

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-185-209>

УДК [556.166:627.51+556.167.6+551.465.75]:556.54(282.247.11)



Гидрологические опасности в устье Печоры¹

Д.В. Магрицкий¹✉, С.А. Агафонова¹, Л.С. Банщикова²,
К.И. Головнин^{1,3}, Л.Ю. Севастьянова⁴,
А.Э. Сумачев⁵

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия


² Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

³ Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

⁴ ФКУ «Гидрометсервис», Москва, Россия

⁵ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ magdima@yandex.ru

 ДВМ, 0000-0002-4953-8376; САА, 0000-0002-6392-1662; ЛСБ, 0000-0002-5878-1458;
КИГ, 0009-0001-9551-8755; ЛЮС, 0009-0004-5149-0588

Аннотация. В статье приведены результаты анализа характеристик опасных гидрологических явлений и процессов на устьевом участке р. Печоры. В качестве исходных данных использовались материалы наблюдений на гидрологических постах, сведения о произошедших наводнениях и опасных обмелениях, спутниковые снимки. Установлено, что основной ущерб в пределах исследуемого участка создают наводнения стокового и стоково-заторного генезиса. Определено наиболее опасное время образования заторов льда и развития наводнений. Обоснованы связи между уровнями воды и площадью затопления, между максимальными уровнями и продолжительностью затопления. Выделены 4 основных сценария вскрытия Печоры и дельтовых рукавов весной.

Ключевые слова: дельта, затопление, затор льда, обмеление, опасное явление, пост, река, спутниковый снимок, уровень воды

Для цитирования: Магрицкий Д.В., Агафонова С.А., Банщикова Л.С., Головнин К.И., Севастьянова Л.Ю., Сумачев А.Э. Гидрологические опасности в устье Печоры. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(2):185–209. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-185-209>

Поступила 29.04.2024

После переработки 17.06.2024

Принята 18.06.2024

¹ Статья подготовлена на основе доклада «Опасные гидрологические явления на устьевом участке р. Печора», представленного на 2-й Международной научно-практической конференции в г. Астрахань 18 мая 2023 г. [34].

Hydrological hazards at the mouth of the Pechora River

Dmitry V. Magritsky¹✉, Svetlana A. Agafonova¹, Lyuba S. Banshchikova²,
Kirill I. Golovnin^{1,3}, Lyudmila Yu. Sevastyanova⁴, Alexander E. Sumachev⁵

¹ *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*


² *State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia*

³ *Water Problems Institute RAS, Moscow, Russia*

⁴ *Hydrometservice, Moscow, Russia*

⁵ *Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

✉magdima@yandex.ru

 DVM, 0000-0002-4953-8376; SAA, 0000-0002-6392-1662; LSB, 0000-0002-5878-1458; KIG, 0009-0001-9551-8755; LYS, 0009-0004-5149-0588

Abstract. The paper presents the results of a comprehensive analysis of the situation with dangerous hydrological processes at the mouth reaches of the Pechora River (from the mouth of the Sula River to the Pechora Bay). The study used data from observations of water levels, discharges and ice phenomena at hydrological gauges (until 2022), information about inundations and adverse shallowing that occurred here, satellite images (since 1991). It was found that the main damage in the mouth of the Pechora River is caused by river inundations, one of the main factors of which is ice dams. It has also been established that the long-term repeatability of the ice-dam formation is actually greater than the gauge observation shows. During the spring flood, the floodplain is flooded almost annually, and in 25–50 and 10–14 % of years the water level exceeded the adverse and dangerous values. The city of Naryan-Mar often suffers from floods. Until the 1970s, these occurred almost every other year; more recently, there were major inundations in 1998, 2008, 2014 and 2017. The most dangerous season for the formation of ice dams and the occurrence of inundations has been determined. On a long-term scale, the frequency of flooding and ice-dam formation has remained practically unchanged, the duration of floodplain flooding has increased everywhere, whereas the time of the water level exceeding the adverse mark has increased in the river mouth segment upstream from the delta and decreased in the delta. The empirical dependencies between the water levels and the area of flooding, between maximum water levels and the duration of flooding are substantiated. There are four main scenarios of the channel of the Pechora River and delta branches opening from the ice cover in spring. The location of the main points of ice-dam formation has been specified. The third unfavorable hydrological process within the Pechora River mouth is adverse water runoff shallowing, which disrupts river navigation. In the vast majority of cases, it is associated not with low water levels in the delta, but with those in the middle and lower reaches of the Pechora River. This period lasts from August 11 to September 6. On a long-term scale, the situation with minimum levels in the summer and autumn season has improved. As regards other unfavorable hydrological phenomena — anomalous (by date) ice formation, sea-water intrusion into the delta branches, storm surges and wind-induced down-surges — it has been found that they do not cause damage either because of their low intensity and repeatability, or because they belong to other parts of the Pechora mouth region.

Keywords: adverse shallowing, dangerous phenomenon, delta, flooding, gauge, ice dam, river, satellite image, water level

For citation: Magritsky D.V., Agafonova S.A., Banshchikova L.S., Golovnin K.I., Sevastyanova L.Yu., Sumachev A.E. Hydrological hazards at the mouth of the Pechora River. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(2):185–209. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-185-209>

Received 29.04.2024

Revised 17.06.2024

Accepted 18.06.2024

Введение

В устьях рек перечень опасных гидрологических процессов и явлений, их повторяемость и интенсивность нередко выше, чем в бассейнах рек и на типичных морских побережьях. Причин такой ситуации несколько: от уникальности расположения, особенностей морфологического и гидрографического строения, гидрологического режима устьев рек, активного взаимодействия здесь речных и морских гидрометеорологических факторов до высокой их хозяйственной освоенности и плотности заселения, ценности и уязвимости устьевых экосистем [1]. Арктические речные устья не исключение, хотя здесь не все опасные гидрологические явления (ОГЯ) имеют такую же интенсивность и пространственный охват, как в южных широтах, да и степень хозяйственного освоения меньше. Тем не менее к таким объектам можно уверенно отнести устье р. Печоры, где г. Нарьян-Мар не раз подвергался затоплениям речными водами [2, 3].

Перечень ОГЯ в устьевой области Печоры не ограничивается лишь речными наводнениями. Помимо них опасность представляют штормовое волнение и нагонные затопления, стоковые обмеления в реке и дельтовых рукавах, интенсивный ледоход, заторы льда, дрейф морских льдов и навалы льда, аномальное по срокам ледообразование, проникновение морских вод в дельтовые рукава и др., в соответствии с понятийным аппаратом и классификацией из [1, 4]. Причем из-за климатических изменений, характерной реакции на них морского уровня и ледовых условий, штормовой активности, стока и гидрологического режима р. Печоры, расширения природопользования интенсивность этих явлений лишь усиливается.

Целостному пониманию этой проблемы препятствует слабое информационное обеспечение. Собираемые на мониторинговой сети гидрологические данные имеют пространственное ограничение. По сути, сами пункты, расположенные на реке и главных рукавах, дают представление лишь о том, что происходит на небольшом участке поста, тогда как экспедиционные исследования, способные охватить больше территорий и водных объектов, практически не проводятся. Кроме того, материалы стационарных наблюдений публикуются в специализированных справочниках, доступ к которым затруднен даже для специалистов. Все это сужает возможности полноценного анализа современной ситуации с ОГЯ в устье Печоры по выявлению факторов их развития, причинно-следственных связей и в итоге по внедрению и совершенствованию мер, снижающих частоту и масштабы ОГЯ, генерируемые ими ущербы.

В первых работах с разделами по ОГЯ в устье Печоры [5, 6] основное внимание уделено заторам льда и заторным наводнениям, а также проникновению соленых вод в рукава дельты по материалам экспедиции 1977 г. В 2001 и 2007 гг., в новых исследованиях сотрудников ГОИНа [7, 8], анализируются причины возникновения и механизмы развития заторов льда. На современном этапе изучения ОГЯ, обусловленных ледовыми явлениями, заторными уровнями воды и разливами речных вод, приводятся оценки характеристик соответствующих ОГЯ, новые подходы в прогнозировании и выявлении самих заторов [9–13]. Важные дополнительные сведения по наблюдавшимся в устье р. Печоры наводнениям и опасным повышением уровня содержатся в [3, 14]. В работах [15, 16], по результатам расчетов и гидродинамического моделирования, демонстрируются карты районов дельтовой равнины и заселенных территорий, потенциально подверженных затоплению речными водами. В перечне подобных работ выделяется публикация [2], в которой впервые рассмотрены все

основные ОГЯ в устье Печоры с указанием особенностей их временной изменчивости, участков проявления и величин основных характеристик. С учетом новых данных, получаемых как со стационарной сети, так и со спутниковых аппаратов, произошедших изменений в водном и ледовом режиме реки и приемного водоема, появления новых методик выявления заторов льда и научно-исследовательских результатов (в том числе от других исследователей) назрела необходимость нового обобщения всей информации по ОГЯ в устье Печоры, более детализированного понимания современной ситуации с ними, ее структурных и многолетних изменений, основных причин этого процесса, эффективности реализуемых мероприятий. Такой посыл определил цель и задачи проведенного исследования, добавил новые решения, основанные на сопоставлении материалов наземного и спутникового мониторинга, на сравнительном анализе весеннего хода уровня воды и ледовых условий на всех постах по длине устьевых участков Печоры, на новых данных от ОГМС Нарьян-Мар, муниципальных органов и местного населения.

Данные и методики

В качестве исходных материалов при решении задач исследования были использованы прежде всего данные наземных гидрологических наблюдений (за уровнями (H) и расходами (Q) воды, ледовыми явлениями) на гидрологических постах в пределах устьевых участков р. Печоры за весь период и вплоть до 2021–2022 гг., а также опубликованные материалы экспедиционных гидрологических изысканий.

Устьевой участок Печоры начинается от устья р. Сулы, куда могут проникать со стороны моря нагонные колебания уровня [17], и заканчивается морским краем дельты. Его длина 190 км; он включает придельтовую часть (от верхней (речной) границы устьевых участков до вершины дельты) и дельту площадью 3250 км² (рис. 1). Выше дельты Печора имеет широкую пойму с многочисленными протоками и озерами, разветвленное русло. Здесь река разделяется на Малую Печору и Большую Печору, которые сливаются выше с. Оксина, вновь образуя единое русло. В вершине дельты, у с. Большая Сопка и в 120 км от Печорской губы, река разделяется на дельтовые рукава Большая Печора (правый) и Малая Печора (левый). Малая Печора разделяется на несколько крупных и множество небольших рукавов. Большая Печора (основной рукав) имеет широкое, но извилистое, с несколькими разветвлениями русло и основной узел бифуркации недалеко от Печорской губы. В дельте множество озер (самое большое — оз. Голодная Губа) и болот; на долю суши в межень приходится ~70 % [5]. Преобладающие высоты над уровнем моря — от 1 до 6 м, максимальные высотные отметки 7 м БС; правый и левый берега высокие — до 20–50 м БС. Ландшафтный облик устьевых участков мало изменен человеком. В устье главный населенный пункт, морской и речной порт — это город Нарьян-Мар (23,6 тыс. чел.). Еще ~2 тыс. чел. проживает в менее чем десяти сельских поселениях.

