

С.Е. БЕДНАРУК¹, Д.В. КОЗЛОВ²¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», Институт водных проблем РАН, г. Москва, Российская Федерация² Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Институт водных проблем РАН, г. Москва, Российская Федерация

ПРИЧИНЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ ЗАТОРООПАСНОЙ ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКИ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ РЫБИНСКОГО ГИДРОУЗЛА

Наводнения заторного типа являются очень опасными. В России за 1991-2017 годы было зарегистрировано 134 заторных наводнения с зафиксированным материальным ущербом. Выполнена качественная и количественная оценка факторов, повлиявших на возникновение ледового затора и развитие зимнего наводнения на р. Волге ниже Рыбинского гидроузла в районе г. Ярославль в феврале 2020 года. В качестве исходной информации были использованы оперативные сводки и прогнозы МЧС России, ПАО «РусГидро» и Росгидромета, а также сведения Росводресурсов о водохозяйственной обстановке на территории Верхне-Волжского БВУ и режимах работы водохранилищ Волжско-Камского каскада. Анализ причин и последствий затороопасной ледовой обстановки на речном участке Горьковского водохранилища ниже Рыбинского гидроузла показал, что решающую роль в формировании ледового затора сыграл один из трех главных факторов заторообразования, а именно недостаточная льдо- и водопропускная способность русла, связанная с его морфологическими особенностями. Сочетание неблагоприятных морфологических и сложных гидрометеорологических условий, наличие неустойчивой ледовой обстановки и достаточно высокой водности в январе-феврале 2020 года на всем Верхневолжье привели в феврале 2020 года к формированию ледового затора в русле р. Волги выше поселка городского типа Некрасовское и к наводнению заторного типа в районе города Ярославль. Время образования ледовых заторов как в феврале 2020 года, так и в январе 2007 года совпало с периодами значительных колебаний сбросных расходов на Рыбинском гидроузле при общем их существенном росте, что подтвердило исключительно негативное влияние предпаводковой (предполоводной) сработки уровня воды в водохранилище на условия и возможность образования ледовых заторов на зарегулированном участке реки выше гидроузла. Данные исследования могут быть использованы при обосновании режимов функционирования водохранилищ Волжско-Камского каскада гидроузлов и разработке правил использования водных ресурсов водохранилищ.

Ледовый затор, паводковая ледовая обстановка, наводнение, пропускная способность русла, гидроузел (гидроэлектростанция), водохранилище, сбросной расход, морфометрические особенности.

Введение. Важную роль в формировании катастрофических наводнений на реках играют ледовые заторы. Наводнения заторного типа являются очень опасными, потому что перемычка, сформировавшаяся в речном русле из скопления льда, может вызвать стремительный рост уровня воды выше створа, и значительное понижение уровня ниже створа сформировавшейся «ледовой плотины». Согласно официальным

данным за 1991-2017 годы на территории Российской Федерации было зарегистрировано 134 заторных наводнения с зафиксированным материальным ущербом [1]. При этом в Прогнозе чрезвычайной обстановки на территории Российской Федерации на 2020 год [2] указывалось на то, что «риски формирования неблагоприятной заторной обстановки предварительно прогнозируются не выше среднемноголетних

значений. А в случае низких снегозапасов, понижающих транспортирующую способность рек, отклонений отрицательных температур воздуха вероятен сценарий, при котором произойдет формирование длительных по времени ледовых заторов и высоких заторных подъемов уровней воды». Именно такие гидрометеорологические условия в сочетании с высокой водностью сформировались в январе-феврале 2020 года на Верхне-волжье и привели практически к рукотворному наводнению заторного типа на Волге в районе города Ярославль.

Несмотря на достаточную изученность вопросов, связанных с процессами заторо- и зажорообразования, наличие данных многолетних наблюдений за ледообразованием, ледоставом и вскрытием рек, исследование причин, особенностей и последствий образования ледовых заторов как на естественных, так и на зарегулированных участках рек остается по-прежнему актуальной и востребованной задачей инженерной гидрологии. Поэтому аналитическая информация о причинно-следственных механизмах заторного наводнения на Волге в районе Ярославля в начале февраля 2020 года должна быть интересной и полезной в общем объеме разнообразных сведений о процессах заторообразования на российских реках.

Исследованию и прогнозам ледового режима рек, водохранилищ и нижних бьефов гидроэлектростанций посвящены работы советских специалистов, опубликованные в 1950-1980 гг.: Я.Л. Готлиба и др. [3], Ю.А. Деева и А.Ф. Попова [4], Р.В. Донченко [5], В.Н. Карновича, И.Я. Лисера [6], Я.И. Марусенко, Р.А. Нежиховского [7], А.Н. Чиждова, Л.Г. Шуляковского [8] и других, а также зарубежных авторов: Г. Эштона [9], Дж. Кеннеди [10] и других. В 1990-2019 гг. вопросы изучения, моделирования и прогноза формирования заторов льда на зарегулированных и незарегулированных участках рек нашли свое отражение в работах отечественных (В.А. Бузина [11, 12, 13, 14], Н.Г. Василенко, С.Д. Винникова и Л.С. Банщицковой [15, 16], В.К. Дебольского, Е.И. Дебольской [17], А.Т. Зиновьева [13], В.В. Кильямина, Д.В. Козловым и С.Л. Кулешовым [1, 18, 14], Н.Л. Фроловой и С.А. Агафоновой [19], И.Н. Шаталиной и Г.А. Трегуб [20]) и зарубежных авторов (С. Белтаоса и др. [21, 22, 23], С. Де Манка и И. Готье [24], О. Льера [25], Ч. Махабира, Ф. Хикса и А. Файек [26], С. Морина и Д. Бюера [27], Т. Проуса и М. Конли [28] и др.).

Цель выполненных исследований – качественная и количественная оценка факторов, повлиявших на возникновение ледового затора и развитие зимнего наводнения на р. Волге ниже Рыбинского гидроузла в районе г. Ярославль в феврале 2020 года.

Для достижения поставленной цели был решен ряд *основных задач*: сформулированы и обобщены особенности процессов заторообразования на зарегулированных участках рек; выполнен анализ гидрометеорологической обстановки и гидрологической ситуации в бассейне р. Волги в границах Ярославской области; сделана оценка ледовой обстановки с анализом причин и последствий заторообразования на речном участке Горьковского водохранилища ниже Рыбинского гидроузла.

