6 и от -8 до +14% – в сценарии RCP8.5. Направленность изменений стока в конкретных подбассейнах будет существенно зависеть от высотного расположения зоны снегового и ледникового питания, определяющего интенсивность их деградации (табл. 1). Так, в сценарии RCP8.5 сток р. Чегем начнет значительно снижаться во второй половине 21-го века. При этом увеличение объемов стока рек Малки и Баксана, которые преимущественно питаются талыми водами ледников и снегов Эльбруса, будет продолжаться вплоть до конца столетия. Однако это увеличение, главным образом, будет определяться ростом доли снегового питания в результате увеличения количества осадков в зимний период. Модельные оценки подтверждают современные тенденции в изменениях внутригодового распределения стока – сдвиг начала половодья на более ранние сроки, уменьшение объемов стока в летний период и их увеличение в осенние месяцы.

Таблица 1

Реакция стока рек на изменение факторов его формирования при климатических сценариях RCP 2.6 и RCP 8.5*

	Высотное расположение зоны снегового и ледникового питания	Суммарная доля ледникового и снегового стока	
		Высокая (более 80%)	Низкая (менее 80%)
RCP2.6	2000<h<5642 м	T ↑ E ↑ ICE ↓ S ↑ P ↑ W ↓	T ↑ E ↑ ICE ↓ S ↑ P ↑ W ↑
		р. Баксан – гп Тырныауз	р. Малка – гп Каменноостокое
RCP8.5	3600<h<5642 м Эльбрус, высокогорные территории Большого Кавказского хребта	T ↑ E ↑ ICE ↓ Sn ↑ P ↑ W ↑	T ↑ E ↑ ICE ↓ Sn ↑ P ↑ W ↑
		р. Баксан – гп Тырныауз	р. Баксан – гп Заюково
RCP8.5	2000<h<3600 м	T ↑ E ↑ ICE ↓ Sn ↓ P ↑ W ↓	T ↑ E ↑ ICE ↓ Sn ↓ P ↑ W ↓
		р. Чегем – гп Нижний Чегем	р. Терек – гп Котляревская

*T – температура воздуха, ICE – ледниковый сток, E – испарение, Sn – снеговой сток, P – дождевой сток, W – объём стока.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института водных проблем РАН, темы FMWZ-2022-0001 (1.6 — адаптация модели ECOMAG, 1.12 – моделирование), темы № FMWZ-2022-0003 (3.1 – совершенствование модели), по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши раздел 1.10 (ЦИТИС 121051400038-1 – сбор фактических данных о бассейне р. Терек) и НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (ЦИТИС 121051200166-4 – анализ расчетных гидрографов).

Список литературы

1. Корнева И. А., Рыбак О. О. Проекция климата на Кавказе (результаты эксперимента CORDEX) // *Системы контроля окружающей среды*. 2020, 4: 5–12.
2. Motovilov Yu. et al. ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region // Department of Geophysics, University of Oslo. 1999. 88 p.
3. Postnikova T. et al. Debris cover effect on the evolution of Northern Caucasus glaciers in the 21st century. *Frontiers in Earth Science*. 2023, 11(1): 1-22.

РАЗВИТИЕ ЛЕДНИКОВЫХ ОЗЕР НА ПРИМЕРЕ ДОЛИНЫ Р. ШАЗУДДАРА (ЗАПАДНЫЙ ПАМИР) И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ ОПАСНОСТЕЙ

**Юдина В.А.¹, Черноморец С.С.¹, Крыленко И.В.¹, Висхаджиева К.С.¹, Савернюк Е.А.¹,
Виноградова Т.А.²**

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

²НПО Гидротехпроект, г. Валдай

Природные катастрофы, связанные с прорывами горных озер, нередкое явление для Памира и окружающих его горных систем. Так, на территории Западного Памира выдающийся прорывной паводок наблюдался в 2002 г. в долине р. Дашт (Горно-Бадахшанская автономная область, Таджикистан) [Mergili, Schneider, 2011]. В соседней с Памиром горной системе Гиндукуш (Афганистан) также неоднократно происходили прорывы ледниковых озер, приводившие к сходу селевых потоков, которые наносили ущерб расположенным ниже по долине населенным пунктам [Докукин, 2015, Докукин и др., 2020]. Отслеживание динамики развития ледниковых озер и оценка возможных опасностей является одной из важнейших задач для обеспечения безопасного развития горных регионов, где есть современное горное оледенение. К таким регионам относится, в том числе, Западный Памир. Здесь имеется ряд долин, в верховьях которых расположены прорывоопасные ледниковые озера: Пиш, Варшезкуль-нижнее, Патхур и др.

