УДК 556.535.5(282.247.11) doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-446-459

Ледовый режим реки Печора и особенности прогнозирования высшего уровня ледохода

А.Э. Сумачев, Л.С. Банщикова

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, a-sumachev@mail.ru

За период 1950—2018 гг. по данным 5 метеостанций и 11 гидрологических постов проанализировано состояние климата и описан ледовый режим реки Печора. Проанализировано изменение уровней воды и сроков образования основных фаз ледового режима. Выявлено заметное влияние климатических изменений на ледовый режим. Анализ ледового режима по длине реки позволил выявить краткосрочные зависимости для прогнозирования высшего уровня ледохода. Полученные результаты предназначены для использования в целях разработки прогностических моделей.

Ключевые слова: ледовый режим, Печора, прогнозирование, ледоход, затор льда.

Ice regime of the Pechora river and features of forecasting the highest ice drift level

A.E. Sumachev, L.S. Banshchikova

State Hydrological Institute, Saint Peterburg, Russia

The paper considers the change in the ice and level regime of the Pechora River at 11 hydrological stations from 1950, when the observations of ice thickness began, to 2018. The current state of the climate has been assessed according to the data of daily and monthly average air temperatures at meteorological stations located within the river catchment area. The trend towards an increase in the average air temperature for the cold period (October-April) is observed at all meteorological stations.

A statistical assessment of significance of the linear trends in all ice regime phases has shown noticeable changes in the ice regime of the Pechora River, these changes being heterogeneous. Later dates of the onset of stable ice phenomena along the river course and an increase in the period of autumn floating ice and moving sludge lead not only to the formation of ice-jam accumulations, but to the formation of a more complex heterogeneous ice structure during freeze-up as well. Earlier dates of river break-up, taking into account the probability of return of frost, increase the risks of formation of powerful ice jams.

Analysis of the ice regime along the river course has made it possible to identify short-term prognostic dependences for river sections in the area of the villages: Mutny Materik, Shchelyayur, Ust-Tsilma, Oksino, which will be used when developing modern predictive models. To assess the quality of the forecasts made, the ratio of the standard forecast error to the natural variation of the predicted value (standard deviation) has been applied. The proposed techniques have proved to be satisfactory. The impossibility of developing long-term forecasting methods is noted, which is associated with the peculiarities of the ice regime of the Pechora River.

Keywords: ice regime, Pechora, forecasting, ice drift, ice dam.

For citation: *A.E. Sumachev, L.S. Banshchikova.* Ice regime of the Pechora river and features of forecasting the highest ice drift level. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020, 61: 446—459. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-446-459

Введение

Одним из определяющих эксплуатационных факторов для рек севера Российской Федерации является зимний режим. Ошибки при определении параметров ледового режима, а именно вида ледового явления и сроков наступления различных фаз ледового режима, могут привести к негативным последствиям и возникновению чрезвычайных ситуаций, поэтому точное описание и прогнозирование элементов ледового режима позволит минимизировать риски, сведя к минимуму как косвенный, так и прямой ущерб.

Ледовый режим реки Печора в той или иной степени рассматривается во многих отечественных статьях и монографиях. К примеру, в статье [1] достаточно подробно рассмотрен ледовый режим рек арктической зоны европейской территории Российской Федерации за период 1950—2014 гг., среди прочего, в статье рассмотрено два гидрологических поста на реке Печора, относящихся к этой зоне. Прогнозированию заторных и зажорных уровней на реках России посвящена работа [2], где также уделяется внимание ледовому режиму Печоры, но только с точки зрения прогнозирования опасных ледовых явлений. Оценка изменения уровней воды за многолетний период при заторных наводнениях выполнена в статье [3]. При этом современных исследований, посвященных ледовому режиму Печоры от истока до устья, не проводилось, что определяет необходимость данной работы.

Целесообразность прогнозирования отдельных элементов зимнего режима или их совокупности необходимо определять исходя из особенностей речного участка, степени его освоенности и антропогенной нагрузки. Например, прогнозирование ледового режима рек в осенне-зимний период является необходимым на участках рек, где есть водозаборы, навигация, гидротехнические сооружения. Также прогнозирование элементов ледового режима целесообразно в местах с высокой вероятностью возникновения опасных природных явлений, связанных с неблагоприятной ледовой обстановкой. Несмотря на то, что природная вариация осенне-зимних ледовых явлений невысока, задача точного прогнозирования осложняется тем, что прогностические модели во многом зависят от точности прогноза температуры воздуха.

Существующие в настоящее время модели прогнозирования опираются на статистические данные прошлого века и не отражают реальное изменение климатических и гидрологических характеристик, а также антропогенной нагрузки, поэтому методики прогнозирования, используемые в отечественной гидрологии, требуют уточнения и актуализации.

Целью данного исследования является комплексное описание ледового режима реки Печора для установления статистических зависимостей, которые в дальнейшем могут быть использованы для разработки новых методик прогнозирования. В ходе работы были решены следующие задачи: создана база данных, включающая основные характеристики ледового режима реки Печора, актуализирующая и дополняющая информацию, помещенную в справочнике о характерных уровнях воды; количественно и качественно проанализирована межгодовая изменчивость данных характеристик, для оценки согласованности сроков

образования фаз ледового режима и интенсивности нарастания толщины льда построены корреляционные матрицы по длине реки, выявлены основные статистические зависимости.