Материал и методы исследований.

В качестве исходной информации были использованы открытые данные (оперативные сводки и прогнозы) Главного управления МЧС России по Ярославской области, оперативная информация ПАО «РусГидро» и Росгидромета, сведения Росводресурсов о водохозяйственной обстановке на территории России (Верхне-Волжского БВУ) и режимах работы крупнейших водохранилищ и их каскадов (Волжско-Камского каскада).

Методологической основой исследований стали фундаментальные положения инженерной гидрологии и гидроледотермики, практические пособия (руководство по гидрологическим прогнозам) [28], отраслевые методические указания [29], каталоги [30] и др.), проект Правил использования водных ресурсов Рыбинского и Горьковского водохранилищ на р. Волге [31]. В работе использованы общеизвестные методы научно-познавательной деятельности: эмпирические научные методы – пассивный эксперимент, использующий собранные и систематизированные метеорологические и гидрологические (о расходах и уровнях воды) данные, а также сведения о ледовой обстановке на реке; универсальные (общенаучные) методы – анализ и синтез, индукция и дедукция, обобщение.

Результаты и обсуждение. *Особенности процессов заторообразования на зарегулированных участках рек.* Многочисленные исследования процессов зажоро- и заторообразования на зарегулированных участках рек [3, 4, 5, 6, 7, 8, 11], в том числе выполненные в последние годы [1, 12, 13, 14, 17, 18, 20, 33], показали, что развитие зажорных явлений при образовании ледяного покрова

и заторных явлений при его разрушении обусловлено, главным образом, наличием переломов продольного профиля, повышенных уклонов и скоростей течения на речном участке в сочетании с колебаниями режима попусков на ГЭС. Условия образования заторов на регулируемом участке реки отличаются от бытовых условий заторообразования наличием предпаводочной сработки уровня воды.

Зажорные участки, как правило, являются очагами формирования заторных скоплений при вскрытии реки особенно в тех случаях, когда зона выклинивания подпора уровня смещается вниз по течению вследствие зимней сработки уровня воды водохранилища.

Кроме того, в зоне выклинивания подпора, как правило, завершается процесс вскрытия речного участка, и здесь сосредотачивается вся масса льда, пришедшая с верхних участков реки.

Большое влияние на развитие процессов заторообразования и подъема уровня воды в зонах выклинивания подпора уровня воды водохранилищ оказывают повторные зимние вскрытия, способствующие перераспределению льда в русле и формированию зажорно-заторных скоплений, являющихся очагами мощных заторов во время весеннего вскрытия.

Следует также отметить, что максимальный заторный уровень воды зависит от гидрометеорологических условий вскрытия, а также от условий замерзания реки.

Главными факторами заторообразования являются [12, 13, 14, 20]:

- задержка вскрытия, обусловленная повышенной потенциальной сопротивляемостью ледяного покрова, связанной с увеличением его толщины из-за снижения скорости течения воды и наличием сохранившихся с осени мощных скоплений льда зажорного происхождения;

- недостаточная льдо- и водопрopusкная способность русла, связанная с морфологическими особенностями, в том числе изменениями продольного профиля водной поверхности и стеснением русла морфометрическими препятствиями (например, островами) и зажорными скоплениями льда;

- большие расходы воды в период весеннего половодья.

Таким образом, морфологические особенности русла в сочетании с гидрометеорологическими условиями и режимом работы ГЭС определяют интенсивность и последовательность развития зажорно-заторных явлений по длине нижнего бьефа. Местами образования зажоров

и заторов, как и в бытовых условиях, являются участки с резким изломом продольного профиля (меняется уклон от большого к малому), крутыми поворотами, мелями и другими препятствиями в руслах рек.

Устойчивость заторных скоплений льда определяется в зависимости от максимальных расходов воды при попуске на гидроузле, морфометрических характеристик заторного участка, толщины и прочности льда. Устойчивость затора сохраняется до тех пор, пока не изменится режим попусков. Форсирование попусков может привести к превышению напряжения сжатия над внутренним сопротивлением скопления льдин и вызвать либо разрушение скопления и отступление кромки льда вниз по реке, либо упрочнение его путем увеличения толщины ледовых скоплений.

Кромка льда является устойчивой, если она формируется при расходах воды и гидрометеорологических условиях, обеспечивающих необходимую толщину и прочность ледяных образований. В зависимости от погодных условий зимнего периода заторы формируются на различных участках по длине бьефа. В теплую зиму они образуются при больших попусках в результате разрушения кромки ледяного покрова, находящейся на расстоянии, как правило, 60-70 км от плотины. В холодную зиму заторы образуются преимущественно на приплотинном участке вследствие резких попусков на ГЭС и малой толщины ледяного покрова.

Увеличение расходов воды в период формирования заторов способствует перераспределению масс льда и увеличению мощности затора, что приводит к резкому снижению зимних коэффициентов [3, 14] или уменьшению пропускной способности русла, сопровождающейся подъемом уровня воды. Наибольший заторный уровень воды находится в прямой зависимости от максимального расхода воды в период его формирования [5, 14].

Таким образом, формирование заторов в нижних бьефах гидроузлов является следствием динамического разрушения и срыва кромки льда при повышенных попусках на участке, в пределах которого при попусках амплитуда колебания уровня воды, как правило, в 3-4 раза больше толщины льда кромки. Заторы образуются на стыке ледяного покрова и раздробленного поля под влиянием действия сил потока и давления ледяного поля, превышающего сопротивление льда. Увеличение попусков

на гидроузле в процессе развития заторных явлений способствует повышению мощности затора и подъему уровня воды.

Гидрометеорологическая обстановка в Ярославской области. Синоптический осенне-зимний период 2019-2020 г. характеризовался сложными погодными условиями, в первую очередь, повышенным фоном среднесуточных температур воздуха и часто меняющейся температурой воздуха (частые оттепели с переходом среднесуточных значений через 0°C и достаточно высокие амплитуды значений температуры). Температуры воздуха в декабре и январе превышали климатическую норму. А осадки были в основном

в виде дождя и мокрого снега (табл. 1). Увлажненность почвы с осени в январе-феврале оказалась выше обычного, а глубина промерзания была минимальной. Аналогичная ситуация наблюдалась в зимний период 2006-2007 г., когда среднесуточные температуры воздуха в декабре оставались положительными практически весь месяц, а в январе 2007 года превысили среднемноголетние значения. Осадки были в основном в виде дождя. Увлажненность почвы с осени была выше обычного, а глубина промерзания была минимальной. С гидрологической точки зрения 2006-2007 г. по всем характеристикам был аномальным и с большой водностью.