Основной целью представленной работы было не только оценить возможную опасность в случае прорыва ледниковых озер в долине р. Шазуддара, но и проследить динамику их развития с использованием ДДЗ. Моделирование каскада озер Шазуд проводилось исходя из предположения, что ледниковые озера могут прорываться не только при разрушении ледовой плотины, но и при выработке внутриледниковых каналов стока. Для этого была использована модель прорыва озера разработанная Ю.Б. Виноградовым и реализованная в программе FLOVI. К отличительным особенностям данной модели можно отнести сочетание физических законов, а также возможность использовать результаты экспедиционных иссле-

дований. В данном случае использовалась батиметрическая съемка озер для вычисления необходимых параметров и характеристик. Также было выполнено уточнение морфометрических коэффициентов озерных чаш и продемонстрировано как определение морфометрических коэффициентов влияет на значение максимального расхода и время его добега. Расчеты выполнялись для двух вариантов объемов озер. В первом использовались данные, полученные по батиметрической съемке в 2018 году. Во втором варианте моделирование проводилось с учетом увеличения площади озер, полученных по данным ДДЗ. Результаты работы будут представлены на конференции.

Список литературы

1. Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Л., Гидрометеиздат, 1977, 154 с.
2. Докукин М.Д., 2015. Выдающиеся прорывы озер в 2012–2013 гг. (по материалам ДЗЗ). Часть 2. Сборник научных трудов ОАО «Севкавгипроводхоз», Вып. 21, с. 41–58.
3. Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х. и др. Каменные глетчеры – очаги формирования катастрофических селей // Геориск, 2020, т. 14, № 2, с. 52–65
4. Юдина В.А., Юдин Н.Е., Виноградова Т.А. Программа для расчета прорывного паводка и селевого потока (FLOVI). Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022683748; приоритет от 24.10.2022; зарегистр. В Реестре программ для ЭВМ РФ 08.12.2022.
5. Mergili M., Schneider J.F. Regional-scale analysis of lake outburst hazards in the southwestern Pamir, Tajikistan, based on remote sensing and GIS // Natural Hazards and Earth System Sci., 2011, vol. XI, p. 1447–1462

ПРОРЫВЫ ОЗЁР ЭЛЬБРУСА (ОБЗОР)

Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик, inrush@bk.

В результате деградации, а также наступания ледников на участках подножия горы Эльбрус в разное время образовывались и затем прорывались озёра. В литературе есть описания последствий прорывов озёр у ледника Большой Азау в 1895 г. [7], у ледника Бирджалычиран в 1909 и 2006 гг. [2, 10], у ледника Малый Азау в 1978 г. [9] и 2011 г. [5], у ледника Гарабаши в 1912 и 1947 г. [9]. На основе анализа разновременных аэрофотоснимков и космоснимков собраны данные о формировании и прорывах озёр у ледников Бирджалычиран и Чунгурчатчиран за период 1957-2020 гг. [3, 6] (охарактеризована динамика 19 озёр), у ледника Малый Азау [5], у ледника Большой Азау [1] (охарактеризована динамика 15 небольших озёр, самое крупное из которых имело площадь 20,25 тыс. м²).

В результате проведённых исследований сделан вывод, что наибольшие негативные последствия были при прорывах озёр у ледника Бирджалычиран в 1909 г. [2] и 2006 г. [10] – разрушения объектов на участке минеральных источников «Джилы-Су». Многочисленные прорывы озёр у ледников Эльбруса имели различные механизмы: 1) перелив через ледяную грядку с её размывом (1993 г. – Южное Чунгурчат, 1999 г. – Аристова, 2003 г. – Среднее Бирджалы, 2006 г. – Восточное Бирджалы, 2011 г. – Малое Азау), 2) прорыв по подземному

каналу (Северное Чунгурчат в 1973 и 1983 г., Подкова в 2013 г., Балык Южное в 90-х годах 20 в), 3) прорыв по подлёдному каналу (Северное Бирджалы 1957–1974 гг., прогляциальные и супрагляциальные озёра на леднике Большой Азау в 2009 г. и в последующие годы), 4) выплеск воды из озера вследствие обрушения в него моренных масс (озеро Северное Чунгурчат в период 1980–1982 гг.). В будущем прогнозируется формирование крупных подледниковых озёр ледников Большой Азау и Чунгурчатчиран [8], которые могут разгружаться по подлёдным каналам.