Материалы и методы

В работе рассматривается изменение ледового и уровенного режима реки Печора по 11 гидрологическим станциям и постам (рис. 1) с 1950 (начало наблюдений за толщиной льда) по 2018 г.

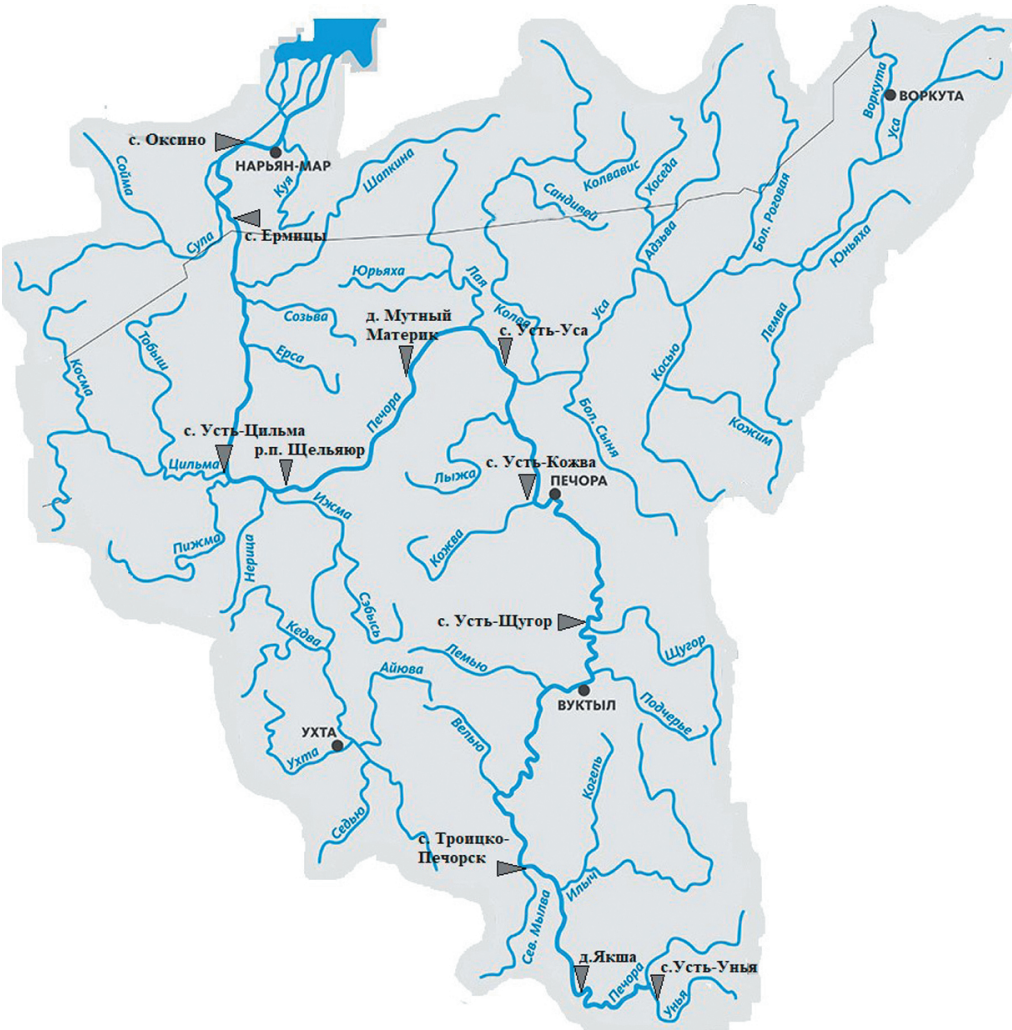

Рис. 1. Схема расположения гидрологических постов на р. Печора.

Fig. 1. Layout of hydrological posts on the Pechora River.

База данных, созданная в рамках настоящего исследования, организована по следующему принципу: по данным среднесуточных и срочных уровней воды и ледовой обстановки выбраны характерные даты образования тех или иных ледовых явлений и соответствующие им уровни воды. База включает в себя следующие характеристики ледового режима за осенне-зимний период: даты образования устойчивых ледовых явлений, даты прохождения высшего уровня воды осеннего ледохода, даты установления ледостава и высшего уровня в начале ледостава, а также высшего уровня за весь период ледостава, а также даты окончание ледостава. За весенний период рассматриваются следующие характеристики: высшие предледоходные и ледоходные уровни, даты очищения реки ото льда, заторные явления. Также анализируются изменение максимальной толщины льда и повторяемость заторов и зажоров льда.

Современное состояние климата оценивается по данным среднесуточных и среднемесячных температур воздуха на метеорологических станциях, расположенных в пределах водосбора реки. По среднесуточным значениям температуры воздуха рассчитаны суммы отрицательных и положительных температур воздуха с момента устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С осенью и весной. Отдельное внимание уделено оттепелям: подсчитано количество дней в году с данным явлением и средняя температура за эти периоды, также произведен анализ характерных сумм отрицательных температур воздуха, необходимых для устойчивого образования первых ледовых явлений, ледостава, его разрушения и высшего уровня ледохода.

