

МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕДОВОГО РЕЖИМА В УСТЬЕВЫХ ОБЛАСТЯХ РЕК ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ БЕЛОГО МОРЯ НА ФОНЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

© 2024 г. В. Н. Баклагин*, Н. И. Махальская

Институт водных проблем Севера – Карельский научный центр РАН, Петрозаводск, Россия

**e-mail: slava.bakalgin@mail.ru*

Поступила 19 февраля 2024 г.

После доработки 26 марта 2024 г.

Принята к печати 10 апреля 2024 г.

Представлены результаты статистического анализа данных об основных элементах ледового режима рек западного побережья Белого моря (Республика Карелия и Архангельская область) за период 1956–2020 гг. Выявлены общие закономерности многолетней изменчивости процессов формирования ледового режима наряду с произошедшими климатическими изменениями за рассматриваемый период.

Ключевые слова: реки, ледовый режим, характерные даты, ледостав, период с ледовыми явлениями, климатические изменения, холодный сезон, Белое море

DOI: 10.31857/S2076673424020111

ВВЕДЕНИЕ

Зимний режим рек – неотъемлемая фаза гидрологического режима водотоков; она представляет особый интерес для различных отраслей народного хозяйства. Сведения о процессах формирования и разрушения ледяного покрова на водотоках, их прогнозирование служат основой для таких видов деятельности как судоходство, рыбный промысел, организация ледовых переправ и др., а также используются в гидропрогнозировании в целях предупреждения и предотвращения возникновения чрезвычайных ситуаций (далее – ЧС), наносящих ущерб окружающей среде, объектам жизнеобеспечения и населению. Такие ЧС могут иметь место вследствие опасных гидрологических явлений, возникающих при подъёме уровня воды в реке в результате загромождения затонных явлений и раннего ледообразования (Банщикова, Сумачева, 2021).

Поскольку ошибки при прогнозировании пространственно-временных характеристик ледовых явлений на реках могут привести к негативным последствиям для промышленности и народного хозяйства (ущербам от наводнений, прорыва дамб, разрушения гидротехнических сооружений и др.), изучение сроков и фаз ледового режима рек представляет весьма важную и актуальную научно-практическую задачу. Основные факторы, оказывающие влияние на формирование ледового режима рек, – климатические условия (температурный режим, скорость, направление ветра и пр.), а также водность реки, высота

стояния уровня грунтовых вод (грунтовое питание), скорости течения и другие природно-климатические факторы, что в целом зависит от региональных особенностей и географического месторасположения водотоков (Ресурсы..., 1972; Агафонова и др., 2016). Однако в наибольшей степени процессы ледообразования на реках зависят от складывающихся метеорологических условий (температурного режима), предшествующих началу развития ледовых процессов, и сформировавшегося гидрологического режима (Дебольский и др., 2008).

Исследования ледовых явлений на реках арктической зоны России отечественными гидрологами были начаты в XX в. Результаты исследований на основе собранных многолетних данных обобщены в виде статистических характеристик и типизированных карт ледового режима рек СССР, а также представлены рядом фундаментальных работ (Гинзбург, 1973; Донченко и др., 1987). Многие исследования посвящены изучению влияния изменений климатических условий на формирование ледового режима рек арктического Севера России. Так, по результатам оценки ледового режима в устьевых областях рек российской западной Арктики (Северная Двина, Мезень, Печора, Обь) установлено увеличение различия между наиболее ранней и поздней датами наступления осенних ледовых явлений за периоды 1930–1960 и 1961–2000 гг., например, для р. Северной Двины увеличение составляет 14 дней (Дебольский и др., 2008).

Исследования гидрометеорологических условий в бассейне р. Малой Северной Двины показали уменьшение максимальной толщины льда и сокращение продолжительности ледостава на реках бассейна, а также уменьшение максимальных снеготолщин и сокращение продолжительности залегания снежного покрова на данной территории за 1988–2017 гг. относительно предшествующих десятилетий (1958–1987 гг.) (Георгиевский и др., 2021). Согласно результатам сравнительного анализа по данным водомерных постов, расположенных в разных частях по длине р. Печоры, за периоды 1950–1980 и 1981–2018 гг. на фоне климатических изменений выявлено смещение средних сроков появления льда на 3–8 дней в сторону более поздних дат (Сумачев, Банщикова, 2021). В период 1981–2018 гг. за счёт смещения сроков вскрытия в сторону ранних дат отмечено сокращение на 6 дней продолжительности ледостава относительно периода 1950–1980 гг. на реках Кольского полуострова (Банщикова, Сумачева, 2021).

Современные научно-исследовательские работы, включающие изучение ледовых явлений на реках арктической зоны России, весьма актуальны и необходимы с точки зрения разработки подходов и методологии для прогнозирования и предотвращения ущерба от опасных гидрологических явлений, связанных с ледообразованием (Агафонова и др., 2016) в условиях глобального изменения климата (потепления) и антропогенного воздействия (Джамалов и др., 2015; Агафонова, 2019; Калинин, 2020).

Вопрос в отношении ледового режима рек – притоков западного побережья Белого моря, расположенных в пределах территории Республики Карелии, и влияния на него происходящих климатических изменений изучен недостаточно – исследований, проводимых в этой части бассейна Белого моря, не так уж и много. Примером таких исследований служит работа (Фролов и др., 2018), где авторами установлено, что средняя продолжительность периода с ледовыми явлениями для рек Республики Карелии (бассейна Белого моря) составляет в среднем 180 дней. В работе также представлены результаты сравнительного анализа средних сроков наступления характерных ледовых явлений на реках данной территории за период 1960–1990 гг. и в современных условиях (1991–2014 гг.). Выявлено, что за последние годы (1991–2014 гг.) сроки появления льда и установления ледостава на 5–8 дней сместились в сторону более поздних дат относительно предшествующего периода, а вскрытие и очищение ото льда – на более ранние даты на 3–7 дней, общая же продолжительность периода с ледовыми явлениями уменьшилась на 11–12 дней по сравнению с периодом 1960–1990 гг.

В целом, анализ ряда существующих исследований показал заметное влияние происходящих в последний ряд лет климатических изменений на процессы формирования ледяного покрова рек Европейского

Севера России, в связи с чем требуются уточнения и доработка методик в гидропрогнозировании, которые ныне в значительной степени базируются на устаревших данных.