В последние годы зафиксированы изменения в динамике отдельных озёр и их прорывы: 1) два раза появлялось озеро на леднике Кюкюртлю на высоте 3360 м на расстоянии более 2,5 км выше конца ледника длиной до 240 м, площадью до 7,3 тыс. м² – первый раз в период 27 августа – 01 сентября 2020 г., второй раз в период 17–22 августа 2022 г. на одном и том же месте и при этом явных следов прорывов озера не обнаружено; 2) в период 3–16 июля 2020 г. произошёл прорыв озера площадью 3,4 тыс. м² у ледника Терскол с размытием ледяной перемычки и прохождением наносоводного селя, материал которого отложился на площади около 13 тыс. м² на площадке на расстоянии 850 м ниже озера и затем селевой поток повторился в конце августа в результате изменения направления русла потока ниже озера на участке мёртвых льдов; 3) наблюдается рост озера Южное Бирджалы, которое появилось в 2019 г. в результате отступления ледника и к сентябрю 2023 г. при сохранении поверхностного стока воды в юго-восточном направлении с озера достигло площади 22,9 тыс. м² и ледяная перемычка стала минимальной, что предполагает прорыв озера в 2024 г., возможно с прохождением паводка. Выявленные в результате исследований закономерности прорывов озёр позволят в будущем оценивать динамику и прорывоопасность новых озёр.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (Соглашение № 24-27-20006).

Список литературы

1. Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Савернюк Е.А., Шагин С.И. Динамика озера ледника Большой Азау на Эльбрусе // Криосфера Земли. 2023. Т. 27. № 1. С. 45–57.
2. Герасимов А. О прорыве ледникового озера на NO склоне Эльбруса // Изв. Геологического комитета, 1909. Т. XXVIII. № 7. С. 156–160.
3. Докукин М.Д., Савернюк Е.А., Багов А.М., Маркина А.В. О перестройке гидрографической сети северо-восточного подножия Эльбруса // Лёд и снег. 2012. Т. 52. № 2. С. 23–30.
4. Докукин М.Д. Современная динамика (2011– 2013 гг.) озерно-ледникового комплекса северо-восточного подножия Эльбруса (результаты аэрокосмического мониторинга) // Развитие регионов в XXI веке. Материалы I Международной научной конференции. Владикавказ: Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова, 2013. С. 190–195.
5. Докукин М.Д., Хаткутов А.В. Озёра у ледника Малый Азау на Эльбрусе: динамика и прорывы // Лёд и снег. 2016. Т. 56. № 4. С. 472–479.
6. Докукин М.Д., Савернюк Е.А., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Хаткутов А.В. Эволюция озёр у ледника Джикиуганкез (Северное Приэльбрусье) в 1957–2020 гг. с учётом подземных каналов стока // Лёд и Снег. 2022; 62(1):47–62.

7. Иванов М.А. В ущелье р. Баксана // Известия Кавказского отдела Императорского русского географического общества. Тифлис: Типография К.П. Козловского, 1902. Т. XV, № 1. С. 7–20.

8. Ледники и климат Эльбруса. М.; СПб.: Нестор-История, 2020. 372 с.

9. Сейнова И.Б., Золотарёв Е.А. Ледники и сели Приэльбрусья. (Эволюция оледенения и селевой активности). М.: Научный мир, 2001. 204 с.

10. 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, 2006. Вып.102. С. 225–229.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ТАЛОЙ ВОДЫ ЛЕДНИКОВ АЛТАЯ

Павлова Я.В.¹, Сакович С.И.²

¹Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург

Оледенение – одно из интересных явлений природы. Изучение исследований в этой области показывают, что ледники не остаются неизменными. Понимание правил развития оледенения важно, как с практической, так и с научной точек зрения. Сегодня очень важны знания о текущих состояниях и процессах, влияющих на изменение характеристик ледников, особенно в условиях изменения климата.

Увеличение средних температур сегодня влияет на такие характеристики ледников как масса и интенсивность таяния. В процессе таяния элементы, накопившиеся в снеговом покрове, могут поступать в талые воды, а затем в реки и озера и далее. В связи с этим представляет интерес исследование снегового покрова ледников с целью определения степени влияния на экологию региона нахождения.

В последние годы на Алтае наблюдается постепенный рост среднегодовых температур. В связи с этим увеличивается абляция ледников. Снеговой покров хранит в себе информацию о месте образования. Считается, что снег на вершине гор мало подвержен влиянию человеческой деятельности. Тем не менее, это влияние нельзя отрицать. Например, в работе [1] приведены данные о наличии тяжелых металлов в ледниках Гималаев.