В работе использованы методы математической статистики и анализа: для оценки значимости линейного тренда применен метод оценки значимости коэффициента детерминации (R^2) при уровне значимости, равном 5 %, $R^2_{кр}$ = 0,057; для выявления прогностических зависимостей применены регрессионные методы и искусственные нейронные сети на базе программного продукта *Statistica* 12; для оценки качества выпускаемых прогнозов применено отношение стандартной ошибки прогноза к среднеквадратическому отклонению прогнозируемой величины ($S/\sigma_{H ср}$) [4].

Результаты и их обсуждение

Климатическая характеристика исследуемого региона

Состояние климата исследуемого региона оценивается на основе среднемесячных данных о температуре воздуха за 1950—2018 гг. Нарушение стационарности рядов среднемесячной температуры воздуха отмечается с 1980 г., что определяет границы климатических периодов. Тренд к повышению средней температуры воздуха за холодный сезон года (октябрь—апрель) наблюдается на всех метеостанциях Северного края, включая метеостанции, расположенные в пределах водосбора реки Печора (табл. 1).

Сравнительно с периодом 1950—1980 гг. увеличение средней за холодный сезон температуры воздуха составило 0,7—1,3 °С. В Нарьян-Маре и реже на других метеорологических станциях отрицательные температуры могут сохраняться до

второй половины, в редких случаях до третьей половины мая, поэтому подекадно были проанализированы тренды за данный период по всем метеорологическим станциям исследуемого региона. Несмотря на заметное повышение температуры воздуха, выявлено отсутствие статистически значимых трендов за 1—2 декаду мая, статистически значимым оказалось лишь повышение температуры воздуха в последнюю декаду мая, что не может оказывать влияния на ледовый режим реки Печора.

Таблица 1

Изменение среднемесячной температуры воздуха за октябрь—апрель на метеостанциях, расположенных в пределах водосбора р. Печора

Change in mean monthly air temperature for October—April at meteorological stations located within the catchment of the Pechora River

Пункт	Характеристика		X	XI	XII	I	II	III	IV
Троицко-Печорское	T, °C	1950—2018	–0,6	–9	–14,4	–17,7	–15,7	–7,8	0
		1950—1980	–1,4	–9	–14,4	–18,4	–16,4	–8,9	–0,2
		1981—2018	0	–9,1	–14,3	–17,1	–15,1	–6,8	0,1
	Разница, °C		1,4	–0,1	0,1	1,3	1,3	2,1	0,3
	R^2		0,017	0,012	0,001	0,004	0,017	0,102	0,003
	Значимость		–	–	–	–	–	+	–
Усть-Цильма	T, °C	1950—2018	–0,8	–9	–13,6	–17,4	–15,6	–8,9	–2,3
		1950—1980	–1,7	–9,1	–13,6	–17,8	–16,3	–10,3	–2,8
		1981—2018	–0,1	–8,9	–13,7	–17	–15	–7,7	–1,9
	Разница, °C		1,6	0,2	–0,1	0,8	1,3	2,6	0,8
	R^2		0,044	0,010	0,000	0,002	0,010	0,102	0,020
	Значимость		–	–	–	–	–	+	–
Усть-Уса	T, °C	1950—2018	–2,1	–10,6	–15,4	–18,6	–17,1	–10,4	–4
		1950—1980	–2,8	–10,7	–15,1	–19	–17,3	–11,7	–4,1
		1981—2018	–1,5	–10,6	–15,6	–18,2	–16,8	–9,3	–4
	Разница, °C		1,3	0,1	–0,4	0,8	0,5	2,5	0,1
	R^2		0,040	0,008	0,000	0,000	0,004	0,096	0,008
	Значимость		–	–	–	–	–	+	–
Печора	T, °C	1950—2018	–1,3	–10,3	–15,6	–19,1	–17,3	–9,8	–2,9
		1950—1980	–2,4	–10,2	–15,4	–19,4	–17,8	–11,4	–3,3
		1981—2018	–0,3	–10,1	–15,4	–18,2	–16,3	–8,2	–2,5
	Разница, °C		2,1	0,1	0,1	1,2	1,5	3,3	0,8
	R^2		0,084	0,020	0,005	0,002	0,012	0,102	0,029
	Значимость		+	–	–	–	–	+	–
Нарьян-Мар	T, °C	1950—2018	–1,5	–9,5	–13,5	–17,5	–17	–12,1	–6,4
		1950—1980	–2,5	–9,9	–13,6	–17,9	–17,8	–13,8	–7
		1981—2018	–0,6	–9,1	–13,5	–17,2	–16,3	–10,8	–5,9
	Разница, °C		1,9	0,8	0,1	0,8	1,6	3,0	1,2
	R^2		0,068	0,053	0,000	0,090	0,040	0,010	0,002
	Значимость		+	–	–	+	–	–	–

Выявлено, что количество оттепелей, а также их мощность, оцененная как сумма положительных температур, с течением времени не увеличивается и остается стационарной случайной величиной. Потепление же климата в зимний период может быть объяснено статистически значимым повышением отрицательных значений температуры воздуха: отрицательные суммы, накопленные на конец зимнего периода значительно увеличились, что характеризуется трендом с коэффициентом детерминации, равным 0,078.