На устьевом участке основной стоковый пост — это ГП-1 Оксина, который замыкает водосбор площадью 312 000 км² и расположен в 141 км от устьевых створа рук. Большая Печора (мыса Болванский Нос) (см. рис. 1). Он функционирует с 1916 г., но измерения Q на нем имеют большой перерыв с 1946 по 1979 г., а уровней — с 1964 по 1974 г. Кроме того, достоверность Q вызывает вопросы, изложенные в [18, 19]. Поэтому для понимания гидрологической обстановки в устье также используют Q на посту Усть-Цильма (248 000 км²; в 425 км). Другие посты на устьевом участке — уровенные: МГП Нарьян-Мар (100 км от залива, действует

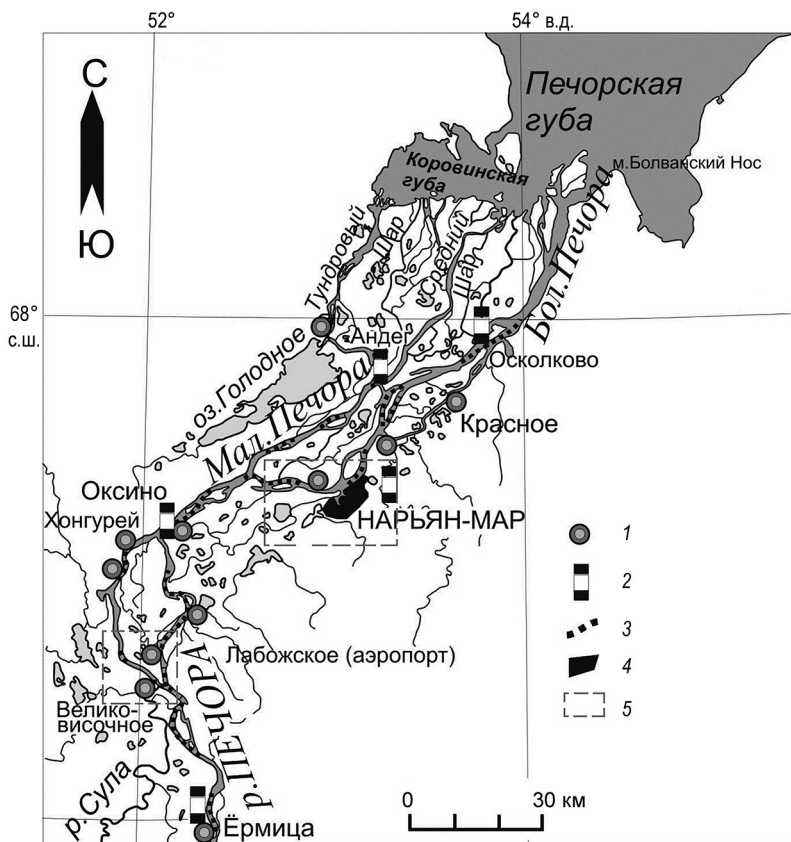


Рис. 1. Устьевой участок р. Печоры. 1 — сельские населенные пункты, 2 — гидрологические посты, 3 — участки образования заторов льда, 4 — г. Нарьян-Мар, 5 — фрагменты настоящей карты, приведенные на рис. 5, 6

Fig. 1. The mouth section of the Pechora River. 1 — rural settlements, 2 — hydrological gauges, 3 — areas of ice-dam's formation, 4 — the city of Naryan-Mar, 5 — fragments of this map shown in Fig. 5, 6

с 1927 г.), МГП-2 Андег (75 км, с 1974 г.) и МГП-2 Осколково (53 км, с 1968 г.). Пост Красное (в 62 км от моря) был закрыт в 1987 г. Использованы также данные по уровням на постах Усть-Цильма и Ермицы (в 236 км, с 1933 г.). Эти посты находятся выше верхней границы устьевое участка, однако по данным поста Усть-Цильма можно судить о параметрах летне-осеннего обмеления в низовьях Печоры, а по ГП Ермицы — о гидрологической ситуации в придельтовой части устья.

Данные наблюдений на постах брались из гидрологических справочников: с 1936 и по 1980 г. включительно — это «Гидрологический ежегодник» (Том 0. Выпуски 4, 8, 9); после 1980 г. — «Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши» (Том I. Вып. 9) и «Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев» (Том 2. Том 3. Часть 1–2). Часть данных за последние годы была взята с сайта АИС ГМВО (<https://gmvo.skniivh.ru/>), а также была предоставлена Объединенной гидрометеорологической станцией «Нарьян-Мар».

Второй информационный блок составили сведения о произошедших в прошлом опасных гидрологических событиях. Основной объем таких сведений был взят из баз данных по ОГЯ в устьях рек европейской части России — «Наводнения в устьях рек Европейской территории России» (Св. о рег. № 2013620332, 21.02.2013) и «Опасные гидрологические явления на морских побережьях Европейской России» (№ 2015620918, 16.06.2015).

Третий блок — это материалы спутниковой съемки на случаи развития наводнений вблизи населенных пунктов и за период начиная с 1991 г. Были использованы снимки съемочных систем Thematic Mapper (TM) Landsat-5, Operational Land Viewer (OLI) Landsat-8, Multispectral Imager (MSI) Sentinel-2, а также снимки, полученные радиолокатором с синтезированной апертурой со спутника Sentinel-1. Источниками космических снимков послужили серверы Earth Observation System (EOS, приложение Land Viewer) (<https://eos.com/>), Earth Explorer USGS (<https://www.usgs.gov/land-resources/>). Радиолокационные снимки Sentinel-1 получены с ресурса Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>). Для доступа к снимкам и с целью осуществления некоторых этапов их тематической обработки также использовался ресурс Google Earth Engine. Топографической основой послужили карты масштаба 1:200000, две цифровые модели рельефа: GMTED2010 с разрешением в плане ~160 м и ArcticDEM (основная), изначально имеющая разрешение 2 м (при экспорте разрешение было понижено до 10–15 м) с сайта (<https://download.gebco.net/>).

Основными методами обработки и анализа данных стали, во-первых, стандартные гидрологические расчеты и статистические методы анализа (включая критериальный), во-вторых, построение разнообразных эмпирических зависимостей, с оценкой тесноты связи и адекватности (на базе коэффициента достоверности R^2), и хронологических графиков. Ординаты разностной интегральной кривой (St) рассчитаны по формуле $St_i = \sum_1^i (x/\bar{x} - 1)$, где x_i — значение характеристики за конкретный год; \bar{x} — средняя за многолетний период величина рассматриваемой характеристики.

В-третьих, проводился сравнительный анализ данных с постов по экстремальным уровням и расходам воды, по ледовым явлениям, критических высотных отметок и документально подтвержденных событий с опасными гидрологическими явлениями. Это позволило более обоснованно скомпоновать многолетний ряд всех возможных случаев возникновения наводнений стокового и стоково-заторного генезиса, неблагоприятных стоковых обмелений и др.

В-четвертых, для оценки характерных мест образования заторов льда строились кривые отметок уровней воды (в БС) по длине устьевых участка $H = f(L, t)$, где L — расстояние от моря до поста, км; t — одномоментное время фиксации уровня на всех рассматриваемых постах, в сутках. Такие графики с изолиниями отметок в координатах времени и расстояния были построены для рукава Большая Печора по данным постов Оксина — Нарьян-Мар — Осколково и для Малой Печоры по постам Оксина — Андег за период с 1978 по 2019 г. Переломы в продольном профиле, вызванные образованием заторной «плотины», позволяли отследить сроки и место формирования заторов льда, согласно методике в [20–22].

В-пятых, по спутниковым снимкам на даты развития речных наводнений — до начала события, во время него и по окончании, строго в пределах двух полигонов: 1) вокруг населенных пунктов Великовисочное и Лабожское (площадь полигона 307 км²), 2) г. Нарьян-Мар и его окрестности, включая п. Искателей, п. Тельвиска

и д. Макарово (469 км²), — определялись границы и площадь затопленной территории с точностью 10–30 м. Обработка данных радиолокационной съемки производилась в программе SNAP Desktop (ESA's Sentinel Application Platform), а оптические снимки — с помощью Google Earth Engine и QGIS. Обязательно учитывался рельеф поймы, русловые переформирования за 1991–2020 гг. Последнее анализировалось путем сопоставления снимков за разные годы в меженный сезон. Оцененные параметры затопления (с исключением меженного водного зеркала) сопоставлялись с данными наземных гидрологических наблюдений, гидрографической сетью (в меженных границах) и рельефом территории, участками заторообразования.

Результаты и их обсуждение. Опасные ледовые явления

Первое упоминание об опасных ледовых процессах и событиях в устье Печоры датируется 1611 г., когда уже в конце лета ударили морозы, море в устье реки Печоры замерзло, на самой реке начался ледоход, повредивший установленные на сему сети и лишивший рыбаков улова [23]. В настоящее время действительно негативные эффекты на устьевом участке Печоры способны создавать заторы льда и аномальное по срокам ледообразование, прежде всего в отношении открытия и закрытия ледовых переправ.

Заторы льда в реке и дельтовых рукавах, увеличивая скорость и величину подъема уровня, формируют самые опасные и частые наводнения — стоково-заторные. Интенсивный ледоход в реке, навалы льда на берегах, прямое давление масс льда на сооружения могут создавать дополнительный ущерб. Так было по меньшей мере один раз — весной 1966 г., когда огромные массы льда во время интенсивного ледохода и из-за прорвавшихся (выше по течению) мощных заторов, сопутствующие большим расходам воды, повредили причалы и обрушили портовые краны в г. Нарьян-Маре [24].

Средние сроки вскрытия реки у с. Оксина и в дельтовых рукавах приходится соответственно на 20 и 22–24 мая (за 1991–2021 гг. — период современного гидрологического режима Печоры). Ледоход на устьевом участке проходит при высоких уровнях воды, и в 71 % случаев на посту Оксина и 87–91 % случаев на постах в дельте (Нарьян-Мар, Андег и Осколково) высшие годовые уровни наблюдались во время весенних ледовых явлений. Выше кромки ненарушенного ледяного покрова, при замедлении ледохода на участках сужения русла, крутых поворотах и выше островов образуются заторы льда. В дельте реки заторообразованию могут способствовать также нагонные ветры [2]. На рис. 1 показаны основные заторные участки.

Протяженность заторов, включая основание, гребень и массив, составляет 10–25 км [7]. В 1992 г., согласно ОГМС Нарьян-Мар и материалам авиаразведки, протяженность затора в русловом рукаве Малая Печора, с основанием между д. Каменка и п. Хонгурей, составила 40 км, т. е. больше, чем в 1979 г., когда в устье Печоры было наводнение. Подпор от заторов распространяется на десятки километров. Продолжительность заторов, по стационарным наблюдениям, варьирует от 1 до 3–5 суток и реже дольше (рис. 2). Хотя ледовые заторы относительно кратковременны, их разрушение не означает быстрое освобождение русла. При относительно маломощных и кратковременных заторах льда этот процесс последовательный и представляет собой разрушение одних заторов, смещение льда ниже по течению и формирование новых заторов либо смещение самих заторов. При порыве мощных заторов огромные массы воды и льда могут «проноситься» без повторного заторообразования вниз по течению.