Цель работы – комплексное исследование многолетней изменчивости основных элементов ледового режима на устьевых участках рек – притоков западного побережья Белого моря (Республика Карелия и Архангельская область) с учётом влияния температурного фона в данном регионе за период 1956–2020 гг.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Подчеркнём, что существенным фактором наряду с температурой воздуха, влияющим на процессы формирования ледового режима рек, является их водность. Однако в данной работе особое внимание уделено повышению температурного фона воздуха, происходящего в последние десятилетия на водоёмах арктической зоны (глобальное потепление), и его влиянию на процессы формирования льда на реках, в связи с чем основной исследуемый фактор – это температура воздуха. В качестве исходной информации в работе использованы данные о среднесуточной температуре воздуха за период 1955–2020 гг. по данным морских гидрометеорологических береговых станций (МС) Гридино, Кемь и Онега государственной наблюдательной сети Росгидромета, расположенных на западном побережье Белого моря в пределах территории Республики Карелии и Архангельской области (рис. 1). Эти данные получены на портале Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД), находящихся в открытом доступе (Всероссийский..., 2024). Поскольку на рассматриваемой территории формирование ледяного покрова на реках происходит, как правило, с конца октября по первую декаду мая, исследованию подлежало сопоставление основных характеристик ледового и температурного режимов в холодный сезон – с октября по май.

Сведения об основных характеристиках ледового режима (о сроках наступления характерных дат ледовых явлений, их продолжительности) притоков западного побережья Белого моря за период 1956–2020 гг. представлены данными девяти гидрологических постов (далее – ГП), территориально расположенных в Республике Карелии и Архангельской области на устьевых участках рек Гридина, Кузема, Поньгома, Кемь, Шуя, Нижний Выг, Сума, Нюхча и Малошуйка (см. рис. 1). Для формирования непрерывных рядов основных характеристик ледового режима перечисленных рек и их дальнейшего исследования использованы материалы Государственного водного кадастра РФ (справочники Росгидромета – ГВК ЕДС, Т. 1, Вып. 7, Ч. 1) за 1956–2007 гг., имеющиеся в библиотеке Карельского научного центра (КарНЦ



Рис. 1. Расположение метеорологических станций и гидрологических постов на западном побережье Белого моря (Республика Карелия и Архангельская область): 1 – метеостанция; 2 – гидрологический пост; 3 – ГЭС

Fig. 1. Location of meteorological stations and hydrological posts on the western coast of the White Sea (Republic of Karelia and Arkhangelsk region): 1 – weather station; 2 – hydrological station; 3 – hydroelectric power station

РАН) и ЕФД НТБ ФГБУ “Государственный гидрологический институт” (ФГБУ “ГГИ”) (Государственный..., 2024). Данные за 2008–2020 гг. получены на веб-сервисе “Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов” (АИС ГМВО), находящемся в открытом доступе (Автоматизированная..., 2024).

В работе в качестве основных характеристик ледового режима рек рассмотрены сроки наступления характерных ледовых явлений: дата появления осенних ледовых явлений (принята дата начала образования устойчивых заберегов, ледохода, шугохода, ледостава и др.); дата начала ледостава (принята дата первого длительного, не менее 20 дней, ледостава); дата начала весенних ледовых явлений (разрушения льда) – первый день ледохода, в его отсутствие – промоин, закраин, разводий, воды на льду, подвижки льда; дата окончания ледовых явлений (принят последний день с ледовыми явлениями); продолжительность ледостава и периода со всеми ледовыми явлениями (разность между датами их наступления и окончания).

Влияние температурного режима на процессы формирования ледяного покрова для каждой исследуемой реки оценивалось путём определения сумм накопления отрицательных (положительных) температур воздуха от даты перехода среднесуточной температуры воздуха через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в сторону отрицательных

(положительных) значений до даты наступления искомой характеристики ледового режима. Под устойчивым переходом температуры воздуха через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ к отрицательным значениям осенью принимался первый день периода, когда сумма отрицательных среднесуточных значений температуры любого из последующих периодов превышала сумму положительных температур, и с точностью наоборот для весны, где определялся устойчивый переход среднесуточной температуры воздуха через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ к положительным значениям.

Поскольку пункты метео- и гидрологических наблюдений расположены на разной удалённости друг от друга (см. рис. 1), показатели температурного режима (значения среднесуточных температур воздуха), влияющие на условия формирования льда на каждой из исследуемых рек, определялись интерполированием, с применением метода обратных взвешенных расстояний (далее – ОВР). Доля оказываемого влияния метеоданных по близлежащей и удалённой МС на расчёт искомого значения температуры воздуха выражается в виде весового коэффициента ω . Весовые коэффициенты $\omega_{МС_i-ГП_j}$ для каждой i -ой МС вычисляются обратно пропорционально геометрическому расстоянию от рассматриваемого j -ого ГП, возведённого в степень p (в работе использовалось $p = 2$):

$$\omega_{МС_i-ГП_j} = \frac{1}{r_{МС_i-ГП_j}^p},$$

где $r_{МС_i-ГП_j}$ – геометрическое расстояние между i -ой МС и j -ым ГП.

Таким образом, среднесуточные значения температуры воздуха T в j -ом ГП вычисляются по формуле:

$$T_{ГП_j} = \frac{\sum_{i=1}^N [\omega_{МС_i-ГП_j} \cdot T_{МС_i}]}{\sum_{i=1}^N \omega_{МС_i-ГП_j}},$$

где $T_{МС_i}$ – среднесуточное значение температуры воздуха в i -ой МС; N – количество МС.

Значимость вычисленных характеристик линейной регрессии оценивалось по критерию Фишера p -value. Полученные значения p -value сравнивались с принятым уровнем значимости в данном исследовании (0.05), на основании чего принималось решение о значимости тренда. Расчёт значений доверительных интервалов Δ выполнен, исходя из предположения о нормальности распределения ошибок регрессии.

Для сравнительного анализа разнородных временных рядов данных использован метод нормирования разностных интегральных кривых модульных коэффициентов, которые вычисляются для всего ряда согласно формуле:

$$k_i = \frac{x_i}{\bar{x}},$$

где x_i – значение гидрометеорологической характеристики в i -ом году; \bar{x} – среднее значение гидрометеорологической характеристики за многолетний период.

Построение разностно-интегральной кривой производится путём последовательного суммирования отклонений модульных коэффициентов от середины ($k - 1$):

$$f(t) = \sum_{i=1}^n (k_i - 1),$$

где n – количество значений временного ряда.