Таблица 1

Метеорологическая обстановка в Ярославской области

Характеристика	26.01	27.01	28.01	29.01	30.01	31.01	01.02	02.02	
Ветер	северо-западный 7-12 м/с	северо-западный 7-12 м/с	юго-восточный 5-10 м/с	юго-восточный 4-9 м/с	восточный 5-10 м/с	восточный 3-8 м/с	южный 3-8 м/с	южный ночью 4-9 м/с, днем 7-12 м/с	
Температура ночью	-3...-8 гр.	-4...-9 гр.	-11...-16 гр.	-7...-12 гр.	-2...-7 гр.	-2...-7 гр.	-5...-10 гр.	-1...-6 гр.	
Температура днем	-1...-6 гр.	-4...-9 гр.	-4...-9 гр.	-1...-6 гр.	0...-5 гр.	0...-5 гр.	-1...-6 гр.	-3...+2 гр.	
Погода	облачная с прояснениями, временами небольшой снег	облачная с прояснениями, ночью снег, в отдельных районах метель	облачная с прояснениями, ночью без осадков; днем небольшой снег	облачная с прояснениями (ночью), днем местами небольшой снег	облачная, ночью без существенных осадков; днем небольшой снег	облачная, небольшой, ночью местами умеренный снег	облачная, ночью небольшой снег; днем без осадков	облачная, ночью небольшой снег; днем мокрый снега	
Характеристика	03.02	04.02	05.02	06.02	07.02	09.02	10.02	11.02	12.02
Ветер	юго-западный, западный 6-11 м/с	западный 8-13 м/с	северо-западный 7-12 м/с	южный, юго-западный 7-12 м/с	северо-западный 7-12 м/с, местами порывы 15 м/с	юго-западный, западный 6-11 м/с	южный 7-12 м/с, днем местами порывы 15 м/с	южный 7-12 м/с, местами порывы 15-18 м/с	юго-западный 6-11 м/с
Температура ночью	-3...+2 гр.	-2...-7 гр.	-7...-12 гр.	-10...-15 гр.	-12...-17 гр.	-9...-14 гр.	0...-5 гр.	0...-5 гр.	-3...+2 гр.
Температура днем	-3...+2 гр.	-2...-7 гр.	-5...-10 гр.	-3...-8 гр.	-7...-12 гр.	-4...+1 гр.	-3...+2 гр.	-3...+2 гр.	-3...+2 гр.
Погода	облачная, осадки, преимущественно в виде мокрого снега	облачная, небольшой, местами умеренный снег, метель	облачная с прояснениями, небольшой, ночью местами снег	облачная, ночью без осадков; днем небольшой снег	облачная с прояснениями, временами небольшой снег, метель	облачная с прояснениями, без существенных осадков	облачная с прояснениями, без существенных осадков	облачная, небольшие осадки в виде мокрого снега	облачная с прояснениями, небольшие осадки в виде мокрого снега

Примечание. Гидропост «г. Ярославль на р. Волге»:

- Примерные GPS координаты: 57.638609, 39.893184.
- Расстояние от истока: 907 км. Расстояние от устья: 2624 км.
- Отметка нуля поста располагается на высоте 80.00 м над уровнем моря.

Сведения из оперативных сводок и прогнозов Главного управления МЧС России по Ярославской области, ПАО «РусГидро» и Росгидромета.

Осенью 2019 года и в январе-феврале 2020 года наблюдалась еще более высокая водность в верхневолжском бассейне и в целом приточность к водохранилищам Волжско-Камского каскада, вызванная, по-видимому, аномально высокими температурами воздуха в этот период. По информации Росводресурсов в январе 2020 года приток воды к Рыбинскому водохранилищу был на 535% больше нормы, а к Угличскому водохранилищу на 355% больше нормы. Это самые высокие показатели притока для зимнего периода за всю историю эксплуатации верхневолжских гидроузлов. В феврале 2020 года также прогнозировалось сохранение высоких притоков к водохранилищам каскада: на Верхней Волге до 4,3 раза выше нормы и до 2,2 раза в целом по Волжско-Камскому каскаду. Увеличение сбросных расходов Вазузской ГТС в сочетании с повышенной водностью выше Иваньковского водохранилища стало дополнительным фактором более раннего начала противопаводковых мероприятий 2020 года. Уже с 05.02.2020 г. были открыты затворы водосливной плотины Иваньковского гидроузла, расположенного выше по течению Угличской ГЭС.

Запасы воды в снежном покрове верхневолжских водохранилищ в 2019-2020 г. оказались ниже прошлогодних: в Рыбинском они составили 26% от средних значений, а в Угличском – 18%. Это очевидное следствие аномально теплого осенне-зимнего периода.

Гидрологическая ситуация на водных объектах в районе городов Рыбинск и Ярославль. Продолжительная декабрьско-январская оттепель 2019-2020 г. в бассейне Верхней Волги привела к формированию тало-дождевого паводка, что обеспечило рост уровней воды на реках, и соответственно, увеличение притока воды к верхневолжским водохранилищам.

По данным Главного управления МЧС России по Ярославской области с 29-30.01.2020 г. в г. Ярославль и его окрестностях начинает наблюдаться подъем уровня воды в Горьковском водохранилище до неблагоприятных уровней (табл. 2). Поэтому в оперативных сводках МЧС содержится информация о возможных подтоплениях пониженных участков местности территории населенных пунктов и переливах дорог (табл. 3).