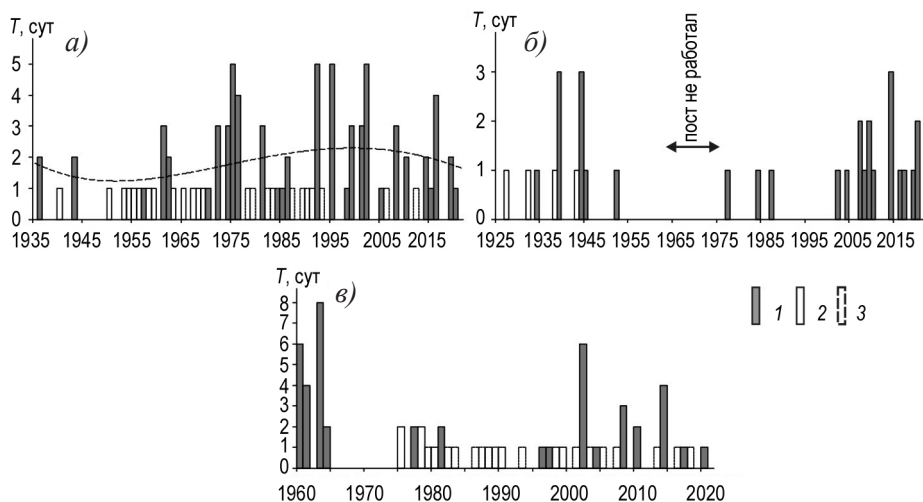


Рис. 2. Продолжительность заторов льда на участке пост Ермицы — пост Оксино (*а*; с линией тренда), ниже поста Оксино (*б*) и в дельте Печоры (*в*).

1 — продолжительность затора льда известна и приводится на диаграмме; 2 — из гидрологического ежегодника известно лишь о факте образования затора льда; 3 — факт образования затора льда установлен расчетным способом

Fig. 2. The duration of ice dams at the Yermitsa — Oksino reaches (*a*; with a trend line), downstream the Oksino gauge (*b*) and in the Pechora River Delta (*c*).

1 — the duration of ice dam is known and shown in the diagram; 2 — only the fact of ice dam formation is known; 3 — the fact of ice dam formation is established by calculation

Информация о ледовых явлениях, публикуемая в гидрологических ежегодниках, не позволяет достоверно оценить характеристики заторов льда в пределах устьевоего участка Печоры. Согласно [5], заторы льда образуются здесь практически ежегодно. Если следовать данным из гидрологических ежегодников и из справочника «Характерные уровни воды»², то за 1927–1964, 1976–2021 гг. повторяемость заторов у с. Оксино (ниже створа поста) равна 27 % и примерно столько же (28 %) в дельте Печоры с 1975 по 2021 г. Ниже с. Ермицы частота заторообразования до 1970-х гг. оценена величиной в 56 % [25], а с 1936 по 2021 г. — в 45 %. Главная причина несоответствия выводам из работы [5] в следующем: небольшая протяженность участка поста и ограниченность обзора при наблюдениях с берега, нечеткость критериев в выделении затора льда. Но даже в годы, когда проводилась ледовая авиаразведка (примерно до середины 1990-х гг.), сведения о ледовых заторах не всегда есть в ежегодниках.

Дополнительные или более полные сведения о заторах льда могут быть получены посредством сравнительного анализа уровней воды на соседних постах (этим подходом, например, руководствовались авторы «Каталога заторных и зажорных участков рек СССР» [25]) или по графикам $H = f(L, t)$. В итоге проведенная авторами работа позволила установить, что за период с 1975 по 2021 г. суммарная повторяемость заторов в дельте составила 68 % (включая данные из гидрологических

² Государственный водный кадастр. Характерные уровни воды (погодичные данные). Т. 1. Вып. 8, 9. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 271 с.

ежегодников и с учетом верхнего участка дельты ниже с. Оксина) (см. рис. 2а). Это заторы, которые либо образовались вблизи постов (располагаясь ниже по течению), либо были значительными по своей мощности и продолжительности ($\geq 1-2$ сут), формируя подпорный подъем уровня даже на постах, удаленных от головы затора. Из всех выявленных заторов в 22 % случаев заторы выше г. Нарьян-Мара — у о-вов Средний и Кермудей (см. рис. 1) — привели к значительному подъему уровня в рук. Большая Печора, заторы у о. Кисличный — в 16 % случаев, на Куйских перекатах — в 28 %. По Малой Печоре — это 27 % случаев у Чайчьих островов и 53 % у о-вов Кобылий и Середовой. Для участка Ермицы — Оксина повторяемость заторов за 1936–2021 гг., с учетом дополнительных данных, составила 60 % (см. рис. 2а). Это близко к оценкам из [25], полученным не только по сведениям о заторах льда в гидрологических ежегодниках, но и при сопоставлении среднесуточных уровней на соседних постах. Тем не менее ошибки и завышение повторяемости заторообразования при использовании данного метода не исключены.

Также анализ хода уровней воды и ледовых явлений на постах в дельте позволил выделить 4 основных сценария вскрытия, которые могут быть основой при разработке мер по предотвращению негативных последствий от заторов льда:

1. Вскрытие Большой Печоры начинается раньше, чем Малой Печоры. Пока на Большой Печоре развиваются подвижки и ледоход, на Малой Печоре сохраняются закраины. В такие годы формирование заторов происходит преимущественно в рукаве Большая Печора, Малая Печора вскрывается без заторов или с кратковременными остановками (так было в 1983, 1990 и 2002 гг.).

2. Вскрытие Малой и Большой Печоры начинается одновременно, после формирования закраин и подвижек. Если голова затора устанавливается в Большой Печоре выше Андегского узла, то ледоход по Малой Печоре проходит спокойно, без образования мощных заторов (1989, 1993 гг.). Если голова затора в Большой Печоре устанавливается ниже Андегского узла, то возможно перераспределение льда из Большой Печоры в Малую, образование мощных катастрофических заторов по обоим протокам (1978, 1999 гг.).

3. Вскрытие Малой Печоры начинается раньше Большой Печоры, как правило, на 1–2 сут, которых достаточно для формирования заторов льда выше д. Андег. Большая Печора вскрывается без заторов или с кратковременными остановками по всей длине (1988, 2004 и 2017 гг.).

4. Ледоход останавливается в заторе ниже с. Оксина на 2–3 дня, оба рукава вскрываются без образования мощных заторов или с кратковременными остановками ледохода (2009, 2012 гг.).

Не была выявлена четкая зависимость между протяженностью заторов и суровостью зимы. В многолетнем масштабе нет весомых доказательств того, что образование заторов участилось и они стали опаснее (см. рис. 2), а «внезапное» увеличение числа заторов с 2000-х гг., как в случае с постом Оксина, по-видимому, связано с изменениями в характере наблюдений на нем (так, с 1946 по 1976 г. по данным гидрологических ежегодников заторов на посту Оксина якобы вообще не было).

И тем более на многолетнюю изменчивость заторов не влияет антропогенное воздействие, как это имеет место быть, например, в устье Северной Двины [2, 26]. Согласно данным Двино-Печорского БВУ [27], последние 15 лет на устьевом участке р. Печоры программа ежегодной подготовки к весеннему ледоходу и половодью включает

организацию наблюдений на временных постах с оповещением населения о гидрологической обстановке через СМИ, укрепление противопаводковых дамб и др., тогда как мероприятия по ослаблению ледяного покрова проводятся, только когда уже начались затопления. Они сводились, главным образом, во время ЧС к взрывным работам по разрушению заторов льда, правда, не всегда учитывалась ледовая обстановка ниже по течению. Например, весной 1998 г. искусственное разрушение ледяного покрова, наоборот, способствовало формированию ледоходных уровней воды выше критических отметок. Поэтому разумнее, принимая во внимание особенности прохождения весеннего ледохода в нижнем течении р. Печоры, в основу противозаторных мероприятий закладывать не ускорение, а, наоборот, задержку вскрытия реки и дельтовых рукавов. Мало того, подмечено, что продолжительные заторы на придельтовом отрезке в определенной мере снижают вероятность заторообразования в дельте. Так было в 1992 г.

Осенние зажоры на устьевом участке Печоры, по имеющимся сведениям, ущерба не создают, хотя повторяемость лет с зажорами высокая — 97 % на посту Ермицы и 60 % на посту Оксина [25].

Неблагоприятные последствия имеет аномальное по срокам ледообразование. Оно приводит к более раннему сворачиванию навигации на реке, отодвигает сроки открытия ледовых переправ и зимников — до достижения ледяным покровом в реке необходимой толщины и прочности. Для участков постов Ермицы и Нарьян-Мар раннее начало осеннего ледообразования (раньше 5 и 2 октября) и завершение навигации наблюдаются крайне редко: за период наблюдений всего по 2 случая. Ледовые переправы и зимники играют ключевую роль в перевозке грузов и людей в продолжительный зимний период, поскольку Республика Коми и Ненецкий АО имеют очень низкую обеспеченность автомобильными дорогами с твердым покрытием и мостами через реки, не говоря уже о железных дорогах. Поэтому наиболее проблемными являются переходные периоды, когда нет ни навигации, ни ледовых переправ [12]. До открытия в декабре 2022 г. федеральной трассы Нарьян-Мар — Усинск регион большую часть года был отрезан от Большой земли. Альтернативой были авиатранспорт, судоходство летом и зимники зимой. Но даже сейчас транспортная доступность г. Нарьян-Мара ограничена отсутствием автомобильного моста через реку в районе с. Усть-Уса.

Речные наводнения и комбинированные решения по их изучению и описанию

Затопления речными водами на устьевом участке Печоры сопровождают весеннее половодье и ледоход. Это не случайно, поскольку уровень воды в реке и дельтовых рукавах значительно повышается (ΔH) благодаря увеличению Q , а при одновременном образовании заторов льда дополнительно (к стоковому подъему уровня) добавляется подпорная составляющая ($\Delta H_{\text{зтр}}$). Согласно [25], максимальные заторные подъемы уровней воды у г. Нарьян-Мара достигают 2,0–3,5 м, а на придельтовом отрезке (у с. Ермицы) они еще выше — 3,7–4,0 м. При этом средняя величина $\Delta H_{\text{зтр}}$ равна 2,2 и 2,7 м. По данным из [28], 19, 47 и 71 % высших уровней на постах Усть-Цильма, Ермицы и Оксина (соответственно) наблюдались в 1950–2020 гг. при заторе льда или беззаторном прохождении ледохода.