Таким образом, разностная интегральная кривая представляет собой нарастающую сумму отклонений модульных коэффициентов от среднего многолетнего значения ряда \bar{x} на конец каждого i -ого года.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

В результате обработки рядов данных на устьевых участках рек Гридина, Кузема, Поньгома, Шуя, Сума, Нюхча и Малошуйка получены осреднённые характеристики ледового режима рек – притоков западного побережья Белого моря (Республика Карелия и Архангельская область) за период 1956–2020 гг. (рис. 2; табл. 1). Обобщённые расчёты для рассматриваемой

территории приведены без учёта данных о ледовых явлениях на устьевых участках рек Нижний Выг и Кемь, поскольку эти реки зарегулированы расположенными на них гидротехническими сооружениями (каскадами ГЭС) и из-за их работы появление осенних ледовых явлений и установление ледостава, как правило, происходит значительно позже (до полутора месяцев) относительно водотоков с гидрологическими режимом, формирующимся в естественных условиях (см. табл. 1). Например, на устьевом участке р. Нижний Выг у города Беломорска в последние годы (2013, 2016–2020 гг.) полного смерзания льда (установление ледостава) не наблюдалось.

Период замерзания на реках западного побережья Белого моря (территория Карелии и Архангельской области) происходит, преимущественно, с третьей декады октября по третью декаду ноября. При раннем похолодании в отдельные годы (1961, 1974 гг.) первые ледяные образования на рассматриваемых реках наблюдаются в конце первой – начале второй декады октября, в тёплые зимы (1968, 1997, 2006 гг.) – в последних числах ноября. Сначала ледяной покров образуется на водотоках северной части побережья, на неделю позднее – на более южных реках (Нюхча, Малошуйка) (см. табл. 1). Это объясняется прежде всего тем, что ледовый режим рек рассматриваемой

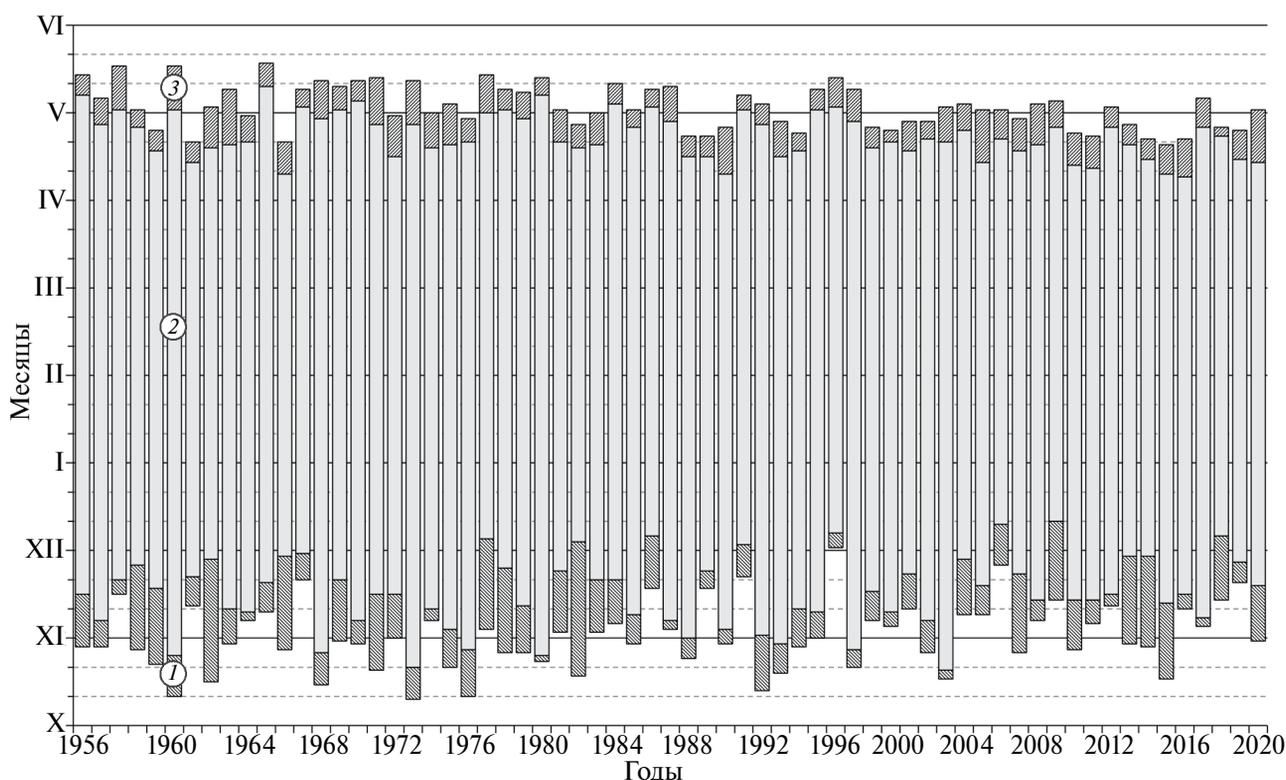


Рис. 2. Сроки наступления фаз ледового режима рек западного побережья Белого моря (Республика Карелия, Архангельская область): заморозание (1), ледостав (2), вскрытие (3) за 1956–2020 гг.

Fig. 2. Timing of the onset of phases of the ice regime of rivers on the western coast of the White Sea (Republic of Karelia, Arkhangelsk region): freezing (1), freeze-up (2), break-up (3) for 1956–2020

Таблица 1. Среднестатистические показатели основных характеристик ледового режима на реках – притоках западного побережья Белого моря (Республика Карелия и Архангельская область) за период 1956–2020 гг.

Гидрологический пост, территория	Средние даты					Средняя продолжительность, дни	
	появления осенних ледовых явлений	установления ледостава	начала разрушения ледовых явлений	окончания ледовых явлений	ледостава	ледовых явлений	
р. Гридина – с. Гридино	31.10	16.11	22.04	03.05	158	185	
р. Кузема – ст. Кузема	29.10	15.11	24.04	05.05	161	188	
р. Поньгома – с. Поньгома	29.10	14.11	25.04	04.05	163	188	
р. Кемь – г. Кемь	13.11	01.01	20.04	02.05	109	170	
р. Шуя – с. Шуерецкое	04.11	09.11	22.04	01.05	164	179	
р. Н. Выг – г. Беломорск	12.11	01.01	18.04	06.05	108	175	
р. Сума – с. Сумский Посад	05.11	19.11	24.04	01.05	156	178	
р. Нюхча – с. Нюхча	05.11	01.12	18.04	30.04	138	176	
р. Малошуйка – ст. Малошуйка	01.11	13.11	18.04	01.05	157	182	
Западное побережье Белого моря (Республика Карелия, Архангельская обл.)	02.11	17.11	22.04	02.05	156	182	

территории формируется в условиях переходной зоны между западноевропейским морским и евро-азиатским континентальным климатом. Морские воздушные массы, поступающие с Атлантического океана, оказывают значительное влияние на формирование ледяного покрова, его устойчивость и продолжительность.

