

УДК 556.535.5

## ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ РЕКИ ПЕЧОРЫ В СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ И ПРИНЦИПЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫСШЕГО УРОВНЯ ВОДЫ ЗА ПЕРИОД ВЕСЕННЕГО ЛЕДОХОДА

<sup>1</sup>Сумачев А.Э., <sup>2</sup>Банщикова Л.С.<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»,  
Санкт-Петербург, e-mail: a-sumachev@mail.ru;<sup>2</sup>ФГБУ «Государственный гидрологический институт»,  
Санкт-Петербург, e-mail: balju@rambler.ru

По данным многолетних наблюдений за 1950–2020 гг. рассмотрен ледовый режим р. Печоры в современных климатических условиях. Выявлено статистически значимое увеличение температуры воздуха за холодный сезон, равное 1,3 °С. Наибольший вклад в общее потепление климата вносят октябрь, март и май. Выявлено значительное влияние увеличения температуры воздуха на сроки образования и разрушения ледовых образований. Отмечается снижение длительности ледостава от 4 до 12 дней. Рассмотрена повторяемость затворов льда в период весеннего ледохода. Отмечается пространственная и временная неоднородность повторяемости затворов льда. По данным многолетних наблюдений повторяемость затворов льда близ ГП Ермицы достигает 53%, ГП Усть-Цильма – 7%, при этом формируются ординарные уровни воды, ГП Оксина – 21%. Представлен анализ высших уровней воды за период ледохода, затворов льда и свободного русла. В зависимости от условий формирования высшего уровня за период весеннего ледохода и географических факторов разработана классификация участков рек, состоящая из трех типов. Предложены принципы прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода в зависимости от условий его формирования. Разработаны и апробированы нейросетевые модели для прогнозирования высшего уровня за период весеннего ледохода в районе с. Оксина. Лучшим качеством выпускаемых прогнозов характеризуются нейронная сеть MLP 2-8-1, оправдываемость прогнозов которой составила 92%, оправдываемость прогнозов, данных по уравнению множественной регрессии, составила 79%. Для MLP 2-8-1 отношение  $S/\sigma_{\Delta}$  на независимом материале составило 0,46, что свидетельствует о высоком качестве выпускаемых прогнозов.

**Ключевые слова:** ледовый режим, прогнозирование, затвор льда, ледоход

## ICE REGIME OF THE PECHORA RIVER IN MODERN CLIMATIC CONDITIONS AND PRINCIPLES OF FORECASTING THE HIGHEST WATER LEVEL FOR THE PERIOD OF SPRING ICE DRIFT

<sup>1</sup>Sumachev A.E., <sup>2</sup>Banschikova L.S.<sup>1</sup>St. Petersburg State University, St. Petersburg, e-mail: a-sumachev@mail.ru;<sup>2</sup>Federal State Budgetary Institution State Hydrological Institute, St. Petersburg, e-mail: balju@rambler.ru

Based on the data of long-term observations for 1950–2020, the ice regime of the Pechora River in modern climatic conditions is considered. A statistically significant increase in air temperature for the cold season, equal to 1.3 °C, was revealed. October, March and May make the largest contribution to the overall climate warming. A significant effect of an increase in air temperature on the timing of the formation and destruction of ice formations was revealed. There is a decrease in the duration of freeze-up from 4 to 12 days. The recurrence of ice jams during the spring ice drift is considered. The spatial and temporal heterogeneity of the recurrence of ice jams is noted. According to the data of long-term observations, the frequency of ice jams near the Ermitsa HP reaches 53%, the Ust-Tsilma HP – 7%, while ordinary water levels are formed, the Oksino HP – 21%. The analysis of the highest water levels for the period of ice drift, ice jams and free channel is presented. Depending on the conditions for the formation of the highest level for the period of spring ice drift and geographical factors, a classification of river sections has been developed, consisting of 3 types. The principles of forecasting the highest water level for the period of spring ice drift are proposed, depending on the conditions of its formation. Neural network models have been developed and tested to predict the highest level for the period of spring ice drift in the area with. Oksino. The best quality of the produced forecasts is characterized by the MLP 2-8-1 neural network, the accuracy of the forecasts of which was 92%, the accuracy of the forecasts, data according to the multiple regression equation, was 79%. For MLP 2-8-1, the  $S/\sigma_{\Delta}$  ratio on an independent material was 0,46, which indicates the high quality of the forecasts issued.