Повторяемость, продолжительность и глубина затопления (пойменной суши) авторами статьи оценивалась путем сравнения среднесуточных уровней воды на постах и так называемых критических высотных отметок. В числе последних — отметка

затопления поймы, отметки неблагоприятного (НГЯ) и опасного (ОЯ) явлений. Выше НГЯ начинается затопление сельхозугодий, отдельных малоценных хозяйственных построек и объектов, выше ОЯ последствия более тяжелые, включая затопление жилой застройки, транспортной и социальной инфраструктуры, промышленных объектов. Практически для всех постов эти отметки установлены (рис. 3), однако они могли меняться со временем. Так, согласно [6], отметка НГЯ для г. Нарьян-Мара

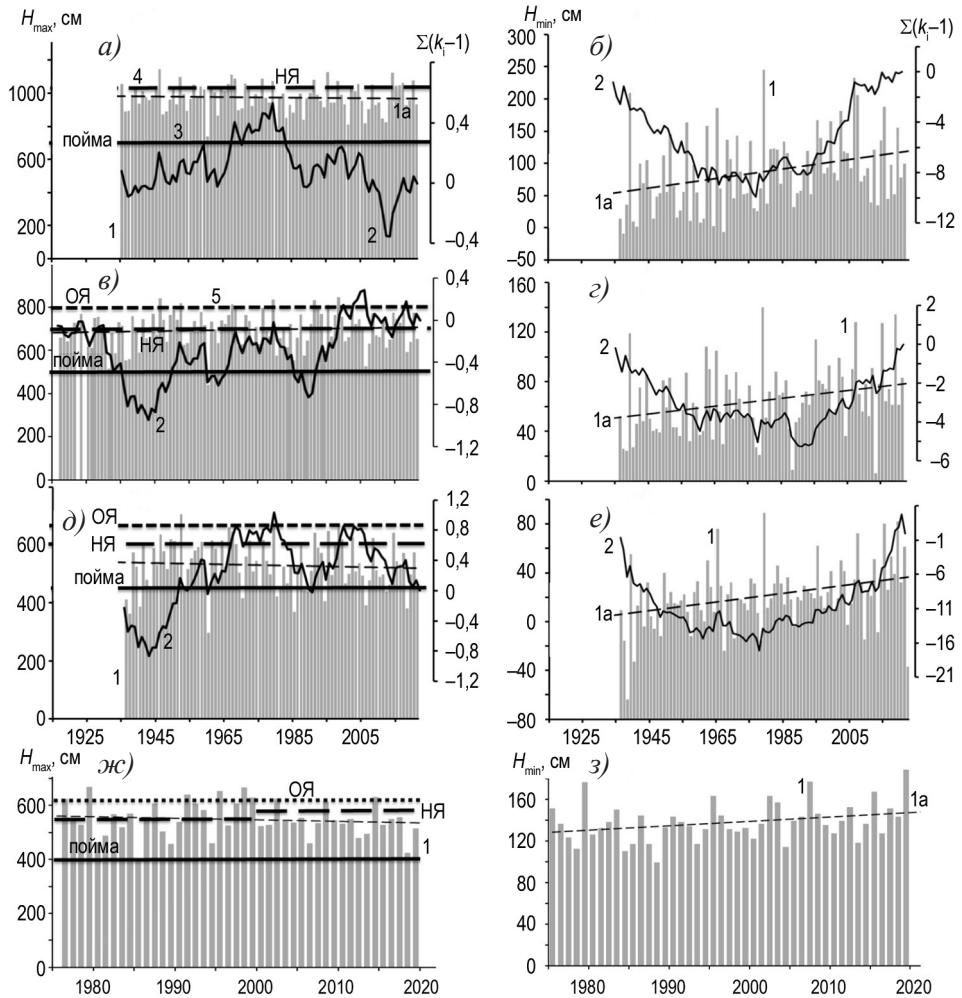


Рис. 3. Многолетние колебания высших (а, в, д, ж) и низших (б, з, е, з) уровней воды (1) с указанием линейного тренда (1а), разностные интегральные кривые характерных уровней (2), критические отметки — затопления поймы (3), неблагоприятного (4) и опасного (5) явлений. Посты: Ермицы (а, б), Оксино (в, з), Нарьян-Мар (д) и Андег (ж, з)

Fig. 3. Long-term fluctuations of maximum (а, в, д, ж) and minimum (б, з, е, з) water levels (1) with a linear trend (1а), differential integral curves of levels (2), critical altitude marks — floodplain flooding (3), adverse (4) and dangerous (5) phenomena.

Gauges: Yermitsy (а, б), Oksino (в, з), Naryan-Mar (д) and Andeg (ж, з)

была вначале 550 см (над нулем поста). Потом, вероятно после катастрофического наводнения 1998 г. и наращивания противопаводковой дамбы, отметка НГЯ была увеличена до 620 см, а ОЯ до 670 см.

Статистическая и графическая обработка собранных сетевых данных позволила сделать следующие выводы:

1. Стоковые и стоково-заторные затопления, включая и те, которые, по различным документальным свидетельствам, действительно сопровождалась социально-экономическим ущербом, на устьевом участке Печоры происходили в прошлом и по-прежнему продолжают случаться (см. рис. 3). Причем пойма вблизи постов затопляется практически ежегодно, за исключением участка поста Нарьян-Мар, где повторяемость таких событий составила 84 % лет за 1936–2021 гг. и 83 % за 1976–2021 гг. (таблица). Хотя, как будет продемонстрировано ниже, затопление поймы

Таблица

Характеристики превышения уровнями половодья высотных отметок поймы, неблагоприятного (НГЯ) и опасного (ОЯ) явлений

Table

Characteristics of spring flood levels exceeding floodplain height, and altitude marks of adverse and dangerous events

Участок	Посты	Повторяемость (%) за:					
		весь период			1976–2021		
		пойма	НГЯ	ОЯ	пойма	НГЯ	ОЯ
Придельтовый	Ермицы	100	26	н/д	100	26	н/д
	Оксино	99	48/44 ¹⁾	7,5	100	50/43 ¹⁾	8,7
Дельта	Нарьян-Мар	84	24/23 ¹⁾	1	83	20/17 ¹⁾	2
	Андег	–	–	–	100	48/39 ¹⁾	11
	Осколково	–	–	–	100	68/43 ¹⁾	14
Участок	Посты	Продолжительность ²⁾ (сут) за:					
		весь период			1976–2021		
		пойма	НГЯ	ОЯ	пойма	НГЯ	ОЯ
Придельтовый	Ермицы	30/52	5/14	н/д	32/52	6/14	н/д
	Оксино	22/43	6,5/19	–/6	23/43	7/19	–/4
Дельта	Нарьян-Мар	н/д	н/д	н/д	9/28	2,7/4	–/1
	Андег	–	–	–	20/39	3,9/9	–
	Осколково	–	–	–	50/98	4,8/12	–
Участок	Посты	Глубина затопления ²⁾ (м) за:					
		весь период			1976–2021		
		пойма	НГЯ	ОЯ	пойма	НГЯ	ОЯ
Придельтовый	Ермицы	2,7/4,4	0,4/1,1	н/д	2,7/4,3	0,4/0,95	н/д
	Оксино	1,9/3,5	0,6/1,5	0,3/0,5	2,0/3,5	0,7/1,5	0,3/0,5
Дельта	Нарьян-Мар	1,0/2,6	0,3/1,1	0,2/0,4	1,0/2,2	0,4/0,7	0,0
	Андег	–	–	–	1,5/2,7	–	–
	Осколково	–	–	–	2,4/3,9	–	–

Примечание. ¹⁾ с учетом изменения критической отметки на более высокую (с 1998 г.), ²⁾ рассчитано без учета нулевых значений, ³⁾ в знаменателе — максимальное значение, н/д — нет данных.

Note. ¹⁾ taking into account the change of the critical mark to a higher one (since 1998), ²⁾ calculated without taking into account zero values, ³⁾ in the denominator — the maximum value, н/д — there is no data.

вблизи Нарьян-Мара происходит при более низком стоянии уровня в Большой Печоре. На участке поста Ермицы затопление поймы в 23 % случаев происходило дважды за одно половодье — второй раз с прохождением «Усинской волны», сформированной половодными водами р. Усы — крупного правобережного притока р. Печоры.

Превышение отметки НГЯ случается в среднем в 25–50 % случаев опять с самыми низкими показателями на посту Нарьян-Мар (20 %) и наиболее высокими на посту Осколково (68 %, с учетом отметки НГЯ до 1998 г.). Повторяемость случаев превышения отметки ОЯ <10–14 %. Частота превышения НГЯ и ОЯ возрастает к морскому краю дельты, несмотря на распластывание волны половодья. Последний тезис пояснен в работе [8]: половодные подъемы уровня ниже Нарьян-Мара уменьшаются и в процентном выражении составляют (от величины в Нарьян-Маре): 85 % — в 90 км, 60 % — в 70 км, 50 % — в 50 км, 25 % — в 7 км от устьевого створа. Возможно, в этом же направлении влияет снижение высотных отметок местности и увеличение влияния подпорных явлений, в том числе со стороны моря. О возможностях последнего фактора увеличивать риск затопления сообщают и авторы гидродинамической модели устьевой области Печоры [16]. Этот же фактор будет одним из основных в ухудшении ситуации с затоплениями в дельте Печоры из-за прогнозируемого подъема уровня Баренцева моря.

2. В многолетнем плане повторяемость затоплений (в силу изменений максимального уровня половодья) практически не меняется. Все тренды (и убывающие для постов Ермицы, Нарьян-Мар, Андег, и возрастающие для поста Оксина, и нейтральный для поста Осколково) статистически незначимы по критерию Спирмена (при $\alpha = 5\%$). На разностных интегральных кривых для разных постов была обнаружена схожая цикличность в многолетних колебаниях высших уровней с примерной продолжительностью самых долгопериодных циклов в 25 лет (см. рис. 3), и, по-видимому, река находится еще на этапе повышенных уровней воды с высоким риском затоплений.

3. Продолжительность (T) затопления, наоборот, испытала значительные многолетние изменения (рис. 4): длительность затопления поймы повсеместно увеличивалась, тогда как T превышения уровнем отметки НГЯ выросла на постах на придельтовом отрезке и снизилась в дельте. Все это укладывается в концепцию, с одной стороны, увеличения объема стока половодья, расходов и уровней воды в основной его части, а с другой, некоторого снижения максимальных расходов на его пике [29]. В итоге средняя продолжительность затопления поймы оказалась равной 10–30 сут (с максимальной величиной на участке поста Осколково в 50 суток) (таблица). Максимальная T может достигать 1,5–3 мес. Длительность неблагоприятных затоплений существенно меньше — в среднем от 0,5 до 1 нед., максимальная — до 2,5 нед. Получены связи между максимальными за год уровнями (H_{\max}) и продолжительностью затопления, но они оказались слабыми, за исключением поста Нарьян-Мар. На характер связи заметное влияние оказывают условия, сопровождавшие формирование H_{\max} : обусловлен ли он только прохождением максимальных расходов воды, или еще были ледовые явления и, прежде всего, заторы льда. Поэтому при их применении авторы рекомендуют использовать верхнюю огибающую как максимально возможную продолжительность при наблюдаемом или прогнозируемом уровне. Для поста Оксина ее можно приблизительно описать уравнением: $T = -0,00033H_{\max}^2 + 0,59H_{\max} - 215$.