Сумма отрицательных среднесуточных температур воздуха, необходимая для появления первичных ледовых явлений, составляет 4–6 °С (при устойчивом переходе через 0 °С). Дружность появления льда на реках рассматриваемой территории меняется в пределах от одного (1964 г.) до 37 дней (1978 г.), в среднем – 12 дней. Под дружностью появления льда (ледостава) понимается разность в днях между первым и последним сроками появления льда (ледостава) по всей рассматриваемой территории (Ресурсы..., 1972). Длительность переходного периода от начала первичных ледовых явлений до образования устойчивого ледостава составляет в среднем 15 дней, наименьшая – 3 дня (1965, 1988, 2017 гг.), наибольшая – 46 дней (1983 г.). Для рек Карелии характерно отсутствие осеннего ледохода.

На рассматриваемой территории полное замерзание происходит сначала (первая – вторая декады ноября) на плёсовых, более спокойных реках (Кузема, Поньгома, Шуя, Сума), позднее ледостав устанавливается на перекатистых и порожистых реках, зарегулированных каскадами ГЭС (реки Нижний Выг, Кемь) – в январе, феврале. Это объясняется тем, что ледостав в значительной степени определяется не только погодными условиями, но и геоморфологическими. Иногда близкорасположенные участки одной реки замерзают в разные сроки, что зависит от морфометрии, особенностей продольного профиля и других характеристик русла. При раннем и устойчивом похолодании полный ледостав на реках образуется в первой декаде ноября (1957, 1961, 1969, 1971, 1974, 1981, 1993, 2000, 2017 гг.), в тёплые зимы (1978, 1983, 1987, 1992, 1997, 2006, 2007, 2009, 2018 гг.) – в декабре. Ранние сроки (21 октября) образования ледостава отличаются от средних (17 ноября) на 27 дней, поздние (12 декабря) – на 25 дней. Сумма среднесуточных отрицательных температур, необходимых для образования ледостава, составляет 32–45 °С. Дружность ледостава изменяется от 3 (1960 г.) до 83 дней (2007 г.), средняя – 27 дней. Средняя продолжительность ледостава колеблется от 131 до 192 дней (156 дней).

Разрушение ледяного покрова весной происходит, как правило, во второй половине апреля, средняя дата вскрытия – 22 апреля (см. табл. 1). Наиболее ранние сроки начала разрушения льда отличаются от средних на 14 дней, наиболее поздние – на 16 дней. Сумма положительных среднесуточных температур воздуха, необходимых для вскрытия, составляет 12–19 °С. Средняя дружность вскрытия – 11 дней, при затяжных перебойных вёснах продолжительность

распространения разрушения льда составляет 31 день (2000 г.), в дружные весны – 2 дня (1968, 1979 гг.). Весенний ледоход на реках Карелии развит слабо, на всём протяжении реки вскрытие происходит не одновременно. Сначала ото льда освобождаются участки близ истоков из озёр и порожиные области, затем плёсовые и озеровидные расширения. В последние годы разрушение ледяного покрова на реках Гридина, Кемь, Сума, Нижний Выг происходило без ледохода.

Полное очищение рек ото льда (окончание ледовых явлений), как правило, приходится на начало мая. Наиболее ранние сроки очищения от средних отличаются на 13 дней, наиболее поздние – на 15 дней. Сумма положительных среднесуточных температур воздуха, необходимых для полного разрушения льда, составляет 38–47 °С. Средняя дружность полного очищения ото льда – 11 дней, при затяжных перебойных вёснах продолжительность распространения разрушения льда достигает 26 дней (1958 г.), в дружные весны – 2 дня (1977 г.).

В результате статистического анализа временных рядов средних за холодный сезон температур воздуха ($T_{X-\nu}$) на западном побережье Белого моря и продолжительности периодов с ледовыми явлениями (D_i) на рассматриваемых реках получены разностные интегральные кривые (рис. 3). Анализ разностно-интегральных кривых показал, что с конца 1980-х годов температурный фон на западном побережье Белого моря заметно возрос, а продолжительность периода с ледовыми явлениями сократилась, что свидетельствует о нарушении стационарности и однородности рядов наблюдений (как температур воздуха за холодный сезон, так и продолжительности периода с ледовыми явлениями) с переломной точкой в 1988 г. Однако с целью приложения результатов работы к общим гидрометеорологическим исследованиям разделение временного ряда выполнено по 1990-му

году для характеристики статистик относительно периода ВМО 1991–2020 гг.

Статистический анализ многолетних колебаний средней температуры воздуха за холодный сезон ($T_{X-\nu}$) (рис. 4) показал, что температурный фон последних лет (1991–2020 гг.) существенно выше (на 1.4 °С), чем в предшествующий ряд лет (1956–1990 гг.) (табл. 2). Результаты расчётов линейных трендов средней за холодный сезон температуры воздуха ($T_{X-\nu}$) показали, что за 1956–2020 гг. и 1991–2020 гг. имеются статистически значимые положительные линейные тренды (α), величины которых соответственно составляют 0.042 ± 0.018 °С/год и 0.079 ± 0.050 °С/год. За 1956–1990 гг. статистически значимого линейного тренда ($p\text{-value} > 0.05$) не выявлено (см. табл. 2). В целом, согласно результатам регрессионного анализа, за рассматриваемый ряд лет (1956–2020 гг.) среднее значение температуры воздуха за холодный сезон ($T_{X-\nu}$) выросло на 2.7 °С (см. рис. 4).

Таблица 2. Параметры регрессионного анализа средней температуры воздуха ($T_{X-\nu}$) за холодный сезон на западном побережье Белого моря (Республика Карелия и Архангельская обл.) за различные временные периоды

Период	$T_{X-\nu}$, °С	$\alpha \pm \Delta$, °С/год	R^2	p-value	Значимость
1956–1990	–4.2	–	0.02	0.457	–
1991–2020	–2.8	0.079 ± 0.050	0.27	0.003	+
1956–2020	–3.6	0.042 ± 0.018	0.27	0.000	+

Примечание. α – значение тренда; Δ – доверительный интервал; R^2 – коэффициент детерминации; p-value – оценка критерия Фишера.