**Keywords:** ice regime, forecasting, ice jam, ice drift

Климатические изменения, связанные с увеличением температуры воздуха, наиболее заметны на территории Арктической зоны Российской Федерации. Увеличение температуры воздуха за холодный сезон года способствовало перераспределению вкладов отдельных факторов на формирование тех или иных фаз ледового режима, что

в свою очередь привело к неопределенности в вопросах оценки и прогнозирования характеристик ледового режима. Неблагоприятные проявления ледового режима нередко приводят к возникновению опасных гидрологических явлений. Это не только наводнения в период ледохода или затора льда, но и продолжительные осенние и ве-

сенные переходные периоды, когда невозможна организация ледовых или паромных переправ и иная хозяйственная деятельность, функционирование которой зависит от гидрологической обстановки. Минимизация рисков и урона, наносимого опасными гидрологическими явлениями, зависит от оценки существующих рисков и их изменений во времени, а также развития методов прогнозирования и оповещения населения.

Целью исследования является комплексное описание ледового режима реки Печоры от села Усть-Цильма до села Оксина и развитие методических подходов к прогнозированию высших уровней воды.

#### Материалы и методы исследования

Исследуемая область относится к Арктической зоне Российской Федерации. В пределах исследуемой области на реке Печоре расположено три гидрологических поста: с. Усть-Цильма, с. Ермицы и с. Оксина, а также две метеорологических станции, расположенные непосредственно в бассейне реки – ГМС Нарьян-Мар и ГМС Усть-Цильма.

Период наблюдений на данных гидрологических постах и метеорологических станциях является достаточным для расчета основных гидрологических и метеорологических характеристик. Так как наиболее полные наблюдения за характеристиками ледового режима начались с 1950 г., то общий период непрерывных наблюдений составляет 70 лет, с 1950–1951 гидрологического года по 2019–2020 гидрологический год (расчетное гидрологическое полугодие принято с октября одного года по май следующего года). Разбиение всего периода наблюдений на базовый и контрольный выполнено с учетом нарушения стационарности рядов наблюдений, таким образом, базовый период выбран с 1950 по 1980 г., контрольный с 1981 по 2020 г.

Однородность рядов оценена при помощи критериев Стьюдента и Фишера. Для оценки линейных трендов использовались критерии значимости выборочного коэффициента корреляции ( $R$ ). Гипотеза об отсутствии тренда не опровергалась при уровне значимости  $2\alpha = 10\%$ , если выполнялось условие  $|R| < 2\sigma_R$ . Критическое значение коэффициента корреляции при данной длительности рядов наблюдений составляет  $R_{\text{крит}} \approx 0,23$ . Приведение рядов метеорологической и гидрологической информации к многолетнему периоду выполнено методом построения регрессионной зависимости за совместный период наблюдений

с привлечением данных наблюдений пунктов-аналогов в однородном районе при условии  $R > 0,70$  [1].

#### Результаты исследования и их обсуждение

Выявлено статистически значимое увеличение средней за холодный сезон температуры воздуха на всех рассмотренных метеостанциях по отношению к базовому периоду. Наибольший вклад в общее потепление климата вносят октябрь, март и май, так как именно за эти месяцы отмечаются статистически значимые тренды и отмечается нарушение однородности рядов по критерию Стьюдента. Среднее увеличение температуры воздуха за холодный период составляет  $+1,3^\circ\text{C}$ , что на  $0,2^\circ\text{C}$  больше, чем в среднем по Двинско-Печорскому бассейновому округу [2]. Средняя многолетняя температура воздуха за холодный сезон составляет  $-8,9^\circ\text{C}$  (табл. 1).

Условия ледообразования и формирования основных фаз ледового режима на Печоре являются типичными для крупных незарегулированных водотоков равнинного типа. Для них характерно ледообразование по всей глубине потока. Замерзание сопровождается образованием шуги и движением ее вниз по течению. Ледовый покров образуется при остановке, сплочении и смерзании льда и шуги [3].