4. Глубина затопления поймы варьирует от 1,0 до 2,5 м, максимальная — до 4,5 м (см. таблицу). Такие же величины дает и гидродинамическая модель для дель-

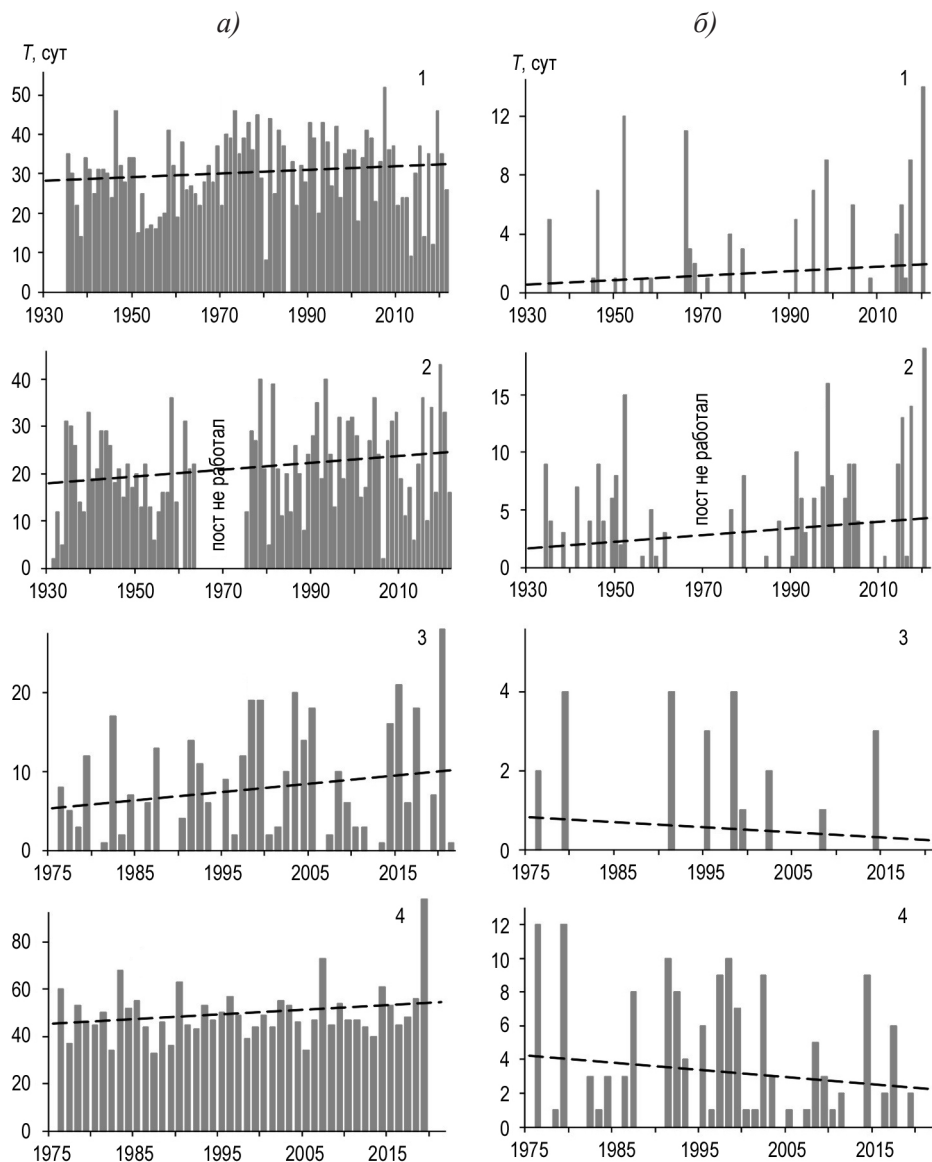


Рис. 4. Многолетние изменения продолжительности затопления поймы (а) и превышения уровнями половодья отметки неблагоприятного явления (б), с линейными трендами, на постах Ермицы (1), Оксино (2), Нарьян-Мар (3) и Осколково (4)

Fig. 4. Long-term fluctuations in the duration of floodplain flooding (a) and flood levels exceeding the adverse event mark (b), with linear trends, at the gauges of Yermitsa (1), Oksino (2), Naryan-Mar (3) and Oskolkovo (4)

ты Печоры [16]. Обнаружена интересная закономерность: к Нарьян-Мару глубина затопления снижается в 2–2,5 раза, затем к морю вновь увеличивается. Величина превышения отметок НГЯ составила 0,3–0,7 м, максимальная не превышала 1,5 м.

5. Высшие уровни весеннего половодья, как и генерируемые ими опасные затопления, обычно наблюдались во второй и третьей декадах мая, первой декаде июня. На посту Ермицы доля этих месяцев составила 65 % (по данным за 1935–2021 гг.), в Оксино — 78 % (1917–1963, 1975–2021 гг.), в Нарьян-Маре — 84 % (1936–2021 гг.). Самое опасное время в плане прохождения высших уровней воды — это 10 мая — 2 июня (Ермицы), 12 мая — 6 июня (Оксино), 14 мая — 5 июня (Нарьян-Мар). Причем на посту Ермицы опасным можно также считать период с 10 по 20 июня — во время так называемой «Усинской волны половодья» и, по сути, в условиях уже открытого русла. Высшие уровни наблюдаются все раньше: на 7 дней на посту Ермицы (в 1991–2021 гг., по сравнению с 1936–1990 гг.) и на 2–3 дня на постах в дельте.

Даты начала образования заторов льда опережали даты наблюдаемых на постах максимальных уровней в среднем на 7 сут на посту Ермицы и на 5 сут на посту Оксино. Поэтому опасными декадами в плане заторообразования считаются: для Ермицы — первая–третья декады мая (со средней датой 18 мая), для Оксино — вторая–третья декады мая и в меньшей мере первая декада июня (со средней датой 22 мая).

6. При сопоставлении данных с постов и сведений по факту наводнений, в частности для Нарьян-Мара, по которому больше всего информации, подтвердились сведения из работы [6], в которой сообщалось, что почти каждый второй год город подвергался затоплениям и критическим уровнем была отметка в 550 см. По-видимому, для отдельных районов г. Нарьян-Мара (в прибрежной зоне) эта отметка сохранилась и в настоящее время, тогда как опасные и особо опасные затопления случаются при уровнях выше 600–620 см и 670 см.

Вообще основной ущерб в устье Печоры возникает при затоплении именно г. Нарьян-Мара. В картах к «Проекту изменений в генеральный план МО «Городской округ «город Нарьян-Мар»» [30], по состоянию на 2020 г., приводятся границы подверженной затоплению части города при достижении уровнем в Большой Печоре отметки ОЯ (670 см). Границы таких же опасных районов приводятся в «Паспорте безопасности территории МО «Приморско-Куйский сельсовет»» уже для сельских поселений.

Самое первое известное наводнение случилось в районе г. Нарьян-Мара еще в 1912 г., когда собственно города еще не было, но был лесозавод «Стелла Поларе». Уровень во время него поднялся до отметки в 740 см. Первое масштабное наводнение произошло в 1952 г. ($H_{\max} = 706$ см на посту Нарьян-Мар и 816 см на посту Оксино (см. рис. 3)). Были затоплены центр города и прилегающие районы, по центральной улице Смидовича можно было передвигаться только на лодках. Следующие наводнения, о которых сохранились документальные свидетельства, в частности в городском Ненецком краеведческом музее и местной газете «Нарьяна вындер» («Красный тундровик»), были здесь в 1966, 1972, 1976, 1977 и 1979 гг. Одно из масштабных наводнений случилось в начале июня 1998 г. Максимальный уровень во время него поднялся до отметки в 672 см, а на посту Оксино — до 846 см. В результате было затоплено 1676 домов из 2620 на 65 % территории города, 15 объектов экономики, 60 объектов торговли и питания, 12 школ и 30 % объектов здравоохранения, 7 котельных и 31 км дорог; были эвакуированы 49 человек. Жертв удалось избежать. Военные самолеты Су-24 сбросили на ледовые заторы несколько десятков 250-килограммовых авиабомб; также в устранении заторов участвовали саперы. Затоплению подверглись (полностью или частично) также сельские населенные пункты Мархида, Тошвиска, Великовисочно, Лабожское, Оксино, Макарово, Андег, Красное, Осколково, Куя, Нарыга. Общий ущерб составил 52 млн руб. в ценах

1998 г. В 2008 г., также в начале июня и при уровне 624 см, было затоплено около 25–30 % территории города. В конце мая 2014 г. по всему устьевому участку Печоры прокатилось очередное масштабное наводнение. В г. Нарьян-Маре (при $H_{\max} = 642$ см) в зоне затопления оказались 126 домов, пострадали районы «Старый аэропорт», Малый Качгорт, поселки Лесозавод и Сахалин. Следующие наводнения были в 2015 и 2017 гг., причем по причине плохого состояния противопаводковой дамбы.

С целью более глубокого понимания механизмов развития затоплений в районах размещения населенных пунктов, установления границ опасных зон и обоснования эмпирических связей между данными стационарных наблюдений и спутникового зондирования на даты весенних разливов речных вод были отобраны и обработаны космические снимки начиная с 1991 г. В результате:

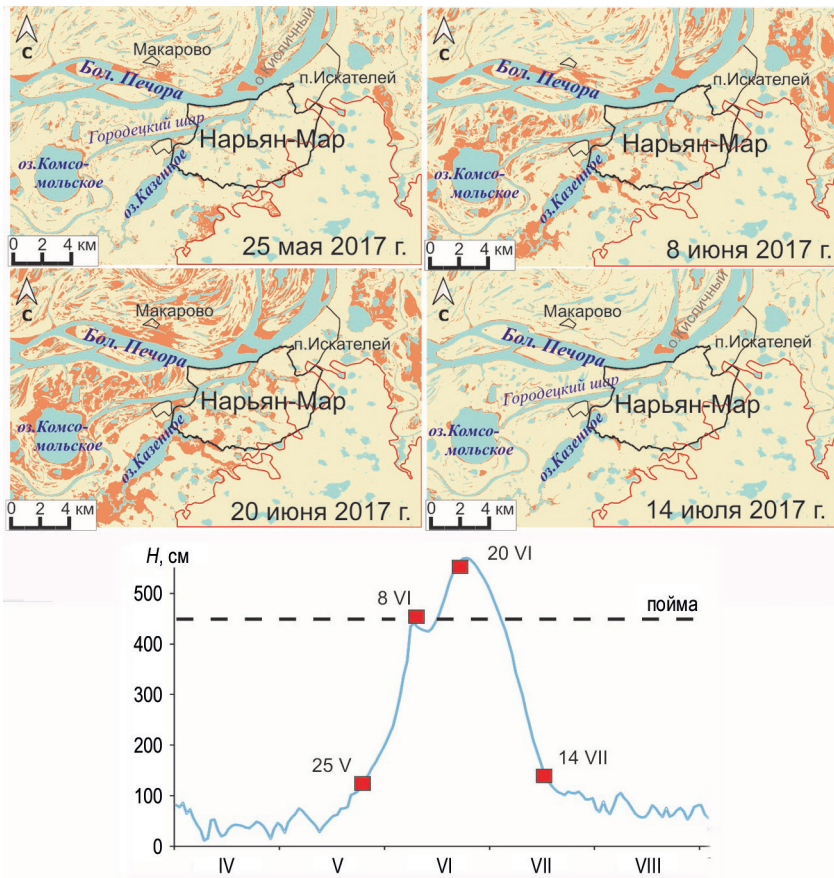


Рис. 5. Картосхемы развития затопления в районе г. Нарьян-Мара в половодье 2017 г. с графиком колебаний среднесуточных уровней на посту Нарьян-Мар с 1 апреля по 31 августа 2017 г. Затопленные территории показаны коричневым цветом, красной линией — незатопляемые районы, черной — границы населенных пунктов

Fig. 5. Maps of flooding development in the Naryan-Mar city during the spring flood of 2017 with a graph of daily levels, from April 1 to August 31, 2017.