Основной задачей нашей работы является изучение гидрохимического состава снеготалой воды, полученной в результате забора проб в горах Алтая – верховья Катуня. Проведенные исследования продолжают серию работ по изучению загрязнений снежного покрова как в городах, так и предгорных и горных районах Алтая [2].

Достоверность элементного анализа зависит от правильности забора проб и подготовки ее к спектральному анализу. Пробы снега забирались в виде кернов. В каждой точке бралось до пяти образцов. В период хранения пробы окружающая ее температура поддерживалась в диапазоне от – 5°С до – 20°С.

Далее с помощью фильтрации снеготалую воду пропускали через бумажные фильтры. Полученный сухой остаток смешивался со спектрально чистым графитом и использовался для приготовления смеси для исследований. Исследование данной смеси предполагает определение и выявление соответствия спектральных линий в широком диапазоне длин волн [3].

Качественный анализ показал наличие таких элементов как Al, Mn, Co, Ni, Cu, Pb, Zn, Fe. Содержание металлов и загрязняющих элементов в снеготалой воде отображено в табл. 1.

Таблица 1

Содержание металлов в снеготалой воде

№ пробы	Содержание металлов и загрязняющих веществ, мкг/л						
	Mn	Ni	Co	Pb	Cu	Al	Zn
1	3,8	5,2	5,1	2,0	3,1	12,0	4,5
2	3,8	5,0	5,0	2,1	3,3	13,0	4,4
3	2,0	5,0	5,2	2,1	3,1	12,0	4,0
ПДК, мкг/л	10,0	10,0	10,0	6,0	1,0	40,0	10,0

По полученным измерениям можно сделать вывод, что почти все элементы находятся в пределах допустимой концентрации, кроме Cu (выделены шрифтом).

Ледники Алтая, как и другие ледники входят в состав глобального круговорота воды. Изучение снегового покрова ледников позволяет получить некоторые сведения как о гидрохимическом составе, так и сделать предположения о возможных источниках происхождения некоторых элементов. Повышенное содержание меди может быть обусловлено перемещением воздушных масс со стороны металлургических предприятий Казахстана. Также в связи с усилением таяния ледников происходит увеличение водного стока и расширение площади водосбора, в пределы которого могут попадаться участки с отложениями солей, неустойчивыми к воздействию воды.

Данная работа является продолжением работ по исследованию снежного покрова предгорных районов и будет продолжена в дальнейшем.

Список литературы

1. Т.М. Ойдуп, О.И. Кальная, С.А. Чупикова Исследование снегового покрова вершин горного обрамления Тувы // Природные ресурсы. Среда и общество. 2023. № 1 (17). С. 67 – 78.
2. Л.П. Рихванов, Ю.В. Робертус, А.В. Таловская и др. Особенности распределения химических элементов в талой воде ледника Большой Актру (Горный Алтай) // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 313 № 1. С. 97 – 103.
3. Т.В. Андрухова, В.И. Букатый, И.П. Чефранов Исследование загрязнения снежного покрова Барнаула // Известия Алтайского государственного университета. 2004. № 1 (31). С. 79 – 83.

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ВОДНОГО БАЛАНСА ЛЕДНИКОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ТАЯНИЯ

Ашабоков Б.А., Ташилова А.А., Кешева Л.А., Теунова Н.В.
ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Одним из наиболее характерных индикаторов изменения климата является таяние ледников: с начала 20 века исчезло более 20% европейских ледников [1]. Понимание того, что происходит с ледниками, нужно для того, чтобы спрогнозировать изменения водного баланса территорий. Это особенно актуально для регионов, в которых таяние ледников – источник пресной воды. В докладе МГЭИК отмечается, что с высокой степенью достоверности местные темпы потепления зависят от сезона. Например, было обнаружено, что в Европейских Альпах потепление более выражено летом и весной [2], также как на Кавказе [3], тогда как на Тибетском нагорье потепление сильнее зимой [4]. В связи с этим особый интерес представляет изучение современного изменения сезонного и регионального климата и его влияния на процессы, происходящие в криосфере, приводящие к таянию ледников в высокогорных районах Кавказа.

Криосистема высокогорья реагирует на изменение климата и прежде всего – на долговременный рост летней температуры приземного воздуха, которая увеличилась за последние 60 лет в горах Кавказа на 0,5-0,7°C. По данным м/станции Терскол (Кабардино-Балкария, 2144 м н.у.м.) в сезоны 1961-2023 гг. средние летние температуры Терскола имели положительный значимый тренд в отличие от зимнего, весеннего и осеннего сезонов. Скорость роста летних температур за период 1961-2023 гг. составила 0,33°C/10 лет ($D=33\%$), увеличиваясь с 1976 года до 0,44°C/10 лет ($D=48\%$). На фоне долговременного с 1961 года незначительного роста осадков (1,83мм/год мм/мес/10 лет, $D=4,8\%$), с начала 2000-х гг. имело место уменьшение зимних сумм осадков, продолжающееся в настоящий период.