Ледовый режим реки Печора

Печора — крупная водная артерия, которая характеризуется высокими скоростями течения и относится к третьему типу замерзания. Для рек третьего типа характерно ледообразование по всей глубине потока. Замерзание сопровождается образованием значительного количества шуги и движением ее вниз по течению. Ледяной покров образуется при остановке, сплочении и смерзании шуги, что влияет на весь цикл ледовых явлений, вплоть до полного чищения ото льда. Ниже более подробно рассмотрены особенности каждой фазы.

Ледовый режим в период замерзания

Начало образования первичных ледовых явлений, как правило, заберегов, начинается с устойчивым переходом температуры воздуха через 0 °С и в целом подчиняется широтному закону. Устойчивые ледовые явления наблюдаются при достижении суммы отрицательных температур в среднем –14 °С.

На графике (рис. 2) видно, что в настоящее время появление льда сместилось на более поздние сроки — третью декаду октября. До 1980 г. можно было выделить два участка реки: от с. Усть-Унья до с. Усть-Кожва, и участок реки от с. Усть-Уса до с. Оксино. Появление первых ледовых явлений приходилось на третью декаду октября на первом участке и на вторую декаду октября — на втором. В настоящее время, из-за неравномерного смещения сроков на более поздние, появление первых ледовых явлений отмечается в третьей декаде октября по всей длине реки. Основной причиной смещения сроков образования первичных ледовых явлений на более поздние является повышение температуры воздуха по всей территории Северного края.

При оценке трендов уровней воды на дату появления устойчивых ледовых явлений выявлено, что однозначного положительного или отрицательного тренда по длине реки Печора нет. Положительный тренд выявлен на участке от с. Усть-Унья до с. Усть-Щугор, ниже по течению тренд отрицательный, практически на всем течении реки до с. Ермицы. Это может быть объяснено не только морфологией русла, но и особенностями физико-географического положения. Анализ данных об изменении дат и уровней воды, приуроченных к устойчивому образованию ледовых явлений, статистически значимых трендов не выявил. Статистическая связь между постами достаточно высокая как для дат, так и для уровней воды и характеризуется коэффициентом корреляции 0,78 и 0,63 соответственно.

По всему течению реки первичные ледовые явления выражаются как сочетания заберегов, редкого и густого шугохода. Эта особенность характерна для многих больших рек. Во время ледохода как правило, наблюдается максимальный за переходный период уровень воды, что объясняется резким уменьшением

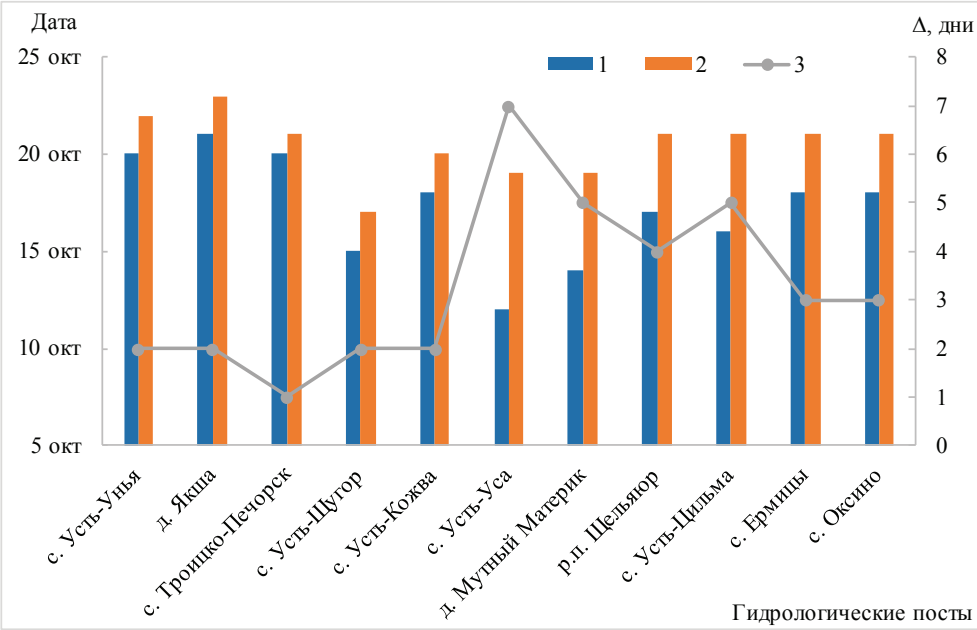

Рис. 2. График сроков появления ледовых явлений на различных постах р. Печоры за период 1950—1980 гг. (1) и 1981—2018 гг. (2) и разница (Δ) между ними (3).

Fig. 2. The time schedule for the appearance of ice phenomena at various posts of the river. Pechora for the period 1950—1980. (1) and 1981—2018 (2) and the difference (Δ) between them (3).