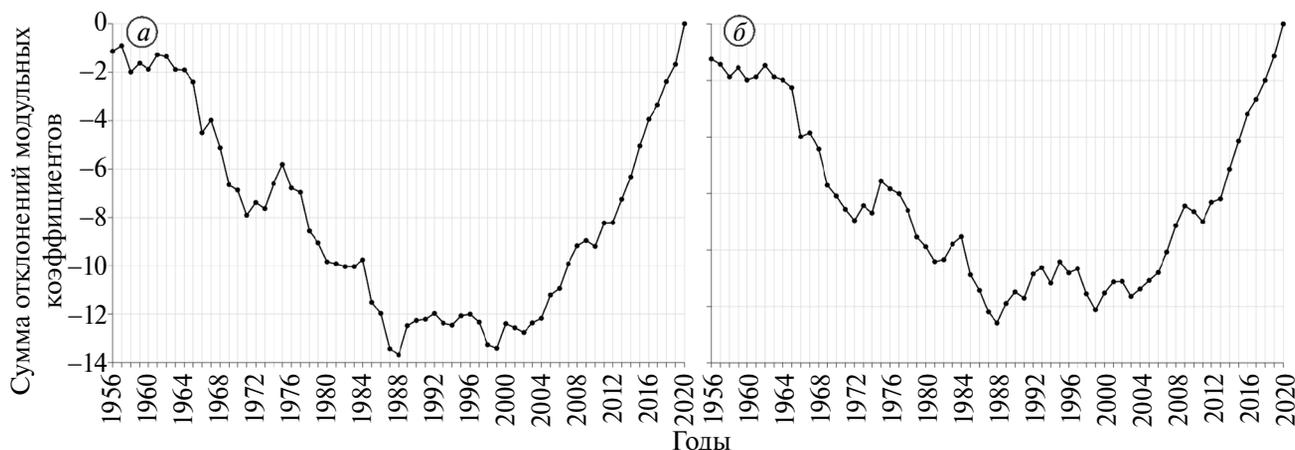


Рис. 3. Разностно-интегральные кривые средней за холодный сезон температуры воздуха (а) и продолжительности ледовых явлений на реках (б) западного побережья Белого моря (Республика Карелия, Архангельская область) за 1956–2020 гг.
Fig. 3. Difference-integral curves of average air temperature for the cold season (a) and the duration of ice phenomena on rivers (b) on the western coast of the White Sea (Republic of Karelia, Arkhangelsk region) for 1956–2020

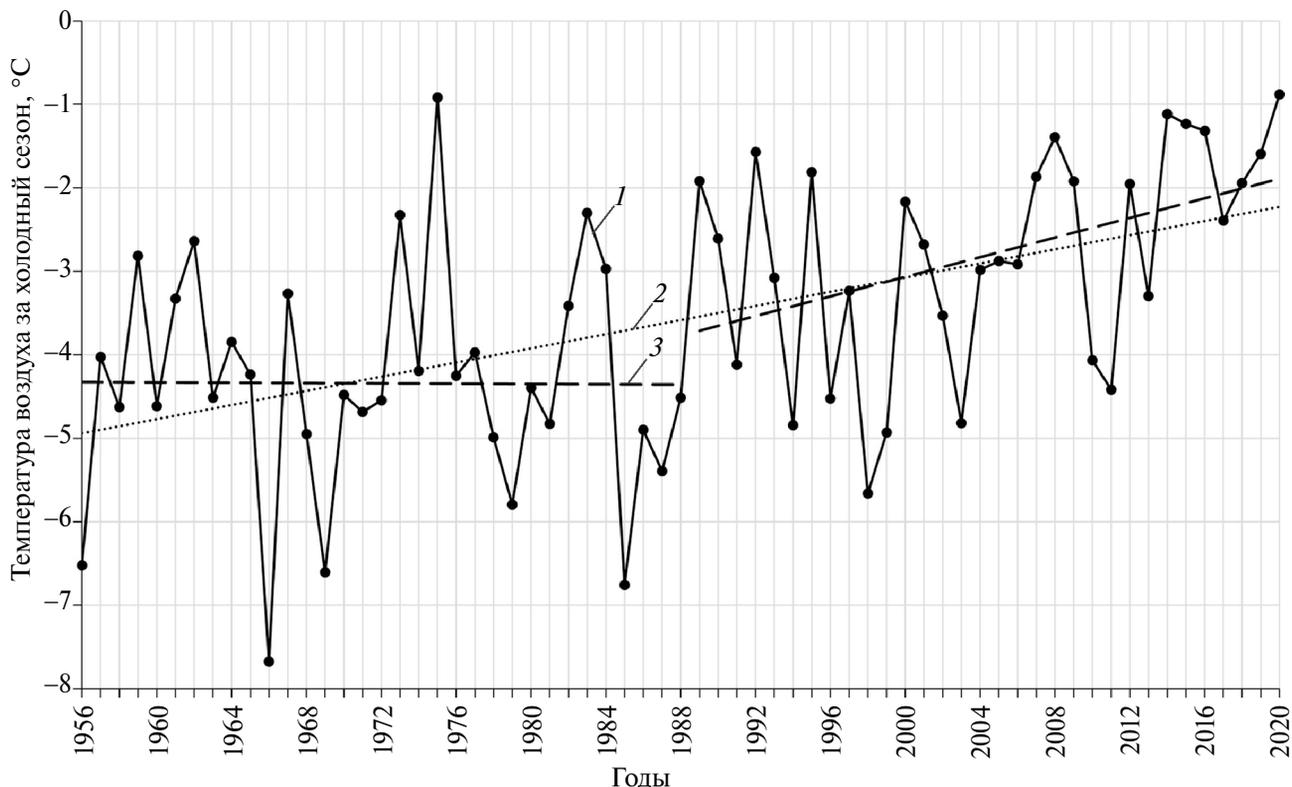


Рис. 4. Многолетние колебания средней температуры воздуха за холодный сезон на западном побережье Белого моря (1) и её линейные тренды за временные периоды 1956–2020 гг. (2), 1956–1990 гг. и 1991–2020 гг. (3)

Fig. 4. Long-term fluctuations of average air temperature during the cold season on the western coast of the White Sea (1) and its linear trends for the time periods 1956–2020 (2), 1956–1990 and 1991–2020 (3)

Таблица 3. Изменение среднемесячных температур воздуха холодного сезона на западном побережье Белого моря (Республика Карелия и Архангельская обл.) в период 1991–2020 гг. по отношению к предшествующему периоду 1956–1990 гг.

Расчетный период	Месяцы								Холодный сезон
	10	11	12	1	2	3	4	5	
1956–1990 гг.	2.3	-3.4	-8.7	-11.9	-10.9	-6.2	-0.8	5.4	-4.3
1991–2020 гг.	3.0	-2.8	-6.3	-9.4	-9.2	-5.0	0.5	6.2	-2.9
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	0.7	0.6	2.5	2.5	1.6	1.2	1.2	0.8	1.4

Наибольшее увеличение температуры воздуха в холодный сезон за последний ряд лет (1991–2020 гг.) по сравнению с предшествующим периодом (1956–1990 гг.) отмечено в декабре – апреле (1.5–2.5 °C), без значительных изменений температурный фон был в осенние месяцы и в мае (табл. 3).