При выделении подпериода 2001-2023 гг., отличающегося усиленным таянием ледников Кавказа, можно заметить, имело место увеличения роста зимних (1°C/10 лет, $D=12,4\%$) и весенних (0,6°C/10 лет, $D=12,3\%$) температур. Летние температуры продолжают расти на статистически значимом уровне (0,6°C/год, $D=25,3\%$).

С 1961 по 2023 гг. в Терсколе сохранялся статистический незначимый рост суммы годовых осадков $b = 6,9$ мм/10 лет ($D= 0,4\%$), в 1976-2023 гг. скорость роста годовых сумм осадков снизилась до $b=12,6$ мм/10 лет ($D= 1\%$). Тренды в зимних и летних суммах осадков отсутствовали, весенние и осенние суммы осадков незначительно увеличивались.

Для расчетов изменения водного баланса при деградации долинных ледников Центрального Кавказа были выбраны ледники бассейна реки Баксан для того, чтобы оценить влияние изменения горного климата по данным м/станции Терскол (Баксанское ущелье). Из данных по деградации долинных ледников Большого Кавказа [5], были использованы значения уменьшения площадей ледников (ΔS , км²) для расчета среднего, минимального и максимального значений изменения водного баланса (тонн воды) в результате потери ледяного панциря ледников за последние ~60 лет. По рекомендации авторов [5], при расчетах использовалась толщина долинных ледников в бассейне р. Баксан $h=75$ м. Тогда уменьшение среднего объема ледника Большой Азау, составило:

$$\Delta V = \Delta S h = 6,35 \text{ км}^2 \cdot 0,075 \text{ км} = 0,47625 \cdot 10^9 \text{ м}^3 \quad \text{или масса воды: } m = 476250000 \text{ тонн.}$$

Таким образом, за последние 60 лет в результате таяния ледника Большой Азау (Центральный Кавказ, долина р. Баксан) баланс воды уменьшился на 476,25 млн. тонн. Для сравнения темпов таяния приведем результаты расчетов по изменению водного баланса ледников Большой Азау и Терскол за последние 20 лет (с 1997 по 2017 гг.), используя данные изменения объема ледяного панциря (ΔV , км³) из работы [6]. Снижение водного баланса в результате таяния ледника Большого Азау с 1997 по 2017 гг. в среднем составило 260 млн. тонн, что больше половины величины 476,25 млн. тонн (уменьшение за 1957 по 2020 гг.).

Из расчетов для остальных ледников бассейна р. Баксан по уменьшению их водного баланса в результате таяния с 1957 по 2020 гг., второе по величине сокращение водного баланса происходило за счет таяния ледника Каяартыбаши. Среднее значение составило 92,25 млн. тонн при максимальном снижении на 98,25 млн. тонн и минимальном – на 86,25 млн. тонн. С 1957 по 2020 гг. на леднике Чегеткарачиран среднее значение уменьшения составило 2,26 млн. тонн воды (от максимального 2,40 млн. тонн до минимального 2,10 млн. тонн). Ледник Шхельда за период с 1960 по 2020 гг. потерял в среднем 93 млн. тонн водного запаса, а ледник Большой Тютю (с 1962 по 2020 гг.) – 44,25 млн. тонн.

Сложившийся термический режим и режим осадков в последние десятилетия явился основной составляющей из многих факторов, приводящих к сокращению площади ледников и изменению водного баланса. В сумме за последние 60 лет ледники бассейна реки Баксан потеряли 844,51 млн. тонн воды, из них на ледник Большой Азау пришлось 476,25 млн. тонн воды. За последние 20 лет Большой Азау потерял 260 млн. тонн воды, что составило более половины потерь за третью часть времени от всего исследованного периода, что, вероятно, происходило и со всеми другими ледниками Кавказа.