Комплексный анализ сумм температур воздуха, уровней воды и типа ледовых явлений позволил выявить, что первичные ледовые явления независимо от уровня воды образуются в диапазоне сумм отрицательных температур воздуха от  $0$  до  $-31^\circ\text{C}$ , устойчивый ледостав образуется в диапазоне отрицательных температур воздуха от  $-43$  до  $-186^\circ\text{C}$  и имеет относительно тесную обратную зависимость с уровнем воды ( $R = -0,62$ ). Деградация и разрушение ледового покрова начинается с переходом температуры воздуха через  $0^\circ\text{C}$ , высший уровень воды за период весеннего ледохода формируется в диапазоне сумм положительных температур воздуха от  $32$  до  $180^\circ\text{C}$ , связи с уровнем воды за этот период выражены слабо.

Анализ линейных трендов показал статистически значимое уменьшение длительности ледостава за счет смещения сроков замерзания на более поздние и сроков вскрытия на более ранние. Общее снижение длительности ледостава составляет от  $12$  до  $4$  дней в селах Усть-Цильма и Оксина соответственно. Похожие оценки были получены ранее в работах [4, 5], но за более короткий временной промежуток.

**Таблица 1**

Статистические характеристики осредненных рядов среднемесячных температур воздуха

Характеристика	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	Ср. знач. X—V
Ср. знач. 1950–2019	-0,8	-8,4	-12,6	-16,6	-16,1	-11,4	-5,9	0,6	-8,9
Ср. знач. 1950–1980	-1,8	-8,8	-12,8	-16,9	-17,1	-13,0	-6,6	-0,2	-9,6
Ср. знач. 1981–2019	-0,1	-8,1	-12,4	-16,3	-15,4	-10,2	-5,3	1,3	-8,3
СКО 1950–2019	2,7	3,9	4,7	4,4	5,0	4,7	3,9	2,6	1,9
СКО 1950–1980	2,5	4,1	5,1	3,4	4,5	5,0	3,9	2,3	1,7
СКО 1981–2019	2,7	3,8	4,5	5,0	5,3	4,1	3,8	2,7	1,9
Cs	-0,49	-0,24	-0,49	0,04	-0,41	-0,43	-0,11	0,13	-0,57
Cv	3,97	0,47	0,38	0,27	0,31	0,42	0,79	5,32	0,22
D1/D2(F)	1,17	1,17	1,27	2,11	1,34	1,51	1,07	1,37	1,26
Критерий Фишера 2а = 10%, Fкр = 1,76	–	–	–	+	–	–	–	–	–
T	-2,5	-0,7	-0,3	-0,6	-1,4	-2,6	-1,4	-2,5	-3,0
Критерий Стьюдента 2а = 10%, Tкр = 1,67	+	–	–	–	–	+	–	+	+
R	0,26	0,17	0,12	0,03	0,15	0,30	0,23	0,30	0,38
Значимость 2а = 10%	+	–	–	–	–	+	–	+	+

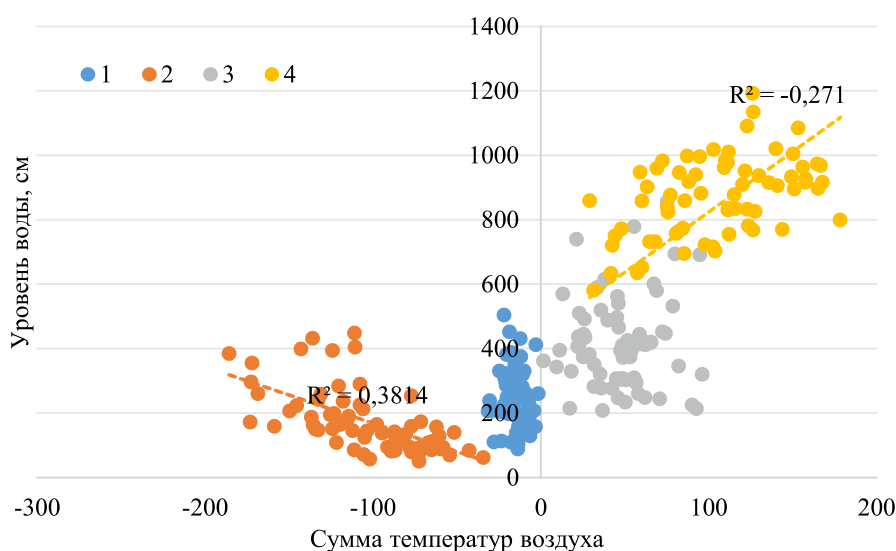


Рис. 1. Условия образования первичных ледовых явлений (1), устойчивого ледостава (2) начала разрушения устойчивого ледостава (3) и формирования высшего уровня за период весеннего ледохода (4) в зависимости от сумм температур воздуха и уровня воды реки Печоры близ ГП Усть-Цильма