пропускной способности русла. Для реки Печора характерно увеличение повторяемости осенних ледоходов от истока, например, для Усть-Уньи повторяемость образования осенних ледоходов невысока и составляет 41 %; продвигаясь вниз по течению, повторяемость осеннего ледохода увеличивается и на участке от с. Усть-Кожва до с. Усть-Цильма составляет 100 %, к устью же происходит резкое снижение данной величины до 35 %. Средняя продолжительность осеннего ледохода составляет 7—10 дней в верхнем течении, в среднем — 13 дней, на участке от с. Ермицы до устья уменьшается до 4 дней. Максимальная продолжительность ледохода может достигать 30 дней. Уровенный режим осеннего ледохода для большинства постов имеет положительный тренд за многолетний период, и только на участке реки Печора р.п. Щельяюр — с. Усть-Цильма — отрицательный. Следует также отметить, что наблюденный в 2006—2007 г. в верхнем течении, а в 2013—2014 г. в среднем течении, высший уровень ледохода был максимальным за многолетний период.

Ледовый режим в период ледостава

От образования первых ледовых явлений до смерзания отдельных льдин и шуги, и образования устойчивого — длительностью не менее 10 дней — ледостава может пройти значительное время, вплоть до двух месяцев. В среднем это

10—12 дней в нижнем и верхнем течении, в среднем течении около 20 дней, сумма отрицательных температур при этом не должна быть выше –34 °С, в целом же, ее точное значение зависит от площади водосбора и уровня воды в период замерзания. В нижнем и среднем течении длительность переходного периода стационарна, в то время как в верхнем течении она увеличивается в среднем на 3 дня, что является статистически значимым. На участке Усть-Уса—Усть-Кожва наблюдается обратная тенденция, связанная, в том числе с падением уровней воды за переходный период. Согласованность сроков замерзания по длине реки высока и характеризуется средним коэффициентом корреляции, равным 0,81.

Особенностью образования ледостава на реке Печора является значительное повышение уровня воды в первые 8—11 дней до отметок, близких или, например, в верховьях, равных максимальному уровню воды за ледоставный период. Данный уровень является характеристикой зашугованности и уменьшения пропускной способности русла за счет образования ледостава. В случае, если данный уровень сформирован зажорными явлениями, то возрастает его влияние на формирование максимального уровня весеннего ледохода.

По данным Каталога заторных и зажорных участков рек СССР на реке Печора существует 12 зажорных участков. Анализ данных ледовой обстановки и характерных уровней за многолетний период показал, что повторяемость этих явлений для всех постов практически не изменилась, зажорные скопления наблюдаются практически ежегодно — повторяемость порядка 90 % и только в устьевом участке у с. Оксино около 50 %. Мощные зажоры характерны как для самой Печоры, так и для ее притоков Ижмы, Сулы, Цильмы. Зажорные подъемы уровней воды могут достигать 3,5—5 м [5].

Для Печоры характерно образование краткосрочных зажоров льда, что выражается в зависимости между уровнем, приходящимся на первый день ледостава и максимальным (R = 0,95) и отсутствием значительного влияния зажоров на формирование весеннего ледохода, поэтому связь между высшим уровнем в начале ледостава и высшим уровнем весеннего ледохода выражена менее четко, что осложняет прогнозирование весенних уровней воды с большой заблаговременностью (τ). Анализ данных за многолетний период не выявил каких-либо статистически значимых трендов, характерных для данных уровней воды.

С первого дня образования устойчивого ледостава начинается интенсивный процесс нарастания ледового покрова. Максимальная толщина льда на всех пунктах наблюдения, как правило, отмечается только в марте—апреле. Распределение максимальных толщин льда подчиняется широтному закону, увеличиваясь с юга на север.

Анализ данных позволил выявить наличие статистически значимых трендов к снижению максимальной толщины льда на большинстве пунктов наблюдений, уменьшение максимальной толщины льда при этом составило до 15 см (рис. 3), положительных трендов выявлено не было. Анализ статистической взаимосвязанности в данных максимальных толщин льда по длине реки показал отсутствие какой-либо значимой связи (R = 0,21), что свидетельствует о том, что на нарастание льда большее влияние оказывают локальные факторы.