Регрессионный анализ временного ряда продолжительностей периода с ледовыми явлениями за 1956–2020 гг. показал наличие статистически значимого отрицательного тренда (α), который составляет – 3.3 дня/10 лет (табл. 4). В целом за период 1956–2020 гг. по результатам регрессионного анализа продолжительность периода с ледовыми явлениями

уменьшилась на 21 день (рис. 5). Кроме того, отмечается, что в последний ряд лет (1991–2020 гг.) среднее значение этой характеристики на реках рассматриваемой территории сократилось по сравнению с периодом 1956–1990 гг. практически до двух недель (на 11 дней) (табл. 5).

Анализ многолетней изменчивости характеристик ледового режима показал, что в последний ряд лет (1991–2020 гг.) на устьевых участках рек западного побережья Белого моря средние сроки образования устойчивых ледовых явлений сместились на неделю (6 дней) в сторону более поздних дат по сравнению с предшествующим периодом (1956–1990 гг.), ранняя

Таблица 4. Параметры регрессионного анализа основных элементов ледового режима на реках западного побережья Белого моря (Республика Карелия и Архангельская обл.) за различные временные периоды

Основные элементы ледового режима		Период, лет	Среднее значение	α , дни/год	R^2	p-value	Значимость
Даты	появления осенних ледовых явлений	1956–1990	30.10	-	0.01	0.535	-
		1991–2020	05.11	-	0.02	0.443	-
		1956–2020	02.11	0.160 ± 0.147	0.07	0.033	+
	установления ледостава	1956–1990	16.11	-	0.00	0.927	-
		1991–2020	18.11	-	0.11	0.080	-
		1956–2020	17.11	-	0.02	0.235	-
	начала разрушения ледовых явлений	1956–1990	24.04	-	0.01	0.615	-
		1991–2020	19.04	-0.300 ± 0.272	0.15	0.032	+
		1956–2020	22.04	-0.166 ± 0.095	0.16	0.001	+
	окончания ледовых явлений	1956–1990	04.05	-	0.03	0.311	-
		1991–2020	29.04	-0.244 ± 0.237	0.14	0.044	+
		1956–2020	02.05	-0.176 ± 0.090	0.19	0.000	+
Продолжительность, дни	ледостава	1956–1990	160	-	0.00	0.733	-
		1991–2020	153	-0.765 ± 0.518	0.25	0.005	+
		1956–2020	157	-0.265 ± 0.184	0.12	0.006	+
	периода с ледовыми явлениями	1956–1990	187	-	0.04	0.272	-
		1991–2020	176	-	0.10	0.095	-
		1956–2020	182	-0.330 ± 0.162	0.21	0.000	+

Примечание. α – значение тренда; Δ – доверительный интервал; R^2 – коэффициент детерминации; p-value – оценка критерия Фишера.

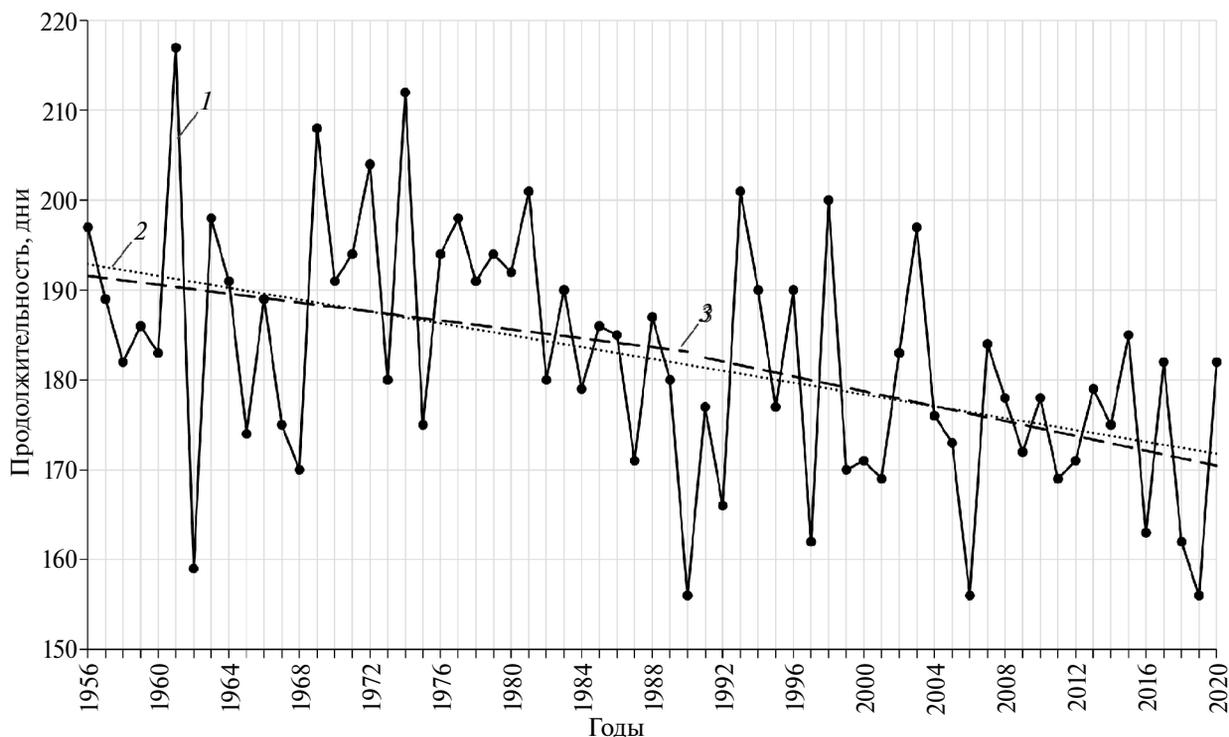


Рис. 5. Хронологический график продолжительности периода с ледовыми явлениями на реках западного побережья Белого моря (1) и её линейные тренды за временные периоды 1956–2020 гг. (2), 1956–1990 и 1991–2020 гг. (3)
Fig. 5. Chronological graph of the duration of the period with ice phenomena on the rivers of the western coast of the White Sea (1) and its linear trends for the time periods 1956–2020 (2), 1956–1990 and 1991–2020 (3)

Таблица 5. Статистические характеристики основных элементов ледового режима рек западного побережья Белого моря (Республика Карелия и Архангельская обл.) за различные временные периоды