Таблица 2

Гидрологическая обстановка. Уровни в водохранилищах Ярославской области

Водохранилище	ОЯ	25.01 (26.01)	26.01 (27.01)	27.01 (28.01)	28.01 (29.01)	29.01 (30.01)	30.01 (31.01)	31.01 (01.02)	01.02 (02.02)	
Угличское вдхр.	ОЯниж. – 101,8 м. БС, ОЯверх. – 114,0 м. БС	112,70 м. БС	112,72 м. БС	112,80 м. БС	112,83 м. БС	112,75 м. БС	112,73 м. БС	112,72 м. БС	112,70 м. БС	
Рыбинское вдхр.	ОЯниж. – 97,00 м. БС, ОЯверх. – 102,30 м. БС	101,63 м. БС	101,63 м. БС	101,63 м. БС	101,64 м. БС	101,63 м. БС	101,61 м. БС	101,59 м. БС	101,57 м. БС	
Горьковское вдхр. (Ярославль)	ОЯниж. – 82,50 м. БС, ОЯверх. – 88,0 м. БС	84,82 м. БС	84,89 м. БС	84,87 м. БС	85,07 м. БС	85,24 м. БС	86,06 м. БС	86,48 м. БС	86,56 м. БС	
Горьковское вдхр. (Рыбинск)	ОЯниж. – 83,00 м. БС, ОЯверх. – 90,0 м. БС	86,12 м. БС	86,19 м. БС	85,60 м. БС	86,21 м. БС	87,49 м. БС	88,05 м. БС	88,39 м. БС	87,90 м. БС	
Водохранилище		02.02 (03.02)	03.02 (04.02)	04.02 (05.02)	05.02 (06.02)	06.02 (07.02)	07.02 (08.02)	08.02 (09.02)	09.02 (10.02)	10.02 (11.02)
Угличское вдхр.		112,65 м. БС	112,70 м. БС	112,70 м. БС	112,70 м. БС	112,69 м. БС	112,69 м. БС	112,69 м. БС	112,76 м. БС	112,73 м. БС
Рыбинское вдхр.		101,55 м. БС	101,53 м. БС	101,51 м. БС	101,51 м. БС	101,45 м. БС	101,41 м. БС	101,41 м. БС	101,39 м. БС	101,38 м. БС
Горьковское вдхр. (Ярославль)		86,62 м. БС	86,70 м. БС	86,66 м. БС	86,74 м. БС	86,88 м. БС	87,60 м. БС	86,50 м. БС	86,25 м. БС	86,06 м. БС
Горьковское вдхр. (Рыбинск)		87,77 м. БС	87,83 м. БС	87,77 м. БС	87,82 м. БС	88,05 м. БС	88,12 м. БС	87,85 м. БС	87,60 м. БС	87,30 м. БС

Согласно оперативной информации ПАО «РусГидро» (табл. 4) об общем количестве воды, пропускаемом через гидроузел

(турбины и водосбросы) за предыдущие сутки, м³/сек (среднесуточное значение) на ГЭС на реке Волга за период с 28.01.2020 г.

по 30.01.2020 г. сбросы воды на Рыбинском гидроузле увеличились почти на 1200 м³/сек, достигнув значения 2627 м³/сек, а сбросы на Нижегородском гидроузле практически не изменились (приrost за трое суток составил не более 45 м³/сек) и остались на уровне

2600 м³/сек. Одновременно с этим осложнилась гидрологическая ситуация на основных притоках реки Волга (р. Которосль, р. Ить, р. Солоница и др.) на участке между г. Рыбинском и г. Костромой (русловой участок Горьковского водохранилища).

Таблица 3

Среднесуточные сбросы на гидроузлах, м³/ысек (среднесуточное значение)

ГЭС	24.01 (26.01)	25.01 (27.01)	26.01 (28.01)	27.01 (29.01)	28.01 (30.01)	29.01 (31.01)	30.01 (01.02)	31.01 (02.02)	
Угличское вдхр.	489	479	260	487	663	620	506	490	
Рыбинское вдхр.	1450	1899	1967	1443	1963	2544	2627	2565	
Гидрологическая обстановка	Гидрологическая обстановка на территории всей области в норме.								
ГЭС	01.02 (03.02)	02.02 (04.02)	03.02 (05.02)	04.02 (06.02)	05.02 (07.02)	06.02 (08.02)	07.02 (09.02)	08.02 (10.02)	09.02 (11.02)
Угличское вдхр.	490	290	502	502	485	560	592	251	596
Рыбинское вдхр.	2535	2440	2534	2534	2588	1580	1580	1520	1444
Гидрологическая обстановка	наблюдается подъем уровня воды в Горьковском водохранилище до неблагоприятных уровней								
Возможны подтопления пониженных участков населенных пунктов и переливы дорог	Зарегистрировано пять подтопленных территорий в Ярославском районе и в г.о. Ярославль								
Зарегистрировано пять подтопленных территорий в Ярославском районе и в г.о. Ярославль	Зарегистрировано пять подтопленных территорий в Ярославском районе и в г.о. Ярославль								
Зарегистрировано пять подтопленных территорий в Ярославском районе и в г.о. Ярославль	Зарегистрировано пять подтопленных территорий в Ярославском районе и в г.о. Ярославль								
Зарегистрировано пять подтопленных территорий в Ярославском районе и в г.о. Ярославль	Зарегистрировано семь подтопленных территорий в Ярославском районе и в г.о. Ярославль								
Зарегистрировано семь подтопленных территорий в Ярославском районе и в г.о. Ярославль	По состоянию на 15.00 10.02.20 подтопления на территории Ярославской области нет.								
По состоянию на 15.00 11.02.20 подтопления на территории Ярославской области нет.	По состоянию на 15.00 11.02.20 подтопления на территории Ярославской области нет.								

Таблица 4

Общий расход, пропускаемый через гидроузел (турбины и водосбросы) за сутки, м³/сек (среднесуточное значение)

ГЭС	26.01	27.01	28.01	29.01	30.01	31.01	01.02	02.02	
НГЭС	2495	2568	2732	2494	2611	2883	2578	2393	
(+), (-)	(-8)	(+73)	(+164)	(-238)	(+117)	(+272)	(-305)	(-185)	
РГЭС	1967	1429	1964	2544	2627	2564	2538	2448	
(+), (-)	(+68)	(-538)	(+535)	(+580)	(+83)	(-63)	(-26)	(-90)	
ГЭС	03.02	04.02	05.02	06.02	07.02	08.02	09.02	10.02	11.02
НГЭС	2616	2316	2515	2403	2708	2826	3029	2386	2136
(+), (-)	(+223)	(-300)	(+199)	(-112)	(+305)	(+118)	(+203)	(-643)	(-250)
РГЭС	2457	2504	2587	2592	2293	1669	1460	1425	1543
(+), (-)	(+9)	(+47)	(+83)	(+5)	(-299)	(-624)	(-209)	(-35)	(+118)

Примечание. НГЭС – Нижегородская ГЭС, РГЭС – Рыбинская ГЭС; (+) увеличение, (-) уменьшение сброса.