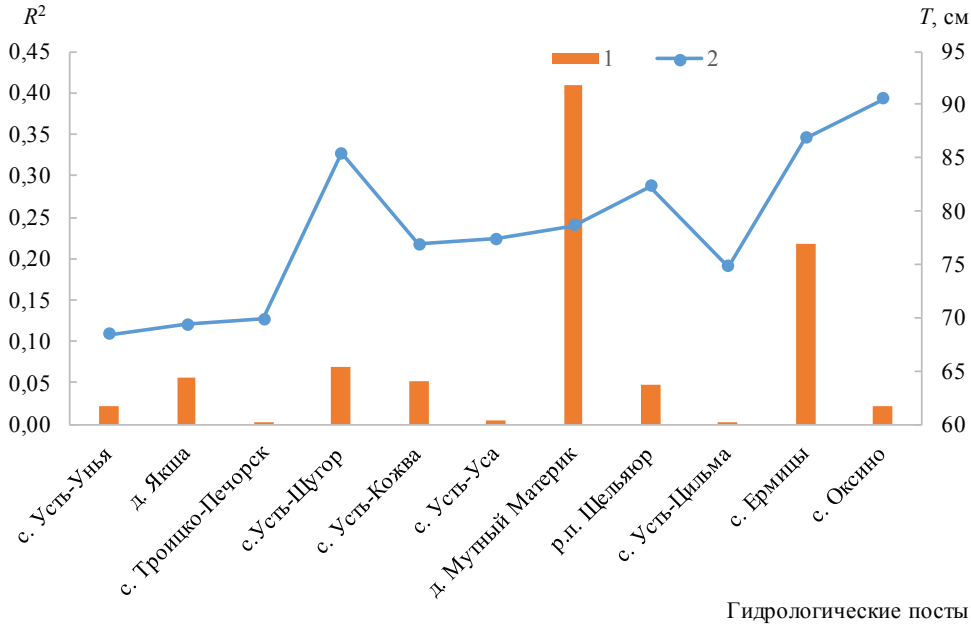

Рис. 3. Изменение максимальной толщины льда (1)
и средняя за многолетний период толщина льда по длине р. Печоры (2).

Fig. 3. Change in maximum ice thickness (1)
and average ice thickness over a long-term period along the length of the river Pechora (2).

Высший уровень за весь период ледостава, как правило, наблюдается в конце ледостава, лишь в истоках (с. Усть-Унья) в 40 % случаев он может наблюдаться в начале ледостава. Связь между высшим уровнем в начале и за весь ледостав различна, к примеру, на участке реки в селе Оксино данная связь отсутствует (R = 0,11), а на участке в с. Ермицы и р.п. Щельяюр коэффициент корреляции достигает 0,48. При этом отмечается статистически значимое падение высших за ледостав уровней воды, в среднем падение уровней воды составило 44 см.

Ледовый режим в период вскрытия

С переходом температуры воздуха через 0 °С в область положительных значений начинается процесс деградации ледового покрова и его постепенное разрушение, начинающееся с подвижек и закраин. Последний день устойчивого ледостава приходится на конец апреля — первую половину мая, в зависимости от широты местности (рис. 4). В редких случаях при раннем вскрытии притоков и вышележащих участков реки возможны ситуации вскрытия конкретного участка реки на фоне отрицательных температур воздуха.

Таким образом, средняя продолжительность ледоставного периода составляет 183 дня. Продолжительность ледостава за счет смещения сроков замерзания

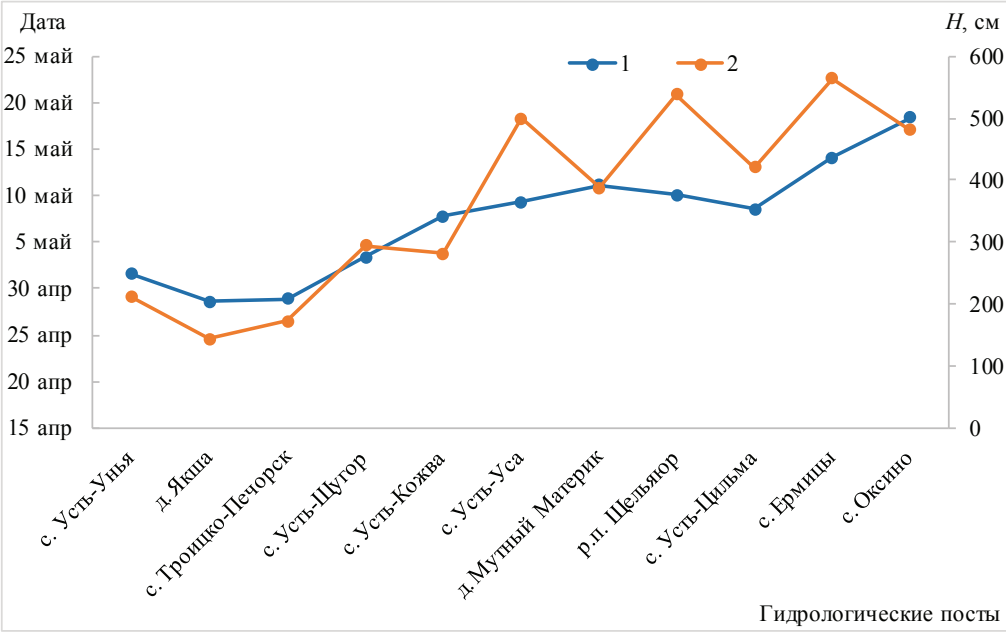

Рис. 4. Изменение дат (1) и уровней воды (2), приуроченных к началу разрушения ледового покрова на различных постах р. Печора.

Fig. 4. Changes in dates (1) and water levels (2), timed to the beginning of the destruction of the ice cover at various stations of the river Pechora.

и вскрытия уменьшается во всех пунктах наблюдений, но наибольшее ее уменьшение отмечается в среднем течении реки; в истоке и устье эти изменения минимальны, в связи с гораздо большим влиянием локальных факторов. При этом можно отметить тесную статистическую связь между датой первого дня ледостава и длительностью ледостава, характеризуемую средним коэффициентом корреляции, равным 0,76, что может быть использовано для долгосрочного прогнозирования. Период от начала деградации ледового покрова до его разрушения и начала весеннего ледохода занимает всего несколько дней. Как правило, за этот период уровни значительно возрастают, в отдельные годы наоборот, может наблюдаться их снижение, что приводит к достаточно низким уровням воды при ледоходе. После того, как уровни воды достигли критического значения, при которых ледовый покров уже более не в состоянии сдерживать прибывающую воду начинается ледоход. Высший ледоходный уровень воды, в зависимости от погодных условий и характера вскрытия наблюдается либо в середине ледохода, либо в конце. В устьях крупных притоков нередки случаи, когда наблюдаемый максимум отмечается при вторичном ледоходе, в начале ледохода максимальные уровни формируются редко и, как правило, связаны с заторами льда.