The flooded territories are shown in brown, the red line shows areas that are not flooded, the black line denotes the borders of settlements

1. Был детально изучен сам процесс начала, развития и завершения затоплений в двух секторах устьевом участке Печоры (рис. 1) — при разных расходах и уровнях воды, ледовых условиях. Примеры этих схем приведены на рис. 5 и 6.

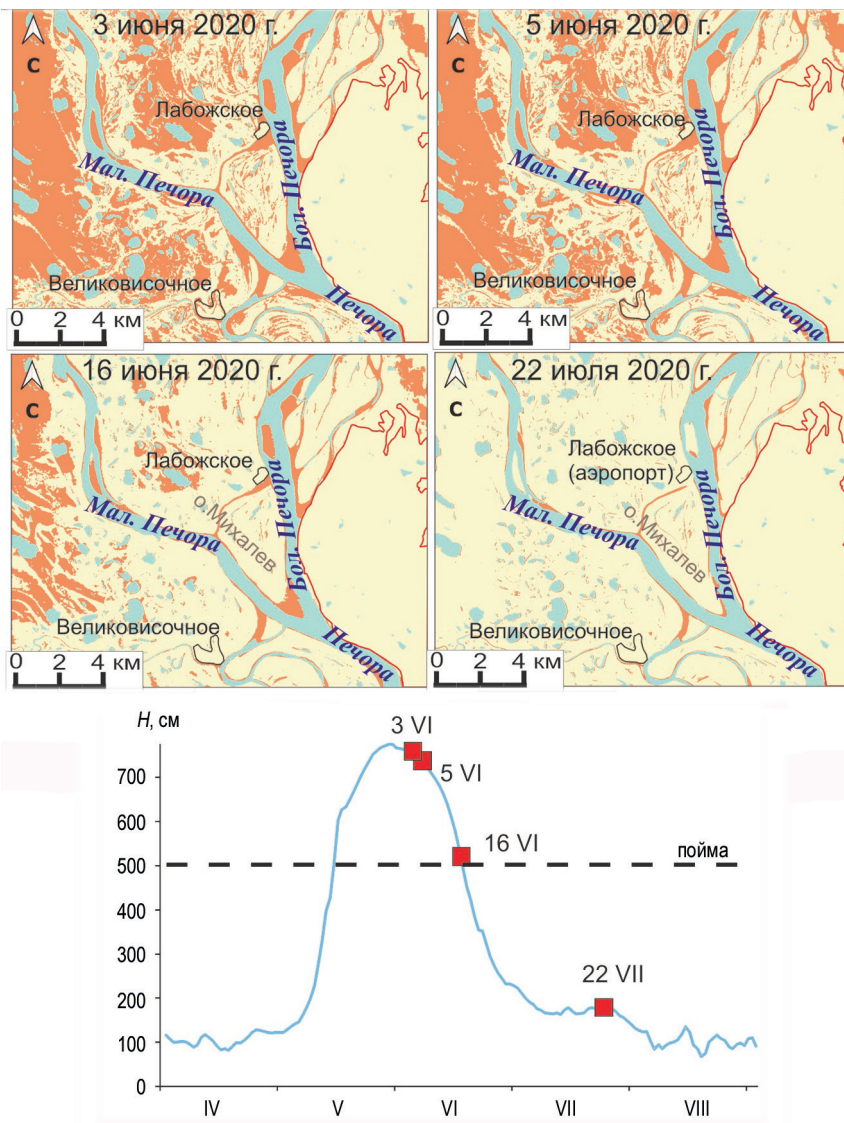


Рис. 6. Картограммы развития затопления в районе аэропорта Лабожское в половодье 2020 г. с графиком колебаний среднесуточных уровней на посту Оксина с 1 апреля по 31 августа 2020 г. Затопленные территории показаны коричневым цветом, красной линией — незатопляемые районы, черной — границы населенных пунктов

Fig. 6. Maps of flooding development in the Labozhskoe during the spring flood of 2020 with a graph of daily levels (gauge Oksino), from April 1 to August 31.

The flooded territories are shown in brown, the red line shows that areas that are not flooded, the black line denotes the borders of settlements

Установлено, что, хотя уровнем выхода на пойму на посту Нарьян-Мар считается 450 см, а отметки НГЯ и ОЯ еще выше, к примеру, район Качгорт и участок между Большой Печорой и Городецким Шаром, по утверждению местных жителей и газет, страдающие от разлива речных вод значительно чаще, чем центральные районы города, действительно начинают затопливаться при уровнях меньше 350 см, с заметным увеличением площади затопления при уровнях >350–400 см.

2. Установлены границы и определены площади затопления для всех случаев, когда это наблюдалось и были кондиционные спутниковые снимки на эти даты. Для Нарьян-Мара и его окрестностей определялись дополнительно объекты (их число, тип), попавшие в зону затопления, сведения по которым предоставляет база пространственных данных отдела Геоинформационных систем Ненецкого информационно-аналитического центра (НИАЦ).

3. Для первого (Великовисочное и Лабожское) и второго (г. Нарьян-Мар и его окрестности) полигонов построены эмпирические зависимости между уровнями воды (H) и площадью затопления (F). Они нелинейные: $F(\text{№ 1}) = 0,00026H^2 - 0,07H + 10,3$ (по уровням Оксина), $F(\text{№ 2}) = -0,000074H^2 + 0,17H - 5,73$ (по уровням Нарьян-Мара). Для полигона № 2 $R^2 = 0,92$. Причем теснота этой связи сильно не меняется при использовании только оптических ($R^2 = 0,94$) или только радиолокационных снимков ($R^2 = 0,88$), которых меньше. Незначимые различия между связями, обоснованными по разным типам снимков, доказывают возможность их совместного использования. Для первого полигона $R^2 = 0,95$. С максимальными расходами воды связь площадей затопления намного слабее и не такая выраженная.

В свое время, в 2012 г., В.Ф. Полонским (ГОИН) при обработке 4 спутниковых снимков (МК-4 Ресурс Ф1 и Landsat 9) на даты 09.09.1985, 26.06.1990, 12.06.1993 и 19.06.2000 была получена связь между уровнями на посту Андег и площадью дельты (% общей площади), покрытой водой. Согласно ей, при уровнях примерно до 250 см она не превышала 40 %, а при уровне в 600–640 см и выше она стремилась к максимально возможным (с учетом рельефа дельты) величинам.

4. Также было проанализировано возможное влияние заторов на масштабы затопления. Хотя используемые снимки фиксируют обстановку в разные этапы развития половодья, как для первого, так и для второго полигона наибольшие по площади затопления наблюдались в годы с заторными явлениями. С продолжительностью заторов связь площади затопления не выявлена.

В итоге установлено, что полученные с использованием материалов дистанционного зондирования данные достаточно четко согласуются с материалами наземных наблюдений и документальными свидетельствами.

Опасные обмеления

Опасное обмеление рек, дельтовых водотоков и водоемов, включая устьевое взморье, обнаруживает себя критическим понижением уровней воды и глубин [4]. Его основными причинами могут быть значительное уменьшение расходов воды, ветровые сгоны, мощные и продолжительные зажоры выше по течению, сочетание нескольких процессов. Глубины могут уменьшаться также из-за отложения наносов и повышения отметок дна.

Устьевая область Печоры занимает важное место в обеспечении Ненецкого АО и Республики Коми основными жизненно важными товарами и в вывозе производимой в регионе продукции. Здесь находится крупный речной и морской порт —

г. Нарьян-Мар. В период навигации водным транспортом в Ненецкий АО доставлялось около 85 % всех грузов (по состоянию на 2016 г.). До недавнего времени (до 2023 г.) до Нарьян-Мара можно было добраться летом–осенью только авиатранспортом или на пароме. Большинство сельских населенных пунктов в устье по-прежнему связаны между собой и с Нарьян-Маром только благодаря водному транспорту.

Морская навигация в устье Печоры длится с июня до середины ноября, речная — с конца мая по начало октября. В июле, августе и сентябре судоходство на реке и в ее устье лимитируют низкие уровни и недостаточные глубины, например, на Куйских перекатах и устьевом баре. Последнее неблагоприятное событие было летом 2022 г., когда уровень на посту Нарьян-Мар снизился до неблагоприятной отметки. Навигация на реке остановилась на несколько недель, и возвращающиеся из отпусков жители города не могли попасть домой. Был введен режим ЧС. Предыдущие неблагоприятные события, о которых достоверно известно, наблюдались летом 2016 г. и 2018 г. В последнем случае пассажирские перевозки не пострадали, тогда как грузоперевозки снизились на 30 %. Одна из причин этих событий — многолетнее (почти 20–30 лет) отсутствие дноуглубительных работ, которые в советское время проводились почти ежегодно [24].

В работе [2] ситуация с опасными обмелениями анализировалась с учетом всех минимальных уровней — как во время навигационного сезона, так и за его пределами. В итоге по данным стационарного мониторинга на устьевом участке Печоры оказалось, что почти все случаи критического снижения уровней воды пришлось на календарную зиму и весну. Они могли иметь стоковый, стгонный или смешанный генезис. Если брать период с 1950 по 2017 г., то из примерно 18–20 событий (в дельте) 61 % пришлось на март–апрель, 26 % — на февраль. Наиболее сложными, по-видимому, были 1952, 1956, 1966, 1970, 1979, 1985 гг. и, особенно, 1974, 1977 и 2010 гг.

В настоящей работе рассмотрены только критические обмеления в навигационный сезон, поскольку именно они способны создавать какой-то ущерб. При этом использованы данные по постам, начиная от Усть-Цильмы и заканчивая Осколково, за период с 1936 по 2022 г. Отметка НГЯ для Усть-Цильмы — 75 см. Для Ермицы такой отметки найти не удалось. Для постов в дельте отметки НГЯ взяты по состоянию на 1980–2000-е гг. из справочников «Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев» (Том 2. Том 3. Часть 1–2). Анализ данных показал, что в навигационный сезон случаи снижения уровня на постах в дельте ниже критических отметок единичные: Оксина — ни одного, Нарьян-Мар — 4 (повторяемость 4,6 %), Осколково — 1 (за 1978–2021 гг.), Андег — ни одного (за 1975–2019 гг.). Тогда как на посту Усть-Цильма повторяемость таких событий составила 46 %. Таким образом, нарушение речного судоходства на устьевом участке в подавляющем большинстве случаев связано не с низкими уровнями в дельте, а с обмелением в русле реки выше по течению — на протяжении нижнего течения и выше него. В результате суда из портов в Республике Коми не могут спуститься в устье Печоры и, наоборот, корабли, осуществляющие Северный завоз, не могут подняться вверх по течению. Причем не обязательно, чтобы критическое снижение уровней в среднем течении Печоры (выше устья р. Усы) охватывало бы и нижнее течение реки. Так, например, было летом в кризисный 1966 г. [24]. В среднем этот проблемный период на посту Усть-Цильма длится с 11 августа по 6 сентября, с самой ранней датой 18 июля (2013 г.). Его средняя продолжительность 24 сут, максимальная — 72 сут (2011 г.). Средние даты

наступления минимальных уровней летне-осеннего сезона: 24 августа (Усть-Цильма), 27 августа (Ермицы), 28 августа (Оксино) и 2 сентября (Нарьян-Мар).