Список литературы

1. www.grid.unep.ch/glaciers
2. Auer I. et al., 2007: HISTALP – historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *Int. J. Climatol.*, №27 (1), pp.17–46. doi:10.1002/joc.1377.
3. Tashilova A.A. Analysis of climate change in Terskol over the last 60 years // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. **840**(2021) 012038 doi:10.1088/1755-1315/840/1/012038
4. Xu Y., V. Ramanathan and W.M. Washington, 2016: Observed high-altitude warming and snow cover retreat over Tibet and the Himalayas enhanced by black carbon aerosols. *Atmos. Chem. Phys.*, 16(3), 1303–1315, doi:10.5194/acp-16-1303-2016.
5. Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Ташилова А.А. Современная деградация долинных ледников Центрального Кавказа / М.Ю. Беккиев, // *Фундаментальная и прикладная климатология*. –2021. –Т.8, –№ 3, – с. 113-141. doi: 10.21513/2410-8758-2021-3-113-141
6. Kutuzov S., Lavrentiev A., Smirnov G., Nosenko D., Petrakov I. Volume Changes of Elbrus Glaciers From 1997 to 2017/S. Kutuzov, //2019. *Front. Earth Sci.* 7:153. doi: 10.3389/feart.2019.00153.

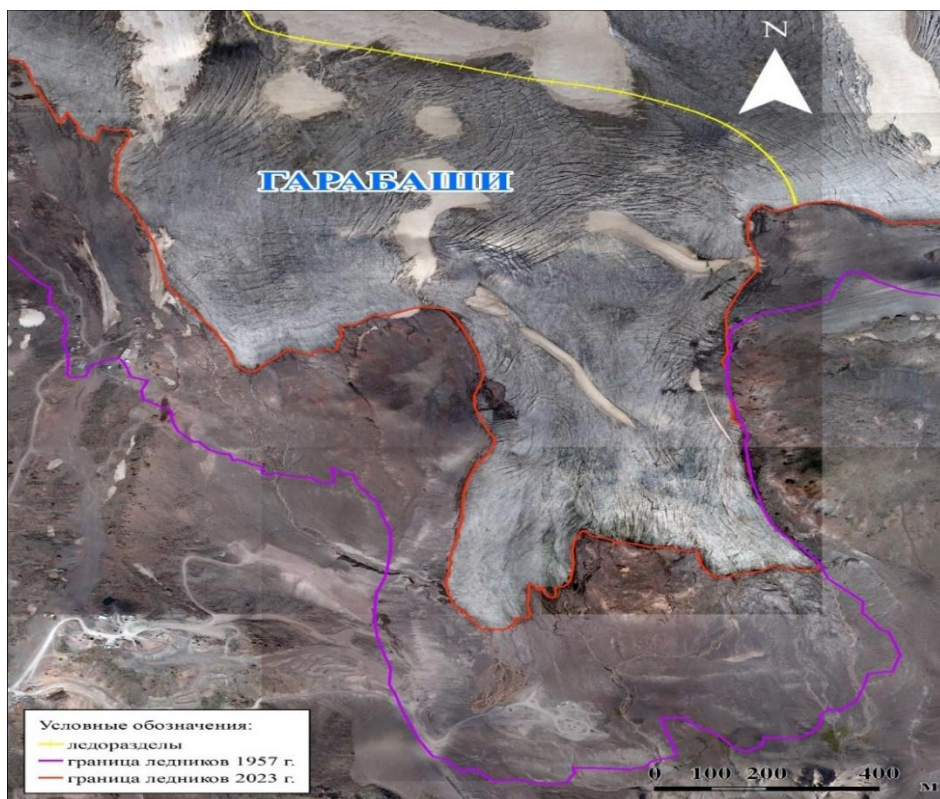
ФОРМИРОВАНИЕ СЕЛЕВЫХ ОЧАГОВ НА ГОРЕ ЭЛЬБРУС ПРИ ДЕГРАДАЦИИ ГОРНОГО ОЛЕДЕНЕНИЯ

Аджиев А.Х., Кондратьева Н.В.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Приэльбрусье относится к числу наиболее изученных селеопасных районов РФ. Детальная информация о причинах и последствиях схода селевых потоков в Приэльбрусье, датах схода, объеме селевых потоков систематизирована в работе [1].

В данной работе представлены результаты исследования селевых процессов на южном склоне горы Эльбрус на высотах около 3000м над уровнем моря на водотоках рек Гарабаши, Азау и их притоках, стекающих с одноименных ледников. Выполнены оценки объемов селей. Показано, что селевые процессы на высотах более 3000 метров над уровнем моря обусловлены деградацией горного оледенения и отступанием ледников. Природные условия южного склона Эльбруса благоприятны для формирования селевых потоков по руслам водотоков. На крутых склонах морен отмечается формирование микроселей.