Несмотря на высокую длительность весеннего ледохода, на больших реках волна половодья имеет сложный распластаный во времени вид, что определяет формирование высших уровней за год как при ледоходе, так и в условиях свободного русла. По данным наблюдений высшие уровни за год формировались за период с ледовыми явлениями лишь в 19% случаев на участке реки в пределах

Усть-Цильмы, в 47% случаев на участке реки в пределах с. Ермицы и 71% случаев на участке реки в пределах с. Оксина. Таким образом, с увеличением площади водосбора в пределах рассмотренной территории, вероятность формирования высшего уровня воды за год при наличии ледовых явлений повышается, что объясняется более поздними сроками окончания ледохода в устьевых участках.

Таблица 2

Повторяемость формирования высшего уровня за год при заторах льда, ледоходе, отсутствии ледовых явлений и характерные уровни

Гидрологический пост	Повторяемость формирования высшего уровня за год при заторе льда, %	Средний много-летний/высший уровень, см	Повторяемость формирования высшего уровня за год при ледоходе, %	Средний многолетний/высший уровень, см	Повторяемость формирования высшего уровня за год на чистой воде, %	Средний много-летний/высший уровень, см
с. Усть-Цильма	1	774/774	18	888/1018	81	976/1219
с. Ермицы	31	990/1124	16	993/1125	53	957/1099
с. Оксино	16	699/773	55	705/846	29	681/816

Таблица 3

Обеспеченные значения высших за год уровней воды всех генезисов на различных гидрологических пунктах реки Печоры

Обеспеченность, %	Обеспеченные уровни воды, см		
	с. Усть-Цильма	с. Ермицы	с. Оксино
0,1	1289	1184	882
0,2	1267	1173	874
0,5	1235	1157	862
1	1208	1143	852
2	1179	1128	840
5	1134	1102	818
10	1095	1078	798
20	1048	1046	770
25	1030	1034	760
30	1014	1023	749
40	984	1001	730
50	957	980	710

Наиболее затороопасным участком из рассмотренных является участок реки близ с. Ермицы, где повторяемость заторов льда достигает 53%. Среднее значение высшего за год уровня воды заторного происхождения 990 см, для случаев, когда высший уровень за год формировался при ледоходе, среднее значение составило 993 см, на открытой воде – 957 см. При этом стоит отметить что высший уровень за год в 16% случаев формируется при ледоходе, в 31% случаев при заторе и в 53% при свободном ото льда русле (табл. 2). Таким образом, можно заключить, что высший уровень за год примерно в половине случаев формируется на открытой воде, а в половине – при тех или иных ледовых явлениях, при этом наибольших значений высшие уровни воды достигают при ледоходе или заторе льда. Повторяемость заторов льда близ ГП Усть-Цильма составляет 7%, при этом формируются ординарные уровни воды, ГП Оксино – 21%. Повторяемость заторов льда

на ГП Оксино существенно увеличилась в последние годы наблюдений, так, с 2004 г. отмечается 83% от всех случаев заторообразования, при этом формируются высшие за год уровни воды.

Анализ трендов высших уровней воды за период весеннего ледохода (включая заторы льда) показал статистически значимые тренды к снижению, абсолютное значение коэффициента корреляции при этом уменьшается вниз по течению, и близ ГП Оксино снижение уровней является статистически незначимым. Анализ трендов высших за год уровней воды показал статистически незначимое снижение.

В работе были рассчитаны обеспеченные значения высших уровней воды всех генезисов (табл. 3). Обеспеченные высшие уровни воды даны над нулем поста. Отметки начала ОЯ для села Усть-Цильма и с. Ермицы составляют 1030 см, когда начинается подтопление жилых домов [6]. Таким образом, опасные гидрологические

явления на данных участках наблюдаются примерно раз в 4 года. Для с. Оксина уровень ОЯ не определен, затопление поймы начинается при уровне воды 500 см над нулем поста.