Все это, в сочетании с необычными для середины зимы погодными условиями, по-видимому, стало причиной первой волны наводнения, приведшего 31.01.2020 г. к затоплению в г. Ярославле нижнего яруса Волжской набережной, а в г. Рыбинске – причала, и также к затоплению яхт-клуба и других участков на Тверицкой набережной, подтоплению пониженных береговых территорий правого притока Волги – реки Которосль. 30-31.01.2020 г. Нижегородская ГЭС немного увеличила сбросы (почти на 400 м³/с), но паводковая ситуация продолжала динамично развиваться в сторону ухудшения (табл. 4). Последующие семь дней с 31.01.2020 г. по 06.02.2020 г. общий расход, пропускаемый через Рыбинский гидроузел, стабильно держался в пределах 2450-2590 м³/сек, а сбросы воды через Нижегородский гидроузел чередовались в более широком диапазоне расходов 2400-2900 м³/сек (табл. 4).

За этот период по сведениям из оперативных сводок и прогнозов Главного управления МЧС России по Ярославской области (табл. 2 и 3) гидрологическая обстановка серьезно ухудшилась, а уровень воды в Горьковском водохранилище у г. Ярославль поднялся более чем на 80 см, достигнув 06.02.2020 г. значения 86,88 м БС, что выше на 88 см отметки неблагоприятного гидрологического явления (НГЯ 86,0 м БС), неуклонно приближаясь к отметке, соответствующей опасному явлению (ОЯ).

В Ярославле критическая паводковая отметка опасного явления (ОЯ) «высокий паводок» установлена на уровне 88,0 м БС, однако многие объекты экономики и социального сектора расположены значительно ниже. Их подтопление происходит уже при превышении уровня воды в Волге отметки неблагоприятного гидрологического

явления (НГЯ) 86,0 м БС. Именно такие объекты пострадали в первую очередь.

С 03.02.2020 г. Главным управлением МЧС России по Ярославской области (табл. 5) ежедневно регистрировались случаи подтопления территорий в Ярославском районе и в г.о. Ярославль. В 5-ти официально объявленных зонах подтопления пострадали: 220 приусадебных участков в СНТ «Мономер» и 40 приусадебных участков в СНТ «Заволжье» Ярославского района, 60 приусадебных участков с надворными постройками в СНТ «им. Мичурина» и 13 приусадебных участков с надворными постройками в СНТ «Волга» города Ярославля и др. Ярославские СМИ сообщили о затоплении 2-го Смоленского переулка, некоторых подвальных помещений и гаражей в г. Ярославль. Генерирующая компания ТГК-2 сообщила о подтоплении тепловой камеры в районе Которосли. Главным управлением МЧС России по Ярославской области и муниципальными властями зафиксировано приближение воды к селу Сопелки, а также затопление приусадебных участков в поселке «Волга» Туношенского сельского поселения Ярославского муниципального района.

07.02.2020 г. вышло штормовое предупреждение Главного управления МЧС России по Ярославской области об опасном явлении «высокий паводок» (800 см; 88,00 м БС), при котором происходит затопление пониженных участков городской территории и объектов, расположенных в пойменной части реки.

Ледовая обстановка на речном участке Горьковского водохранилища ниже Рыбинского гидроузла. Зима 2019-2020 гг. характеризовалась часто меняющейся температурой воздуха, что стало причиной неустойчивого ледообразования на водных объектах Верхневолжья. На большинстве водоемов и водотоков Ярославской области

процесс ледообразования продолжался вплоть до конца февраля. При этом по сведениям из оперативных сводок и прогнозов Главного управления МЧС России по Ярославской области следует, что если на Рыбинском водохранилище в период с конца января по начало февраля толщина льда составляла 0-18 см и наблюдались забереги 3-4 км, то на Горьковском водохранилище вплоть до 07.02.2020 г. толщина устойчивого льда не наблюдалась (0 см), а забереги были местами по 50 м. И только начиная с 08.02.2020 г. в сводках ГУ МЧС РФ ЯО содержится информация о наблюдаемой толщине льда – 0-10 см и местами забереги 50 м.

В таких сложных погодных условиях 26-28.01.2020 г. сначала река Которосль в черте Ярославля, а затем и река Волга вскрылись и инициировали январский ледоход. Огромные льдины, проходящие мимо Волжской набережной в лучах яркого солнца, были засняты на фотопейзаж, больше подходящий для марта (рис. 1).



Рис. 1. Зимний ледоход на Волге (Ярославль, конец января 2020 г.)

Очевидно, что такое неустойчивое ледообразование стало причиной зажорно-заторных явлений на реках и участках рек Ярославской области.

Уникальность сложившейся ситуации заключалась еще и в очень высокой приточности к Верхневолжским водохранилищам в зимний период 2020 года, которая не наблюдалась до этого никогда. Для того чтобы обеспечить свободный объем полезной емкости водохранилища для приема талых вод половодья, Рыбинский гидроузел 26-31.01.2020 г. произвел залповые сбросы (табл. 2, 3, 4), которые в сочетании с необычными для середины зимы погодными

условиями вызвали подъем воды, начавшийся 30-31.01.2020 г.

Ледовый затор начал формироваться в речной части Горьковского водохранилища на характерном для него участке 28.01.2020 г. как следствие зимнего ледохода. Формирование затора происходило практически синхронно с увеличением сбросов с Рыбинского гидроузла (табл. 4).

Синоптическая ситуация характеризовалась положительной аномалией: температура воздуха в районе ледового затора в дневные часы повышалась до слабо отрицательных значений, а в ночные часы опускалась до -7°C (табл. 1). Многократные переходы температуры воздуха через 0°C и достаточно высокая амплитуда ее значений, оттепели и похолодания способствовали интенсивному образованию большого количества шуги, внутриводного и поверхностного льда, неустойчивого ледостава и кратковременного ледохода. Чередование таких условий и наличие морфометрических преград (островов, поворотов русла) привело к стеснению живого сечения русла реки и к зашугованности ее отдельных участков в речной части Горьковского водохранилища.

Полевые обследования, выполненные Ярославским ЦГМС совместно с ГУ МЧС РФ ЯО, показали, что голова затора расположилась на участке «Поселок городского типа Туношна» – «деревня Турово» в районе острова Мининский (деревня Ульково, находящаяся в 4 км выше поселка городского типа Некрасовское Некрасовского района Ярославской области). Хвост затора простирался до г. Ярославль. Скопившийся в области головы затора лед образовал мощную торосистую зону протяженностью несколько километров.