В многолетнем плане ситуация с минимальными уровнями в летне-осенний сезон на всех рассматриваемых постах улучшилась (см. рис. 2). В 1991–2021 гг. (по сравнению с предыдущим периодом) уровни повысились на 0,15 м (Усть-Цильма), 0,35 (Ермицы), 0,17 (Оксино) и 0,16 м (Нарьян-Мар). Первый «положительный перелом» случился во второй половине 1970-х гг. (в среднем течении Печоры еще раньше), второй и более выраженный — в начале 1990-х гг. Это отвечает тем положительным изменениям (+22 %), которые произошли с межнным стоком Печоры в августе — с 1990-х гг. Но, поскольку сток в июле и сентябре изменился мало или даже уменьшился (в июле на 11 %), нельзя говорить, что ситуация с ограничениями по глубине для судов улучшилась или улучшается. Особенно это относится к последним 15 годам. И опять же пример тому — сильное обмеление в августе–сентябре 2022 г. Мало того, многолетним колебаниям количества дней с уровнями воды ниже отметки НГЯ на посту Усть-Цильма присущ хотя и не значимый, но все же возрастающий тренд: увеличение составило 3,5 сут. При сравнении двух периодов значимых изменений в датах прохождения минимальных уровней воды не выявлено.

Ветровые сгоны редко приводят к критическим понижениям уровня воды в дельте. С 1976 г. это было как раз 31 декабря 1976 г., когда уровень на постах Оксино и Нарьян-Мар опустился на 15–20 см ниже отметки НГЯ. Поскольку это было зимой, вне навигационного сезона, это событие не может рассматриваться как неблагоприятное. Возможно, неблагоприятный сгон (на фоне низких стоковых уровней) был в сентябре 1938 г. Максимальные величины сгона у Нарьян-Мара могут достигать 60–80 см. На морском крае дельты они больше примерно на 50 %.

Прочие опасные и неблагоприятные гидрологические явления и процессы

Еще не рассмотренные ОГЯ на устьевом участке р. Печоры — это штормовые нагоны и проникновение морских вод на устьевой участок. Правда, в работе [2] сообщается, что, например, морские колебания уровня действительно оказывают влияние на многие устьевые гидрологические процессы, но в качестве опасных явлений в самой дельте не рассматриваются. По новым данным установлено, что штормовые нагоны, в сочетании с приливами и сильным волнением, приводили к затоплению поселка геологов недалеко от пос. Варандей, разрушению сооружений и других народнохозяйственных объектов, смыву грузов, расположенных в прибрежной зоне. Заметный ущерб от нагонов был в 1976 г. и 29 сентября 1991 г. Больше деталей известно о событиях 5–9 октября 1994 г. Тогда произошло затопление поселка геологов в 3 км на северо-восток от пос. Варандей. Глубина затопления составила 1 м, пострадала часть домов, были разрушены водовод и дамба, размывлась часть берега. Через год, 13–14 декабря 1995 г., пострадал сам пос. Варандей: ветром был разрушен водовод, и 1,5 сут поселок был без питьевой воды, повреждена ЛЭП, частично затоплена жилая часть поселка. Осенью 2005 г. вода во время штормового нагона поднялась до кладбища на Старом Варандее, причал и вертолетная площадка были затоплены (между Старым и Новым Варандеем глубина затопления была до 1 м); в поселке сейсморазведки штормом смыло семь домиков; размывало мост, опять пострадал берег — размыв составил от 3 до 15 м; две баржи с грузом утонули, был один погибший. Последний значительный нагон был 24 июля 2010 г. [31]. Он

привел к значительному затоплению территории, к размыву автодороги, разрыву газопровода, обрыву ЛЭП, нарушению работы метеостанции, разрушению одних хозяйственных строений и погребению других под слоем грунта, перемещению судов на сушу на десятки метров от берега.

Правда, стоит отметить, что эта часть устьевой области Печоры к устьевому участку не относится: она находится, по сути, на границе полузакрытого и открытого устьевого взморья. На самом устьевом участке, полностью находящемся в зоне влияния ветровых нагонов, средняя величина нагона у Нарьян-Мара достигает 65 см, а максимальная — 1,4–1,5 м [8]. Поскольку происходит это обычно в межень, то такой подъем уровня относительно низкого меженного не создает серьезных затоплений. На входе в Большую Печору они, видимо, могут достигать 2–3 м [17], но здесь практически нет построек и инфраструктуры и, следовательно, ущерба. Кроме того, поскольку ледостав на устьевом участке Печоры устанавливается в конце октября (в среднем), часть штормовых нагонов, возникавших в ноябре и декабре, не могли вызвать опасный подъем уровня в дельтовых рукавах.

В отношении проникновения морских вод на устьевой участок, т. е. в дельтовые рукава, известно следующее [5, 8]. Основная устьевая зона смешения речных и морских вод расположена в меженный сезон в Печорской губе; ее ширина 50–60 км. Поступление осолоненной воды на устьевой бар Большие Печоры начинается при расходах в Печоре <4000 м³/с и при сильных нагонах. При расходах <2000 м³/с эти воды достигают уже устьевого створа Большие Печоры, а под влиянием опять же нагонных северных, северо-западных и северо-восточных ветров вода может проникать на 5–7 км вверх по рукаву. При этом соленость в поверхностном слое составляла 5 ‰, а в придонном — 10–15 ‰ (при фоновой солености в море 33–35 ‰). В 1947 и 1948 гг., во время глубокой летне-осенней межени, соленость 10–15 ‰ фиксировалась в поверхностном слое. С установлением припая в Печорской губе дальность проникновения солоноватой воды уменьшается. На дальность проникновения могут влиять дноуглубительные работы, особенно на устьевом баре, как это произошло в устье р. Яны [17].

В еще одной работе, посвященной проникновению морских вод на устьевой участок Печоры, его дальность оценена величиной 85 км — выше д. Куя, до участка «Куйских ям» [32]. Правда, оценки получены по гидравлическим расчетам. Тем не менее во время измерений ниже г. Нарьян-Мара в 1982 г. были обнаружены солоноватые воды в глубоких ямах на дне, но их гидрохимический анализ не проводился, поэтому неизвестно их происхождение. Так или иначе, нет свидетельств того, что водоснабжение населенных пунктов Юшин (в 27 км от Печорской губы), Осколково (53 км) и Нарьян-Мар (95 км), находящихся в зоне возможного проникновения осолоненных вод, каким-то образом испытывало проблемы. Мало того, увеличение стока Печоры обуславливает снижение солености вод в устьевой зоне смешения: на МГ-2 Мыс Константиновский это происходит со скоростью 0,04 ‰ за год (1980–2020 гг.); в течение года она меняется здесь с 25 ‰ в феврале до почти 2 ‰ в июне.

Согласно [33], морфодинамические процессы не имеют опасной интенсивности. Как и во всех устьях, переформирование русел происходит, но, во-первых, не обнаружено сведений о высокоинтенсивных и опасных размывах берегов; во-вторых, отложение наносов в судоходных рукавах и на взморье решается стандартным дноуглублением при условии его регулярности. Морской край дельты Печоры относительно стабилен.

Выводы

На устьевом участке р. Печоры, протягивающемся от устья р. Сулы до Печорской губы, основную угрозу и социально-экономический ущерб создают речные наводнения. Свидетельством этому служат результаты обработки данных многолетних стационарных гидрологических наблюдений (вплоть до 2021–2022 гг.), спутниковых снимков (с 1991 г.) и фактические сведения по самим наводнениям и их последствиям.

Наводнения в устье Печоры имеют стоковый и стоково-заторный генезис. Они сопровождаются весеннее половодье и обычно ледоход, во время которых практически ежегодно затоплялась пойма на участках постов, в 25–50 % случаев (за инструментальный период) наблюдалось превышение уровнями в реке и дельтовых рукавах отметки НГЯ, в менее чем 10–14 % случаев — превышение отметки ОЯ. Серьезнее всего от затоплений страдает г. Нарьян-Мар. По собранным сведениям, серьезные наводнения здесь были в 1912, 1952, 1966, 1972, 1976, 1977, 1979, 1998, 2008, 2014, 2015 и 2017 гг., а по [6], с 1909 по 1968 г. 31 раз высший уровень в Нарьян-Маре превысил критическую отметку. В 1998 г. ущерб от масштабного наводнения составил 52 млн руб. Продолжительность неблагоприятных затоплений в среднем колеблется от 0,5 до 1 недели (без учета остаточных явлений), максимальная достигает 2,5 недели; затопление поймы длится существенно дольше. Самым опасным периодом признаны вторая и третья декады мая, первая декада июня. На придельтовом отрезке опасной можно также считать вторую декаду июня в связи с прохождением «Усинской волны» половодья. Сопоставление данных наземного и дистанционного мониторинга позволило выяснить условия и закономерности разлива речных вод на участках с. Великовисочное, аэропорт Лабожское и г. Нарьян-Мар (с окрестностями), влияние заторов льда, определить границы зон затопления. Построены эмпирические зависимости между уровнями воды на постах и площадью затопления, между высшими уровнями и продолжительностью затопления. Они обладают, в том числе, прогнозным потенциалом. В многолетнем плане повторяемость затоплений практически не меняется — тренды незначимые. Длительность затопления поймы повсеместно росла, тогда как время превышения уровнем воды в реке и рукавах отметки НГЯ увеличилось на придельтовом отрезке и снизилось в дельте. Высшие уровни стали наблюдаться на 2–7 дней раньше.

Еще одно опасное гидрологическое явление — заторы льда — следует рассматривать как один из главных факторов наводнений в устье Печоры. Скопление льда в русле и его навалы на берегах, по имеющимся сведениям, к ущербам приводили очень редко. Установлено, что данные с постов занижают число лет с заторами. Согласно лишь стационарным наблюдениям, повторяемость образования заторов льда равна 27–45 %, а при дополнительном учете результатов сопоставления среднесуточных уровней на соседних постах она выше 60 %. В целом высшие годовые уровни сопровождались ледовыми явлениями в 71 % случаев на посту Оксина и 87–91 % случаев на постах в дельте. Даты начала образования весенних заторов льда опережали даты наблюдаемых на постах высших уровней в среднем на 5–7 сут. Продолжительность заторов варьирует от 1 до 3–5 сут, реже — дольше. Выделены 4 основных сценария вскрытия, которые могут быть основой при разработке мер по предотвращению негативных последствий от заторов льда. Уточнено местоположение основных участков заторообразования. В многолетнем масштабе нет весомых доказательств того, что образование заторов участилось и они стали опаснее.