Статистические характеристики основных элементов ледового режима			Период			
			1956–1990 гг.	1991–2020 гг.	Смещение, дни	1950–2020 гг.
Даты	начала осенних ледовых явлений	Средняя	30.10	05.11	6	02.11
		Ранняя	11.10	14.10	3	11.10
		Поздняя	21.11	02.12	11	02.12
	установления ледостава	Средняя	16.11	18.11	2	17.11
		Ранняя	22.10	21.10	–1	21.10
		Поздняя	06.12	12.12	6	12.12
	начала разрушения льда	Средняя	24.04	19.04	–5	22.04
		Ранняя	09.04	08.04	–1	08.04
		Поздняя	08.05	02.05	–6	08.05
	окончания ледовых явлений	Средняя	04.05	29.04	–5	02.05
		Ранняя	19.04	20.04	1	19.04
		Поздняя	17.05	13.05	–4	17.05
Продолжительность, дни	ледостава	Средняя	160	152	–8	156
		Наименьшая	131	132	1	131
		Наибольшая	192	181	–11	192
	ледовых явлений	Средняя	187	176	–11	182
		Наименьшая	156	156	0	156
		Наибольшая	217	201	–16	217

дата не претерпела особых изменений, на 11 дней в сторону зимних месяцев сместилась поздняя дата ледообразования. Средние и ранние сроки установления ледостава остались прежними, поздняя дата на 6 дней сдвинулась в сторону зимних месяцев. До недели (5 дней) в сторону ранних дат сдвинулись средние сроки вскрытия и очищения ото льда, ранние даты вскрытия и очищения ото льда не изменились, а поздние сдвинулись на 4–6 дней в сторону зимних месяцев (см. табл. 5). Смещение средних сроков начала осенних и весенних ледовых явлений, а также окончания периода с ледовыми явлениями на реках западного побережья Белого моря (Республика Карелия, Архангельская область) в сравнении периодов 1956–1990 и 1991–2020 гг. хорошо согласуются (разница составляет 1–3 дня) с результатами работы (Фролов и др., 2018), где рассмотрены схожие временные интервалы (1960–1990 и 1991–2014 гг.).

Средняя продолжительность ледостава и ледовых явлений на реках западного побережья Белого моря (Республика Карелия, Архангельская обл.) сократилась соответственно на 8 и 11 дней, наибольшая продолжительность периода с ледовыми явлениями – на 16 дней. При этом в вышеупомянутой работе (Фролов и др., 2018) также отмечается сокращение продолжительности периода с ледовыми явлениями на 12–13 дней, однако зафиксировано большее сокращение ледостава (на 5–6 дней) по сравнению с результатами, полученными в данной работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа многолетних колебаний температурного режима воздуха за холодный сезон на западном побережье Белого моря (Республика Карелия и Архангельская область) показали, что за последний ряд лет (1991–2020 гг.) средняя температура воздуха по наблюдениям на метеостанциях существенно выросла (на 1.4 °C) по сравнению с предшествующим периодом (1956–1990 гг.) и имеет тенденцию к росту 0.42 °C/10 лет. Этот факт соответствует тенденциям глобального потепления, которые отмечают исследователи для водоёмов и рек арктической зоны в последние десятилетия. Такие значимые климатические изменения не оставили без последствий и протекание ледовых процессов на реках исследуемой территории, на которых происходит сокращение продолжительности периода с ледовыми явлениями на 3.3 дня/10 лет, что соответствует уменьшению этого периода почти на три недели (21 день) за рассматриваемый период (1956–2020 гг.). Этот факт обусловлен в равной степени как смещением сроков начала формирования устойчивых ледовых образований в сторону поздних дат (на 1.6 дня/10 лет), так и смещением сроков окончания ледовых явлений в стороны ранних дат (на –1.7 дней/10 лет). Полученные в работе результаты могут быть востребованы для уточнения обобщённых

справочных данных Росгидромета, а также при разработке методик, применяемых в гидропрогнозировании, с учётом произошедших климатических изменений в последние десятилетия.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания № АААА-А18-118032290034-5.

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the theme of the state assignment № АААА-А18-118032290034-5.

ЛИТЕРАТУРА

- Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов // Электронный ресурс. <https://gmvo.skniivh.ru/> Дата обращения: 16.03.2024.
- Агафонова С. А. Исследования ледового режима рек Арктической зоны России в XX и XXI вв. // Арктика и Антарктика. 2019. № 1. С. 81–94. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2019.1.29530>
- 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 // Вест. МГУ. Сер. 5. География. 2016. № 6. С. 41–49.
- Банщикова Л. С., Сумачев А. Э. Вариация температуры воздуха холодного периода на Кольском полуострове как фактор изменения ледового режима // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 3. С. 397–405. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-3-397-405>
- Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – мировой центр данных // Электронный ресурс. <http://meteo.ru/contacts> Дата обращения: 16.03.2024.
- Георгиевский М. В., Горошкова Н. И., Хомякова В. А., Георгиевский Д. В., Пленкина А. К. Влияние климатических изменений в осенне-зимний период на гидрологический режим рек бассейна Малой Северной Двины // Гидрометеорология и экология. 2021. № 64. С. 466–479. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2021-64-466-479>
- Гинзбург Б. М. Вероятностные характеристики сроков замерзания и вскрытия рек // Тр. Гидрометцентра СССР. 1969. Вып. 40. С. 21–40.
- Государственный гидрологический институт // Электронный ресурс. <https://www.hydrology.ru/edinyi-fond-dannux> Дата обращения: 16.03.2024.
- Дебольский В. К., Дебольская Е. И., Котляков А. В., Дербенев М. В., Замятина Э. В. Современная пространственно-временная изменчивость ледовых явлений в устьевых областях рек Российской Западной Арктики // Изв. РАН. Сер. геогр. 2008. № 2. С. 36–42.
- Джамалов Р. Г., Фролова Н. Л., Киреева М. Б., Рец Е. П., Сафронова Т. И., Бугров А. А., Телегина А. А., Телегина Е. А. Современные ресурсы подземных и поверхностных вод Европейской части России: Формирование, распределение, использование. М.: ГЕОС, 2015. 315 с.
- Донченко Р. В., Щеголева Е. В., Коробко А. С. Закономерности формирования и распространения заторов льда на реках СССР // Тр. ГГИ. 1982. Вып. 287. С. 3–15.
- Донченко Р. В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 246 с.
- Калинин В. Г. О выборе репрезентативного расчетного периода наблюдений при изучении ледового режима рек // Географич. вестник. 2020. № 1 (52). С. 120–129. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2020-1-120-129>
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 2. Ч. 1. Л.: Гидрометеоздат, 1972. 527 с.
- Сумачев А. Э., Банщикова Л. С. Ледовый режим реки Печоры в современных климатических условиях и принципы прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода // Успехи современного естествознания. 2021. № 10. С. 75–80. <https://doi.org/10.17513/use.37701>
- Фролова Н. Л., Магрицкий Д. В., Киреева М. Б., Агафонова С. А., Повалишников Е. С. Антропогенные и климатические обусловленные изменения стока воды и ледовых явлений рек Российской Арктики // Вопросы географии. 2018. № 145. С. 233–251.