Ледовая обстановка, в особенности на участке Ярославль – Кострома, к 05.02.2020 г. сильно осложнилась, характеризуясь наличием мощного затора, торосистого льда и подледной шуги, что привело к сохранению высоких отметок воды у Рыбинска, Тутаева и Ярославля. Зашугованность живого сечения на заторном участке достигла порядка 40%, что не позволяло обеспечивать сток вниз по течению реки Волги. Затор, сформировавшийся в речной части Горьковского водохранилища продолжал наращивать свою мощность. Ситуация усугубилась наступившими морозами, которые привели к укреплению головы затора. На 14.00 часов 06.02.2020 г. уровень воды выше затора у г. Ярославль поднялся

до отметки 87,01 м, а у г. Кострома остановился на отметке 83,87 м. Общий перепад уровня составил 3,87 м, что стало наиболее высоким затором с 2015 года (в 2018 году перепад составил 2,03 м). На Красном Профинтерне уровень воды достигал отметки в 84,63 м.

Значение отметки уровня воды у г. Ярославля 07.02.2020 г. составило 87,96 м БС и стало наивысшим за весь период эксплуатации Нижегородского гидроузла, превысив ранее зафиксированную наивысшую отметку на 77 см (предыдущий максимум наблюдался 17.05.1966 г.), что было ниже критической отметки опасного явления всего на 4 см.

Известно, что любое искусственное воздействие на затор в период сохранения холодной погоды может привести не к его разрушению, а к перемещению его головы ниже по речному участку водохранилища. В этих условиях сохраняется высокая вероятность увеличения массы льда, формирующей голову затора. Прохождение высоких для февраля расходов воды на Верхней Волге до Нижегородского гидроузла на фоне отрицательных температур воздуха могло привести только к осложнению ледовой обстановки. Поэтому ГУ МЧС РФ ЯО фактически не проводило мероприятий по воздействию на ледовый затор в течение января-февраля 2020 года.

Анализ причин и последствий затороопасной ледовой обстановки на речном участке Горьковского водохранилища ниже Рыбинского гидроузла. Выше отмечалось, что одним из трех главных факторов заторообразования является недостаточная льдо- и водопропускная способность русла, связанная с морфологическими особенностями. Этот фактор относительно постоянный, но в ситуации с рассматриваемым случаем на речном участке Горьковского водохранилища р. Волги в Ярославской области сыграл решающую роль в формировании ледового затора.

На продольном профиле (рис. 2) Горьковского водохранилища (из проекта Правил использования водных ресурсов Рыбинского и Горьковского водохранилищ, ФГУП «Центр Регистра и кадастра») [31] отчетливо виден «порожистый» участок русла в районе поселка городского типа Некрасовское на участке реки от Ярославля до Костромы (протяженностью около 50 км). Причем, при проведении касательной по гребням «порогов», на указанном участке в целом наблюдается обратный уклон дна. Кстати, первоначально створ нынешнего Рыбинского гидроузла, а в начале 1930-х годов – Ярославского гидроузла, предполагался именно в этом районе, и там даже начиналось его строительство, прекращенное Государственной комиссией в 1935 году.

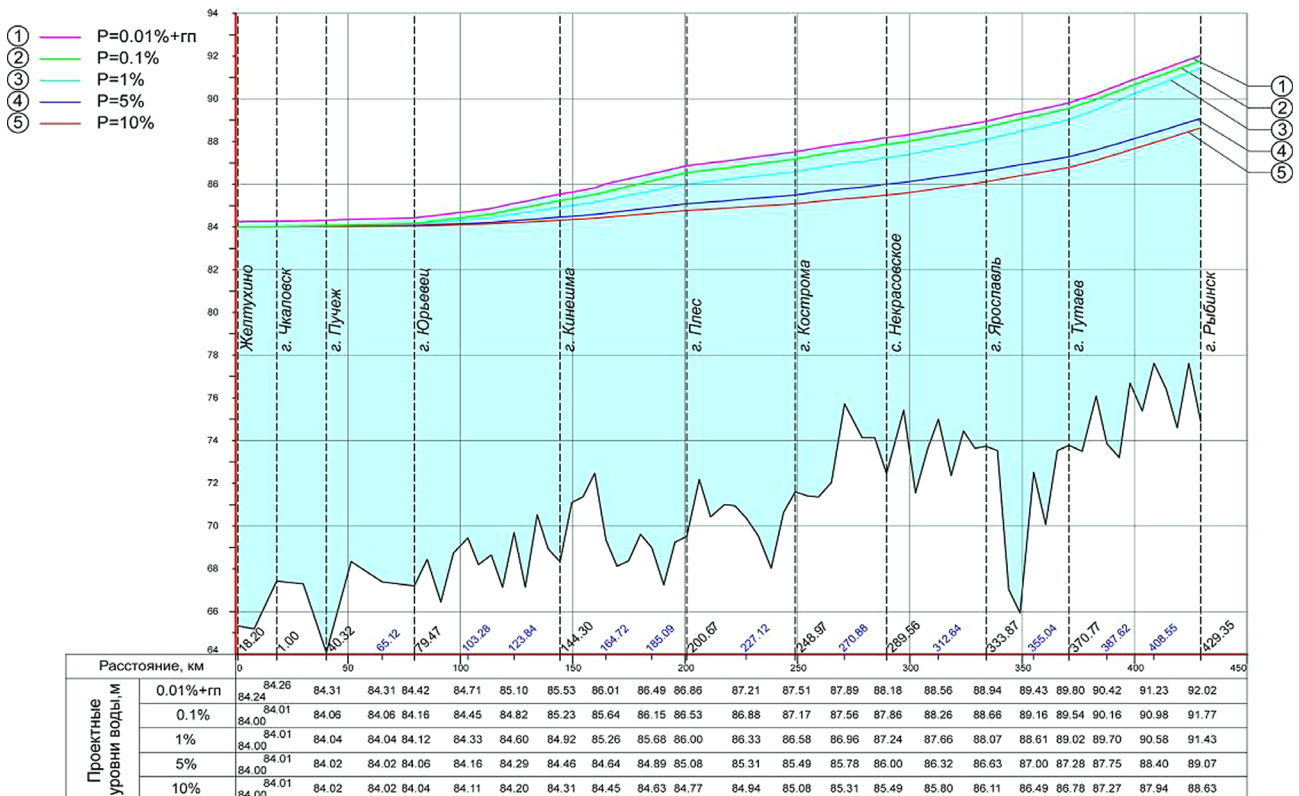


Рис. 2. Расчетные кривые свободной поверхности Горьковского водохранилища (река Волга)