Снижение фактических рисков для населения зависит от своевременности и качества выпускаемых прогнозов. Можно отметить, что в настоящее время для прогнозирования высших уровней воды используют различные эмпирические методики. Качество выпускаемых прогнозов при этом зависит от актуальности эмпирической информации, используемой при их разработке. Принцип выбора предикторов для прогнозирования высшего уровня ледохода на различных участках рек зависит от степени стохастичности условий его формирования. Выявлено, что степень стохастичности условий формирования высших уровней за период весеннего ледохода обуславливается географическими факторами (озерность, заболоченность, залесенность, площадь водосбора, приточность, затороопасность) и может быть оценена по зависимости высшего уровня воды за период весеннего ледохода от высшего предледоходного уровня воды. При этом стоит отметить, что высокая стохастичность формирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода предопределяет высокую стохастичность формирования и других характеристик уровня режима. В общем случае можно выделить три типа участков рек. Первый тип – зарегулированные озерами участки реки, отдельные бесприточные участки, где высшие уровни формируются с большой степенью инертности. Ко второму типу относятся крупные незарегулированные реки со множеством притоков, которые способны значительным образом повлиять на ледовый режим и характер вскрытия. Третий тип является промежуточным, к нему в первую очередь относятся предустьевые области рек. Гидрографические, морфометрические и физико-географические особенности реки Печоры обуславливают исключительную стохастичность формирования ее уровня режима, и только участок реки близ с. Оксина можно отнести к третьему типу. Это означает, что для участков реки у с. Усть-Цильма и Ермицы необходим поиск предикторов вне данных постов, так как связь между высшим уровнем ледохода и высшим предледоходным уровнем воды выражена слабо. Оценку же качества выпускаемых прогнозов необходимо выпол-

нить по отношению стандартной ошибки прогноза к стандартному отклонению прогнозируемой величины ( $S/\sigma_{\text{Нер}}$ ), а не по отношению к стандартному отклонению среднего изменения прогнозируемой величины за период заблаговременности ( $S/\sigma_{\text{Нер}}$ ), так как данный критерий наиболее строгий. Так, по данным работы [7] критерий  $S/\sigma_{\text{Нер}}$  почти в два раза больше, критерия  $S/\sigma_{\text{АН}}$ . Для с. Оксина необходимо использовать инерционные методы с добавлением второстепенных предикторов, а оценку качества выпускаемых прогнозов производить по критерию  $S/\sigma_{\text{АН}}$ . Выбор оптимальных предикторов для прогнозирования высшего уровня за период весеннего ледохода был выполнен в работе [2], при этом улучшение качества выпускаемых прогнозов может быть достигнуто при использовании метода обучения искусственных нейронных сетей.

При разработке модели прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода с учетом высших уровней воды заторного генезиса в с. Оксина на реке Печоре в качестве предикторов использованы высший ледоходный уровень воды в селе Ермицы и высший предледоходный уровень на посту в с. Оксина, средняя заблаговременность прогноза составила 4 дня. Рассмотрим абсолютные ошибки результатов прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода при использовании регрессионных и нейросетевых прогностических моделей (рис. 2).

Можно отметить, что лучшим качеством выпускаемых прогнозов характеризуется нейронная сеть MLP 2-8-1, оправдываемость прогнозов которой составила 92%, оправдываемость прогнозов, данных по уравнению множественной регрессии, составила 79%. Для MLP 2-8-1 отношение  $S/\sigma_{\Delta}$  на независимом материале составило 0,46, что свидетельствует о высоком качестве выпускаемых прогнозов.

### Заключение

В работе рассмотрены вопросы изменения климата и его влияния на ледовый режим реки Печоры. Установлено увеличение средней за холодный сезон температуры воздуха в районе 1,3°C, что привело к снижению длительности ледостава от 4 до 12 дней. По данным многолетних наблюдений повторяемость заторов льда близ ГП Усть-Цильма составляет 7%, при этом формируются ординарные уровни воды, ГП Оксина – 21%.