Третье гидрологическое явление, которое ограничивает хозяйственную деятельность в устье Печоры, — это неблагоприятные стоковые обмеления, нарушающие судоходство на реке и в ее устье. Последнее такое масштабное событие, с объявлением ЧС, случилось в августе–сентябре 2022 г. Установлено, что нарушение речного судоходства на устьевом участке в подавляющем большинстве случаев связано не с низкими уровнями в дельте, а с обмелением в среднем и нижнем течении реки. В результате нарушается сообщение между портами Ненецкого АО и Республики Коми, останавливается Северный завоз. В среднем этот период на посту Усть-Цильма длится с 11 августа по 6 сентября, с самой ранней датой 18 июля (2013 г.). Его средняя продолжительность 24 сут, максимальная — 72 сут (2011 г.). В многолетнем плане ситуация с минимальными уровнями в летне-осенний сезон улучшилась.

В отношении остальных неблагоприятных гидрологических явлений — аномального (по срокам) ледообразования, проникновения морских вод в рукава дельты, штормовых нагонов и сгонов — установлено, что они не создают ущерба либо из-за своей малой интенсивности и повторяемости, либо из-за принадлежности к другим частям устьевой области Печоры.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работы выполнены в рамках тем НИР I.10 кафедры гидрологии суши МГУ по Государственному заданию, № FMWZ-2022-0001 Государственного задания ИВП РАН (наводнения и опасные обмеления) и 2.2 НИР Росгидромета, регистрационный номер АААА-А20-120112690064-2 (затары льда).

Competing interests. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The work was carried out within the framework of the research topics No I.10 of the Department of Land Hydrology of Lomonosov MSU (registration number 121051400038-1), and No FMWZ-2022-0001 of WPI RAS (charts on floods and dangerous shoals), and No 2.2 of Roshydromet, registration number ААААА-А20-120112690064-2 (chart on ice jams).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Михайлов В.Н., Михайлова М.В., Магрицкий Д.В. *Основы гидрологии устьев рек: учебное пособие*. М.: Триумф; 2018. 316 с.
2. Magritsky D., Lebedeva S., Skripnik E. Hydrological hazards at mouths of the Northern Dvina and the Pechora rivers, Russian Federation. *Natural Hazards*. 2017;88(1):149–171. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2673-6>
3. *Справочно-аналитический обзор гидрологического режима устьевой области реки Печора*. Москва; Иваново: ПресСт; 2021. 152 с.
4. Магрицкий Д.В. Опасные гидрологические явления и процессы в устьях рек: вопросы терминологии и классификации. *Наука. Техника. Технология (политехнический вестник)*. 2016;2:35–61.
Magrickij D.V. Dangerous hydrological phenomena and processes in river mouths: issues of terminology and classification. *Nauka. Tehnika. Tehnologija (politehnicheskij vestnik) = Science. Technic. Technology (Polytechnic Bulletin)*. 2016;2:35–61. (In Russ.)
5. Лупачев Ю.В. Гидрологические условия устьевой области Печоры и их возможные изменения при изъятии части стока из бассейна. *Труды ГОИИ*. М.: МО Гидрометеоздата; 1979. 143:49–68.
6. *Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 3. Северный край*. Л.: Гидрометеоздат; 1972. 520 с.
7. Лупачев Ю.В. Особенности динамики весенних ледоходов и заторов льда в устьях Северной Двины и Печоры. *Водные ресурсы*. 2001;28(2):245–249.
Lupachev Ju.V. Features of the dynamics of spring ice flows and ice jams in the mouths of the Northern Dvina and Pechora. *Vodnye resursy = Water resources*. 2001;28(2):245–249. (In Russ.)

8. Полонский В.Ф., Лупачев Ю.В., Остроумова Л.П. Основные черты гидрологического режима устьевой области Печоры. *Труды ГОИН*. М.: МО Гидрометеониздата; 2007. 210:265–284.
9. *Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования*. Под ред. Н. И. Алексеевского. М.: ГЕОС; 2007. 585 с.
10. Банщикова Л.С. Выделение зон затопления при заторных наводнениях (на примере р. Печоры). *Сборник работ по гидрологии*. СПб.; 2011. 28:4–13.
11. Бузин В.А. *Зажоры и заторы льда на реках России*. СПб.: ГГИ; 2015. 240 с.
12. Агафонова С.А., Фролова Н.Л., Василенко А.Н., Широкова В.А. Ледовый режим и опасные гидрологические явления на реках арктической зоны европейской территории России. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2016;6:41–49.
Agafonova S.A., Frolova N.L., Vasilenko A.N., Shirokova V.A. Ice regime and dangerous hydrological phenomena on rivers of the Arctic zone of European Russia. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya = Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography*. 2016;6:41–49. (In Russ.)
13. Сумачев А.Э., Банщикова Л.С. Ледовый режим реки Печора и особенности прогнозирования высшего уровня ледохода. *Гидрометеорология и экология*. 2020;61:446–459. <https://doi.org/10.33933/2074-2762-2020-61-446-459>
Sumachev A.E., Banshnikova L.S. The ice regime of the Pechora River and the features of forecasting the highest ice run level. *Gidrometeorologija i jekologija = Hydrometeorology and ecology*. 2020;61:446–459. (In Russ.). <https://doi.org/10.33933/2074-2762-2020-61-446-459>
14. Грищенко И.В., Водовозова Т.Е. Тенденции в изменении климата и опасных явлений погоды на территории Архангельской области и Ненецкого автономного округа. *Экология человека*. 2011;6:22–27. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_16357326_97887551.pdf
Grishhenko I.V., Vodovozova T.E. Trends in climate change and dangerous weather phenomena in the Arkhangelsk Region and the Nenets Autonomous Okrug. *Jekologija cheloveka = Human ecology*. 2011;6:22–27. (In Russ.). https://www.elibrary.ru/download/elibrary_16357326_97887551.pdf
15. Жбаков К.К., Фатхи М.О. Определение границ зон затопления в устьевой области реки Печоры. В кн.: *Сборник докладов Международной научной конференции Четвертые Виноградские чтения*. СПб.; 2020. С. 441–451.
16. Крыленко И.Н., Алабян А.М., Василенко А.Н., Демиденко Н.А., Панченко Е.Д., Попрядухин А.А. Двумерная гидродинамическая модель устьевой области реки Печоры. В кн.: *Сборник трудов X Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование»*. Том 1. Тверь; 2021. С. 321–324.
17. Михайлов В.Н. *Устья рек России и сопредельных территорий: прошлое, настоящее и будущее*. М.: ГЕОС; 1997. 413 с.
18. Балакина О.Н., Волик В.А., Дуркина Л.М., Полонский В.Ф. Состояние наблюдений и работ в устьевой области р. Печоры. *Труды ГОИН*. М.; 2013. 214:96–107.
19. Алабян А.М., Василенко А.Н., Демиденко Н.А., Крыленко И.Н., Панченко Е.Д., Попрядухин А.А. Приливная динамика вод в дельте Печоры в летнюю межень. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2022;1:167–179.
Alabyan A.M., Vasilenko A.N., Demidenko N.A., Krylenko I.N., Panchenko E.D., Popryadukhin A.A. Tidal flow dynamics in the Pechora River delta during summer low water. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya = Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography*. 2022;1:167–179. (In Russ.)
20. Проскуряков Б.В., Берденников В.П. Метод оценки мощности заторы и зажоры на реках при использовании опорных кривых. *Труды ГГИ*. Л.: Гидрометеониздат; 1973. 201:38–64.

21. Винников С.Д. Гидравлический метод оценки заторных масс льда в речных потоках. *Метеорология и гидрология*. 1978;6:62–70.
Vinnikov S.D. A hydraulic method for estimating stagnant ice masses in river flows. *Meteorologija i gidrologija = Russian Meteorology and Hydrology*. 1978;6:62–70. (In Russ.)
22. Банщикова Л.С. Мониторинг процесса заторообразования на реках по пространственно-временным графикам уровня воды. *Метеорология и гидрология*. 2008;9:87–93. <https://doi.org/10.3103/S1068373908090082>
Banshchikova L.S. Monitoring of the process of flooding on rivers according to spatial and temporal graphs of the water level. *Meteorologija i gidrologija = Russian Meteorology and Hydrology*. 2008;33(9):600–604. (In Russ.). <https://doi.org/10.3103/S1068373908090082>
23. Паршуков В.Ф. *Аномальные и катастрофические явления в Коми крае*. Сыктывкар: Коми кн. изд-во; 2005. 128 с.
24. Рочев Р.А. *Судоходство по реке Печоре в XIX — начале XXI вв.: (очерки истории)*. М.: Известия; 2008. 133 с.
25. *Каталог заторных и зажорных участков рек СССР. Т. 1. Европейская часть*. Л.: Гидрометеоздат; 1978. 260 с.
26. Васильев Л.Ю. Весеннее наводнение и противозаторные мероприятия в устьевой области Северной Двины В кн.: *Доклады VI Всероссийского гидрологического съезда. Секция 2. Наводнения и другие опасные гидрологические явления: оценка, прогноз и смягчение негативных последствий*. М.; 2006. С. 223–229.
27. Двино-Печорское бассейновое водное управление Федерального агентства водных ресурсов. Отчет о прохождении половодья и паводков. URL: <http://www.dpbvu.ru/pavodok> (accessed 01.02.2023).
28. Сумачёв А.Э., Банщикова Л.С. Ледовый режим реки Печоры в современных климатических условиях и принципы прогнозирования высшего уровня за период весеннего ледохода. *Успехи современного естествознания*. 2021;10:75–80. <https://doi.org/10.17513/use.37701>
Sumachjov A.Je., Banshchikova L.S. The ice regime of the Pechora River in modern climatic conditions and the principles of forecasting the highest ice run water level. *Uspehi sovremennogo estestvoznaniya = The successes of modern natural science*. 2021;10:75–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37701>
29. Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Харламов М.А., Самсонов Т.Е., Энтин А.Л., Лурьев И.К. Картографирование современного состояния и трансформации водного режима рек Европейской территории России. *Геодезия и картография*. 2020;81(7):14–26. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2020-961-7-14-26>
Frolova N.L., Kireeva M.B., Harlamov M.A., Samsonov T.E., Jentin A.L., Lur'ev I.K. Mapping the current state and transformation of the water regime of the rivers of the European territory of Russia. *Geodezija i kartografija = Geodesy and cartography*. 2020; 81(7):14–26. (In Russ.). <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2020-961-7-14-26>
30. Генеральный план МО «Городской округ «Город Нарьян-Мар»». URL: <https://gkh.adm-nao.ru/> (accessed 02.03.2023).
31. Шабанова Н.Н., Огородов С.А. Варандей-2010 — сильнейший штормовой нагон за всю историю наблюдений: причины, характеристика и последствия. В кн.: *Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов («опасные явления»)*: Мат-лы Междунар. науч. конф. Ростов н/Д.: ЮНЦ РАН; 2019. С. 214–217.
32. Урнышев А.П. *Распространение приливных волн в устьях северных рек*. Сыктывкар: Коми науч. центр; 1993. 124 с.
33. *Эстуарно-дельтовые системы России и Китая: гидролого-морфологические процессы, геоморфология и прогноз развития*. М.: ГЕОС; 2007. 445 с.