Кроме того, именно на этом участке Волги расположены крупные морфометрические преграды: острова (Мининский, Бабаевский, Овсяниковский, Ульковский), сужения (в районах Поляны, Новые Ченцы, Турово, Красный Профинтерн) и повороты русла (в районах Сорокино, Золотой Колос). Очевидно, что указанные морфометрические преграды (из островов, поворотов русла) привели к стеснению живого сечения русла реки и к зашугованности ее отдельных участков в этой части Горьковского водохранилища. Сочетание неблагоприятных морфологических условий, чередование сильных оттепелей и значительных похолоданий, неустойчивый ледостав и кратковременный зимний ледоход на исключительно затороопасном участке в зоне выклинивания подпора уровня воды Горьковского водохранилища в районе острова Мининский и привели к формированию ледового затора выше поселка городского типа Некрасовское. Образование затора привело к значительному сужению живого сечения потока, но при этом снижение пропускной способности на затороопасном

участке русла (с учетом дополнительного подъема уровня воды выше затора) не превышало 30-40%.

На графиках хода уровней воды (рис. 3, 4) в створах Ярославля, Кострома и верхнего бьефа гидроузла Горьковского водохранилища за январь-февраль 2007 и 2020 годов отчетливо прослеживается период образования ледовых заторов. В 2020 году – это период с 28-29 января до 6-7 февраля (максимальная амплитуда колебаний уровня воды в 3,6 м и максимум заторных уровней наблюдались по Ярославлю). В 2007 году – это период с 16-17 по 26 января (максимальная амплитуда колебаний уровня воды в 2,8 м и максимум заторных уровней также наблюдались по Ярославлю).

На графиках сбросов воды (рис. 5, 6) через гидроузел Рыбинского водохранилища за январь-февраль 2007 и 2020 годов видно, что время образования ледовых заторов однозначно совпадает с периодами значительных колебаний сбросных расходов при общем их существенном росте. В 2020 году, примерно, с 1500 до 2600 куб.м/с, а в 2007 – с 1000 до 2900 куб.м/с.

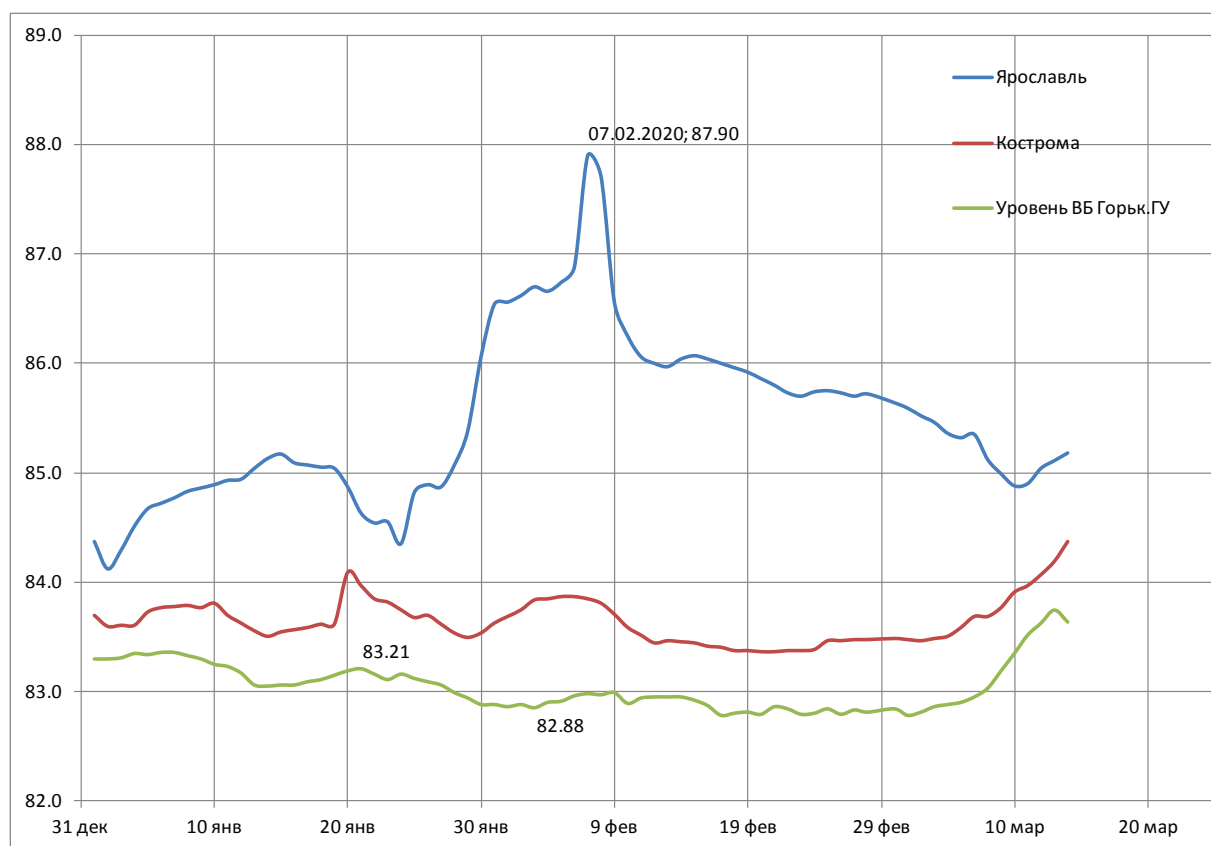


Рис. 3. Уровни воды в Горьковском водохранилище в 2020 году, мБС

Это соответствует данным многолетних наблюдений в нижних бьефах

волжских гидроузлов [3, 14] (в первую очередь в НБ Волжской ГЭС) показавших,

что в тех случаях, когда амплитуда колебания уровня воды при попусках на ГЭС в несколько раз (как правило, в 3-4 раза) превышает толщину льда на кромке (в конце февраля 2020 года эта толщина была не более 0,1 м), на участке нижнего бьефа всегда образуются заторные скопления.