Citation: Baklagin V.N., Mahalskaya N.I. Long-term variability of ice regime characteristics in river mouth areas of the western coast of the White Sea on the background of climatic changes. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (2): 281–292. [In Russian]. doi 10.31857/S2076673424020111

Long-term variability of ice regime characteristics in river mouth areas of the western coast of the White Sea on the background of climatic changes

V. N. Baklagin*, N. I. Mahalskaya

Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

*e-mail: slava.baklagin@mail.ru

Received February 19, 2024 / Revised March 26, 2024 / Accepted April 10, 2024

The paper presents results of the comprehensive study of the long-term variability of the main elements of the ice regime for the period 1955–2020 in mouth areas of the rivers Gridina, Kuzema, Pongoma, Kem, Shuya, Nizhny Vyg, Suma, Nyukhcha and Maloshuika flowing into the White Sea on its western coast (Republic of Karelia, Arkhangelsk region). The average daily air temperatures in sites of the State observation network of Roshydromet – marine hydrometeorological coastal stations Gridino, Kem and Onega – were used as initial information for this work. Information about the main characteristics of the ice regime (times of coming of characteristic dates of ice phenomena) of the rivers was presented by data from nine hydrological posts. The mean values of characteristics of the ice regime (average statistical dates and durations of the ice regime phases) of the rivers under consideration (except those regulated by the cascade of hydroelectric power stations) were calculated. Statistical analysis of time series of the mean air temperatures obtained for the cold season on the western coast of the White Sea and the duration of periods with ice phenomena on the above rivers made possible to reveal two quasi-homogeneous periods with a turning point in 1990. This analysis shows that the temperature background in years 1991–2020 is significantly higher (by 1.4 °C) than the similar one in 1956–1990, and at the same time the average duration of ice phenomena decreased to almost two weeks (shorter by 11 days). The regression analysis allowed finding the presence of a statistically significant negative trend in the duration of ice phenomena for the whole period (1956–2020), which is –3.3 days/10 years. At the same time, the shortening of the duration of the periods with ice phenomena is due equally to both a shift in the time of the beginning of the stable ice formations towards later dates (1.6 days/10 years), and the earlier dates of the ice phenomena end (–1.7 days/10 years).

Keywords: rivers, ice regime, characteristics dates, freeze-up, period with ice phenomena, climate change, cold season, White Sea

REFERENCES

- Automated information system for state monitoring of water bodies. Retrieved from: <https://gmvo.skniivh.ru/> Last access: 16 March 2024. [In Russian].
- Agafonova S.A. Studies of the ice regime of rivers in the Arctic zone of Russia in the 20th and 21st centuries. *Arktika i Antarktika*. Arctic and Antarctic. 2019, 1: 81–94 [In Russian]. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2019.1.29530>
- Agafonova S.A., Frolova N.L., Vasilenko A.N., Shirocova 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 Moscow University. Episode 5. Geography. 2016, 6: 41–49. [In Russian].
- Banshchikova L.S., Sumachev A.E. The air temperature variability during the cold period on the Kola Peninsula as modification factor of the ice regime. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. Arctic: Ecology and Economy. 2021, 11 (3): 397–405 [In Russian]. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-3-397-405>
- Russian Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center. Retrieved from: <http://meteo.ru/contacts> Last access: 16 March 2024. [In Russian].
- Georgievsky M.V., Goroshkova N.I., Khomiakova V.A., Georgievsky D.V., Plenkina A.K. Impact of climate change in autumn-winter period on hydrological regime of the rivers in the Small Northern Dvina river basin. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Journ. of Hydrometeorology and Ecology. 2021, 64: 466–479 [In Russian]. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2021-64-466-479>

- Ginzburg B. M. Probabilistic characteristics of the timing of freezing and breaking up of rivers. *Trudy Gidrometcentra SSSR. Proc. of the Hydrometeorological Center of the USSR*. 1969, 40: 21–40. [In Russian].
- State Hydrological Institute. Retrieved from: <https://www.hydrology.ru/edinyi-fond-dannyx> Last access: 16 March 2024. [In Russian].
- Debolskii V. K., Debolskaya E. I., Kotlyakov A. V., Derbenev M. V., Zamyatina E. V. Modern spatiotemporal variability of ice phenomena in the estuarine areas of rivers in the Russian Western Arctic. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya. News of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*. 2008, 2: 36–42. [In Russian].
- Dzhamalov R. G., Frolova N. L., Kireeva M. B., Rets E. P., Safronova T. I., Bugrov A. A., Telegina A. A., Telegina E. A. Sovremennye resursy podzemnykh i poverkhnostnykh vod Evropeiskoi chasti Rossii: Formirovanie, raspredelenie, ispol'zovanie. Modern groundwater and surface water resources represent parts of Russia: Formation, definition, use. Moscow: GEOS, 2015: 315 p. [In Russian].
- Donchenko R. V., Shchegoleva E. V., Korobko A. S. Patterns of formation and spread of ice jams on rivers of the USSR. *Trudy GGI. Proc. of the State Hydrological Institute*. 1982, Is. 287: 3–15. [In Russian].
- Donchenko R. V. Ledovyi rezhim rek SSSR. Ice regime of rivers in the USSR. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1987: 246 p. [In Russian].
- Kalinin V. G. On the selection of a representative calculated period of observation in the study of river ice regime. *Geograficheskii vestnik. Geographical Bulletin*. 2020, 1 (52): 120–129. [In Russian]. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2020-1-120-129>
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Surface water resources of the USSR. V. 2. Pt. 1. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1972: 527 p. [In Russian].
- Sumachev A. E., Banshchikova L. S. Ice regime of the Pechora River in modern climatic conditions and principles of forecasting the highest water level during the period of spring ice drift. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. Advances in current natural sciences*. 2021, 10: 75–80. [In Russian]. <https://doi.org/10.17513/use.37701>
- Frolova N. L., Magritsky D. V., Kireeva M. B., Agafonova S. A., Povalishnikova E. S. Runoff and ice phenomena dynamics on the rivers of Russian arctic due to anthropogenic and climate changes. *Voprosy Geografii. Geography questions*. 2018, 145: 233–251. [In Russian].