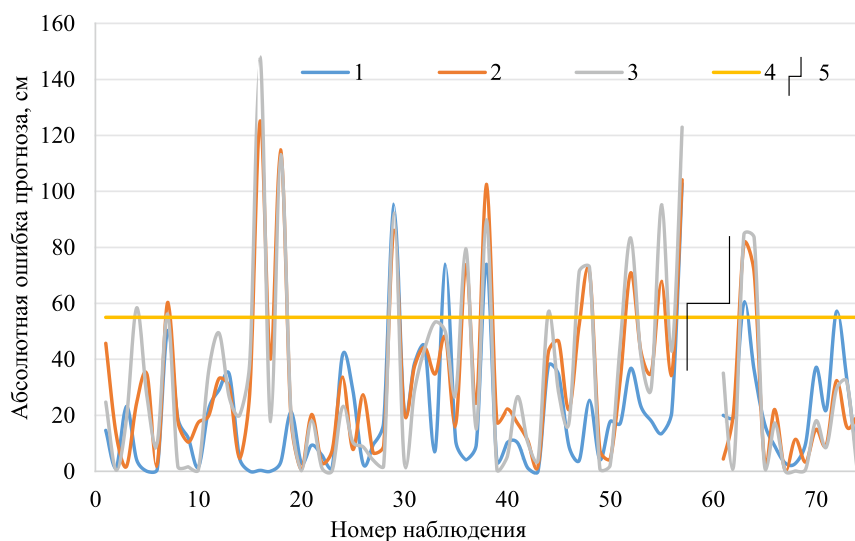


Рис. 2. Абсолютные ошибки результатов прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода ГП с. Оксина с использованием нейросетевых моделей MLP 2-8-1 (1), MLP 2-3-5-1 (2) и модели множественной линейной регрессии (3); допустимая ошибка прогнозирования (4), обучающая и тестовая выборка разделены условной линией (5)

Были рассчитаны обеспеченные значения высших за год уровней воды. Представлены методические подходы к прогнозированию высшего уровня ледохода на основе авторской классификации участков рек. Приведен пример прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода с использованием искусственных нейронных сетей. Научная и практическая значимость работы заключается в возможности использования методических подходов к прогнозированию высшего уровня воды за период весеннего ледохода.

#### Список литературы / References

1. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: Изд-во РГТМУ, 2008. 408 с.

Malinin V.N. Statistical methods for the analysis of hydro-meteorological information. SPb.: Izd-vo RSHU, 2008. 408 p.

2. Сумачев А.Э., Банщикова Л.С. Ледовый режим реки Печора и особенности прогнозирования высшего уровня ледохода // Гидрометеорология и экология. 2020. № 61. С. 446–459. DOI: 10.33933/2074-2762-2020-61-446-459.

Sumachev A.E., Banshikova L.S. Ice regime of the Pechora river and features of forecasting the highest ice drift level. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. 2020. No. 61. P. 446–459 (in Russian). DOI: 10.33933/2074-2762-2020-61-446-459.

3. Донченко Р.В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометиздат, 1987. 246 с.

Donchenko R.V. Ice regime of the rivers of the USSR. Leningrad: Gidrometizdat, 1987. 246 p. (in Russian).

4. 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. С. 41–49.

Agafonova S.A., Frolova N.L., Vasilenko A.N., Shirokova V.A. Ice regime and hazardous hydrological phenomena on the rivers of the Arctic zone of the European territory of Russia // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 2016. № 6. P. 41–49 (in Russian).

5. Вуглинский В.С. Оценка изменений характеристик ледового режима водных объектов для различных регионов страны в современных климатических условиях // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2014. № 3. С. 32–35.

Vuglinsky V.S. Assessment of changes in the characteristics of the ice regime of water bodies for different regions of the country in modern climatic conditions // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2014. No. 3. P. 32–35 (in Russian).

6. Каталог неблагоприятных и опасных гидрологических явлений на реках Республики Коми [Электронный ресурс]. URL: <http://meteork.ru/kng.shtml> (дата обращения: 30.09.2021).

Catalog of adverse and dangerous hydrological phenomena on the rivers of the Komi Republic [Electronic resource]. URL: <http://meteork.ru/kng.shtml> (date of access: 30.09.2021) (in Russian).

7. Бузин В.А. Зажоры и заторы льда на реках России. СПб.: ГГИ, 2015. 240 с.

Buzin V.A. Ice jams and jams on the rivers of Russia. SPb.: SHI, 2015. 240 p. (in Russian).