Активность селевых процессов определяется на южном склоне горы Эльбрус, прежде всего, значительными масштабами перигляциальной зоны, которая увеличивается по мере отступления ледников. Авторами разработана карта селевых бассейнов и составлен кадастр параметров селевых очагов. Выполнен корреляционный анализ взаимосвязи изменения климата с активизацией селей и отступанием ледников. Оценены изменения площади ледников Эльбруса (Малый Азау, Гарабаши, Терскол) за 1957-2022 гг. В 2022 году площадь ледников Эльбруса составила около 105 км². Высокие темпы деградации ледников Эльбруса сохранились и составляют за последние годы в среднем 1,2 км² в год.

По нашей оценке, имеет место следующее отступление, на отдельных участках, ледников с 1957 г. по 2023 г.: М. Азау – до 790 м; Гарабаши – до 570 м; Терскол – до 720 м.

Потери ледниками ледовой массы по их площади произошли не равномерно. Ледники М. Азау и Гарабаши с восточной стороны отступили очень незначительно. Как видно из рис. 1, западная часть ледника Гарабаши отступает интенсивнее.

Показано, что по долине ручьев, вытекающих из-под ледника Гарабаши ниже фронта ледника, могут проходить селевые потоки высотой фронта не более 2 м, расходом до 65 м³ /с и максимальной скоростью до 5,1 м/с.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (Соглашение № 24-27-20006).

Список литературы

1. Кадастр селевой опасности юга европейской части России. /Отв. ред. канд. геогр. наук, доцент Н.В. Кондратьева. Нальчик: Печатный двор, 2015.

СТОК И МИНЕРАЛИЗАЦИЯ ВОДЫ МАЛЫХ РЕК ВЫСОКОГОРНОЙ ЗОНЫ БАССЕЙНА РЕКИ ТЕРЕК В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Кучменова И.И.

ФГБУ «высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

ira_kuchmenova@mail.ru

В настоящее время проблема влияния климатических факторов на сток горных рек привлекает к себе особое внимание, в связи с деградацией ледников. Общепринято, что в горных реках, имеющих ледниковое питание, в процессе таяния ледника происходит увеличение расходов воды, однако этот вопрос изучен недостаточно.

В последние десятилетия отмечается увеличение водных ресурсов и изменение внутри-годового распределения стока во многих районах европейской части России [1,2]. Повышение температуры воздуха приводит к усилению интенсивности таяния ледников, что также влияет на водные ресурсы. Однако эти вопросы рассматривались в основном для крупных рек, для небольших горных рек они мало изучены [3].

Исследуемыми являются истоки рек Чегем, Черек Балкарский и Черек Безенгийский, расположенные в ледниках северного склона Центрального Кавказа, в пределах Главного и Бокового хребтов, являющихся одним из наиболее мощных очагов оледенения Кавказа. Реки протекают по территории Кабардино-Балкарского государственного высокогорного заповедника (КБГВЗ) и являются притоками третьего порядка р. Терек.

Цель представленной работы – проанализировать влияние изменений температуры воздуха на гидролого-гидрохимический режим рек КБГВЗ.

Основными задачами исследования является оценка многолетней изменчивости стока воды и оценка влияния температуры воздуха как определяющего фактора формирования стока рек в современных условиях (с 1961 г. по 2021 г.). Проведен сравнительный анализ

данных по минерализации воды рек за 1959–1960 гг. с данными, полученными нами в 2021–2022 гг.

Водность в исследуемых реках начала увеличиваться после 1980-х годов, это согласуется с изменением климата в 1976 г., которое привело к ускоренному таянию ледников. Для подтверждения данной гипотезы были рассчитаны следующие статистические характеристики: математическое ожидание (m), дисперсия (D), среднее квадратическое отклонение (σ) и коэффициент вариации (Cv) для среднегодового, зимнего и летнего стока воды в периоды с 1961 по 2021 гг., с 1961 по 1990 гг., с 1991 по 2021 гг. С помощью таких статистических критериев, как критерий Стьюдента и Фишера, проверялась гипотеза об увеличении стока после 1980 г. Кроме того, результаты исследования показали, что увеличение среднегодовых температур после 1990 г. приводит к изменению внутригодового распределения стока.

В литературных источниках информация о значениях минерализации воды исследуемых рек за более ранний период представлена только за 1959–1960 гг. из-за отсутствия данных [4]. В связи с этим, при сравнительном анализе полученных нами данных за 2021–2022 гг. с минерализацией рек за 1959–1960 гг., было выявлено, что к настоящему времени минерализация рек в межень уменьшилась, в среднем, почти в 5 раз; в половодье – более чем в 2 раза (табл. 1).