По данным каталога [6] на реке Печора имеется 15 заторных участков. При анализе ледовой обстановки и уровенных характеристик за многолетний период выявлено уменьшение повторяемости и мощности этих явлений. Так для с. Усть-Унья повторяемость составляет 23 %, д. Якша — 39 %, на участке у с. Троицко-Печорск и у с. Усть-Цильма повторяемость практически не изменилась (39 % и 35 % соответственно), с. Усть-Щугор — 39 %, с. Усть-Кожва — 61 % (наибольшая повторяемость заторов на всем течении реки), с. Усть-Уса — 17 %, д. Мутный Материк — 31 %, в нижнем течении повторяемость составляет для с. Ермицы — 47 %, с. Оксино — 20 %.

Сроки очищения реки от льда различаются как вследствие широтной зависимости, так и по причине влияния крупных притоков, которые могут вскрываться значительно позже основной реки, формируя вторичный ледоход, из-за чего сроки полного очищения реки ото льда могут значительно увеличиваться. К примеру, река Уса формирует вторичный ледоход на реке Печора, увеличивая сроки очищения реки ото льда на основной реке на 2 дня по сравнению с участком реки вблизи д. Мутный Материк. В среднем, очищение реки ото льда происходит с 10 мая в верхнем течении по 24 мая в нижнем, исключением является участок реки близ д. Усть-Уса, где очищение реки ото льда происходит примерно 27 мая. Наблюдаемые тренды к смещению дат на более ранние и к снижению уровней воды являются статистически незначимыми. Также можно отметить хорошую статистическую связанность дат и уровней воды.

Особенности прогнозирования высшего уровня ледохода

Особенности прогнозирования высшего уровня ледохода для реки Печора заключаются в отсутствии статистической связи между гидрологическими параметрами в пределах пункта наблюдений. То есть связь между высшим уровнем в начале ледостава, максимальной толщиной льда и даже высшим предледоходным уровнем выражена крайне слабо. Это предопределяет принципиальную невозможность разработки долгосрочных методик прогнозирования, а также использование инерционных прогнозов. Таким образом, на реке Печора возможно создание лишь краткосрочных методик прогнозирования со средней заблаговременностью не более 8 дней, основанных на соответствующих уровнях воды. Критерием качества моделей должно выступать отношение стандартной ошибки прогноза к природной вариации прогнозируемой величины ($S/\sigma_{H\text{ср}}$), а не к среднему изменению за период заблаговременности ($S/\sigma_{\Delta H}$), т. к. критерий $S/\sigma_{H\text{ср}}$ оказывается несколько строже. Например, по данным работы [2] для с. Ермицы критерий $S/\sigma_{H\text{ср}}$ почти в 2 раза больше.

Таким образом, анализ данных показал, что связь между предледоходными высшими уровнями воды и ледоходными уровнями неоднозначна и не может быть использована в качестве основного предиктора при прогнозировании. Только на посту Оксино коэффициент корреляции между ними достигает 0,6. Интенсивность нарастания уровня еще меньше связана с высшим уровнем ледохода и однозначно не может быть использована при его прогнозировании. Единственными доступными предикторами при прогнозировании высших ледоходных уровней на реке Печора остаются высшие ледоходные уровни воды постов, расположенных

выше по течению, и постов на реке Цильма. Использование в качестве предикторов при прогнозировании высших уровней воды на реке Ижма, как было предложено в работе [2], невозможно в силу сооружения дамбы и, как следствие, полному отсутствию связи после 1980 г., использование высших ледоходных уровней воды по другим притоком исключено в силу более позднего их формирования.

В рамках данной работы методом регрессионного анализа выявлены прогностические зависимости для д. Мутный Материк в зависимости от высшего уровня ледохода в р.п. Щельяюр ($\tau_{ср}$ = 2 дня, $S/\sigma_{H ср}$ = 0,60), для р.п. Щельяюр в зависимости от высшего уровня ледохода на реке Ижме в с. Трусово и высшего предледоходного уровня воды на посту Щельяюр ($\tau_{ср}$ = 6 дней, $S/\sigma_{H ср}$ = 0,70), для с. Усть-Цильма в зависимости от высшего уровня ледохода на реке Ижме в с. Трусово и разницы в толщинах льда в с. Усть-Цильма и р.п. Щельяюр ($\tau_{ср}$ = 8 дней, $S/\sigma_{H ср}$ = 0,71) и с. Оксино в зависимости от высшего уровня ледохода в с. Ермицы и высшего предледоходного уровня воды на посту в с. Оксино ($\tau_{ср}$ = 4 дня, $S/\sigma_{H ср}$ = 0,52). Качество выпускаемых прогнозов может быть улучшено при использовании методов обучения искусственных нейронных сетей. Например, использование программного продукта *Statistica* 12 и алгоритма обучения нейронных сетей позволяет в подавляющем большинстве случаев улучшить качество выпускаемых прогнозов, к примеру, для с. Оксино отношение ошибки прогноза к природной вариации при использовании нейронной сети *MLP* 2-8-1 составило 0,33.

Заключение

В работе рассмотрен ледовый режим реки Печора за период 1950—2018 гг. Показана его неоднородность по длине реки. Можно утверждать, что из-за впадения крупных притоков и смены направления течения основной реки изменяется и ледовый режим, при этом разделение происходит по посту Усть-Кожва. Статистическая оценка значимости линейных трендов всех фаз ледового режима показала заметные неоднородные изменения в ледовом режиме на реке Печора.

Более поздние сроки наступления устойчивых ледовых явлений по длине реки и увеличение периода осеннего ледохода и шугохода приводят к формированию не только зажорных скоплений, но и к образованию более сложной неоднородной структуры льда при ледоставе. Продолжительное время наблюдается несплошной ледостав, участки с торосами, полыньи и промоины. Уменьшение периода ледостава приводит к уменьшению периода нарастания льда. Более ранние сроки вскрытия реки, с учетом вероятности возврата холодов, повышают риски формирования мощных заторов льда.

В то же время уровенный режим не претерпел значительных изменений. Повторяемость опасных природных явлений также осталась на прежнем уровне, что согласуется с данными анализа, полученными по другим рекам исследуемого региона, и свидетельствует о том, что важнейшим фактором образования опасных природных явлений являются гидроморфологические характеристики конкретного участка реки, а климатические факторы являются второстепенными.

В результате анализа ледового режима по длине реки установлены краткосрочные прогностические зависимости, которые будут использованы при разработке современных прогностических моделей.

Научная новизна работы заключается в использовании современных, более обширных данных по реке Печора, которые позволили комплексно описать и актуализировать информацию по ледовому режиму в период замерзания, ледостава и вскрытия, а также выявить прогностические зависимости. Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных зависимостей для разработки прогностических методик.

Список литературы

1. *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.
2. *Бузин В.А.* Зажоры и заторы льда на реках России. СПб.: ГГИ, ГГИ, 2015. 240 с.
3. *Банщикова Л.С.* Выделение зон затопления при заторных наводнениях (на примере р. Печоры) // Сборник работ по гидрологии. № 28. 2011. С. 4—13.
4. *Малинин В.Н.* Статистические методы анализа гидрометеорологической информации: учебник. СПб.: РГГМУ, 2013. 408 с.
5. *Козлов Д.В., Бузин В.А., Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Бабурин В.Л., Банщикова Л.С., Горошкова Н.И., Завадский А.С., Крыленко И.Н., Савельев К.Л., Козлов К.Д., Бузина Л.Ф.* Опасные ледовые явления на реках и водохранилищах России: монография. М.: Издательство РГАУ-МСХА, 2015. 347 с.
6. Каталог заторных и зажорных участков рек СССР. Т. 1. Европейская часть. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 260 с.

References

1. *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*. Moscow State University Bulletin. 2016, 5(6): 41—49. [In Russian].
2. *Buzin V.A. Zazhory i Zatory l'da na rekakh Rosii*. Ice jam and ice dam on the Russian rivers. St. Petersburg: SHI, 2015: 240 p. [In Russian].
3. *Banshikova L.S.* Allocation of flooding zones in case of jam floods (for example, the Pechora river). *Sbornik rabot po gidrologii.* Collection of works on hydrology. 2011, 28: 4—13. [In Russian].
4. *Malinin V.N. Statisticheskiye metody analiza gidrometeorologicheskoy informatsii.* Statistical methods for the analysis of hydrometeorological information. St.-Petersburg: RSHU, 2013: 408 p. [In Russian].
5. *Kozlov D.V., Buzin V.A., Frolova N.L., Agafonova S.A., Baburin V.L., Banshchikova L.S., Goroshkova N.I., Zavadskiy A.S., Krylenko I.N., Savel'yev K.L., Kozlov K.D., Buzina L.F. Opasnyye ledovyye yavleniya na rekakh i vodokhranilishchakh Rossii*. Dangerous ice phenomena on rivers and reservoirs in Russia. Moscow: RSAU-MTAA. 2015: 347 p. [In Russian].
6. *Katalog zatornih i zajornih uchastkov rek SSSR. T. 1. Evropeiskaya chast.* Catalogue of ice-dammed and ice-jammed areas of the USSR rivers. V. 1. European part of the USSR. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1978: 260 p. [In Russian].

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 11.08.2020.
Принята после доработки к публикации 16.11.2020.

Сведения об авторах

Сумачев Александр Эдуардович, аспирант, аспирантура Государственного гидрологического института, a-sumachev@mail.ru.

Банщикова Любовь Святославовна, канд. геогр. наук, зав. ОНТИ, старший научный сотрудник, balju@rambler.ru.

Information about authors

Sumachev Aleksandr Eduardovich, Postgraduate student, Postgraduate department of Federal State Budgetary Institution “State Hydrological Institute”.

Banshchikova Liubov Svyatoslavovna, PhD (Geogr. Sci.), chief of the Department of scientific and technical information, Senior Research.