Таблица 1

Минерализация воды рек Чегем, Черек Балкарский и Черек Безенгийский в разные периоды

Река	Значение минерализации, мг/дм ³			
	Весенне-летнее половодье		Осенне-зимняя межень	
	1959 – 1960 гг.	2021 – 2022 гг.	1959 – 1960 гг.	2021 – 2022 гг.
Чегем	114	92	257	148
Черек Балкарский	223	61	754	123
Черек Безенгийский	192	78	717	105

Список литературы

1. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века: [монография]/А. В. Кислов [и др.]. – Москва: МАКС Пресс, 2008. – 290 с.
2. Лурье П.М. Водные ресурсы и водный баланс Кавказа. СПб.: Гидрометеиздат, 2002 (Ростов-на-Дону: ООО Диапазон). 506 с.
3. Виноградова О.В., Виноградова Н.Н. Реакция горных рек Кавказа на изменения климата// Вестник Московского университета, сер. 5. география. 2013. № 4, с.44 – 48.
4. Алекин О. А. Сток растворенных веществ с территории СССР. – Москва: Наука, 1964. – 143 с.

КОНЦЕНТРАЦИИ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ИСТОКАХ РЕКИ БАКСАН И ЛЕДНИКЕ ГАРАБАШИ (ЮЖНЫЙ СКЛОН ЭЛЬБРУСА)

Керимов А.М., Курашева О.А.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

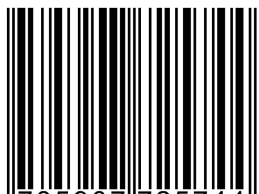
В работе представлены результаты сравнения содержания тяжелых металлов (ТМ) в снежно-фирново-ледяной толще эталонного ледника Гарабаши (южный склон Эльбруса) на абсолютной высоте 4000 м и речных водах ледникового питания у истоков р. Баксан. Рассматривается содержание тяжелых металлов в реках Гарабаши, Азау и Терскол, формирующих исток р. Баксан за период с 1999 по 2010 гг. За указанный период имеются данные по концентрации следующих тяжелых металлов: Cr, Ni, Mo, Mn, Pb. Эпизодически определялись Ag, Zn, V. Концентрации приведенных элементов меняются в пределах одного порядка и более, как в снежной толще, так и в речных водах. Исследование содержания тяжелых металлов в снежно-фирново-ледяной толще и речных водах проводилось к моменту максимального снегонакопления на границе питания ледника (около 4000 м). На указанной высоте максимальное снегонакопление соответствует, как правило, середине июня.

Результаты исследования выявили, что значения концентраций ТМ, соответствующие пробам из шурфа, представляют средние значения ТМ из числа слоев. Не все металлы в пробах представлены в одинаковых количествах: в некоторых пробах содержание металлов ниже предела определения. Коэффициенты вариации концентрации указанных элементов в шурфах соответствуют нижеприведенным значениям: Cr $0,202 \div 0,695$; Ni $0,259 \div 0,682$; Mo $0,071 \div 1,025$; Mn $0,264 \div 0,714$; Pb $0,132 \div 0,650$; Zn $0,378 \div 0,986$.

Существенные различия концентрации рассматриваемых ТМ в снежной толще сезонного накопления и в реках, формирующихся при таянии ледников южного сектора Эльбруса (Терскол, Гарабаши, Большой Азау), объясняются, вероятно, следующим. При отборе проб к моменту максимального снегонакопления на уровне 4000 м водоотдача из снежной толщи практически отсутствует. Более того, в зоне максимального снегонакопления (высотная зона 3800-4000 м), соответствующей теплой фирновой зоне, льдообразование идет 8-10 лет. Отложившаяся в текущем году снежная толща, как правило, принимает участие в формировании химического состава речных вод через несколько лет. Концентрации ТМ Cr, Ni, Mn, Pb в пробах снежной толщи и речных вод весеннего пробоотбора ниже их предельно-допустимых концентраций (ПДК). Концентрация Mo в снежной толще ниже ПДК, а в речных водах достигает 6,5 ПДК. Содержание Zn как в снежной толще, так и в речных водах достигает 2,5 ПДК. В пробах летнего пробоотбора концентрации Zn в снежной толще достигают 6 ПДК. Такие высокие концентрации цинка, вероятно, связаны с активизацией фумарольной деятельности вулкана Эльбрус.

Вышеприведенные рассуждения о ПДК для рассматриваемых ТМ относятся только для рыбохозяйственных водоемов. Для водоемов санитарно-бытового назначения рассмотренные выше концентрации ТМ на один-два порядка ниже их предельно-допустимых концентраций.

ISBN 978-5-907725-74-4



9 785907 725744 >