Следует также обратить внимание на то, что в обоих случаях (в 2007 и 2020 годах) в период формирования заторов осуществлялась

сработка уровня воды у плотины гидроузла Горьковского водохранилища более чем на 0,3-0,35 м за счет соответствующего увеличения сбросных расходов на Нижегородском гидроузле, что подтверждает негативное влияние предупредковой (предполоводной) сработки уровня воды в водохранилище на условия и возможность образования ледовых заторов на зарегулированном участке реки выше гидроузла.

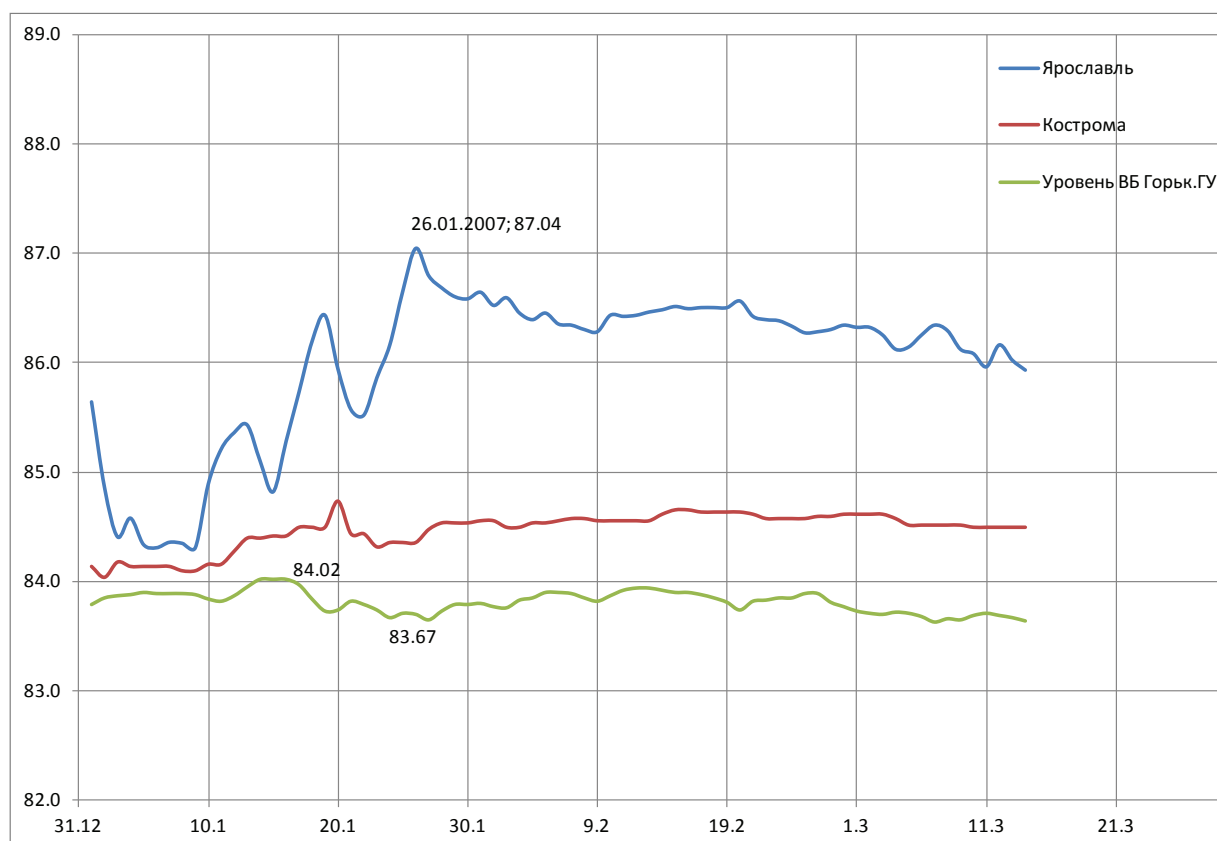


Рис. 4. Уровни воды в Горьковском водохранилище в 2007 году, мБС

Необходимо обратить внимание и на то, что величина максимального подъема заторных уровней воды в створе Ярославля в 2020 году почти на 1,0 м превысила максимум 2007 года при даже несколько меньших колебаниях сбросов из Рыбинского водохранилища.

При весьма сходных гидрометеорологических условиях (сильная оттепель с последующим значительным похолоданием) в обоих случаях (зимы 2007 и 2020 годов), основным отличием двух затороопасных ситуаций является «пониженный фон» уровня воды в верхнем бьефе (на приплотинном участке Горьковского водохранилища) Нижегородского гидроузла: в январе-феврале 2020 года они были на 0,8 м ниже, чем за аналогичный период 2007 года.

Следует также отметить, что осуществленная в декабре 2019 года сработка Горьковского водохранилища противоречила требованиям Проекта Правил использования водных ресурсов Рыбинского и Горьковского водохранилищ и, по-видимому, создала дополнительные благоприятные для заторообразования условия.

Известно, что устойчивость ледового затора сохраняется до тех пор, пока не изменится режим попусков. Из графика хода уровней воды в 2020 году (рис. 3) видно, что ледовый затор в районе поселка городского типа Некрасовское на участке реки Волги от Ярославля до Костромы разрушился вместе с началом подъема уровня воды у плотины Нижегородского гидроузла в начале марта.

Подтопление территорий в Ярославской области

Дата и кол-во территорий	Ярославский район	г.о.г. Ярославль
04.02.2020 5 (пять) тер- риторий	- 220 приусадебных участков в СНТ «Мономер». - 40 приусадебных участков в СНТ «Заволжье». - 2 приусадебных участка на реке Пахма, д. Ивановский Перевоз (строящийся коттеджный поселок)	- 60 приусадебных участков с надворными постройками в СНТ «им. Мичурина» города Ярославля. - 13 приусадебных участков с надворными постройками в СНТ «Волга» города Ярославля. ИТОГО: всего подтоплено 335 приусадебных участков с надворными постройками (без постоянного проживания людей), из них: - 2 участка в д. Ивановский Перевоз (строящийся коттеджный поселок) на территории Ярославского муниципального района; - 333 приусадебных участка (без постоянного проживания людей), а также 1 участок дорожного полотна в садовом некоммерческом товариществе на территории г.о.г. Ярославль и Ярославского муниципального района. Объекты экономики, социально-значимые объекты не подтоплены.
05.02.2020 5 (пять) тер- риторий	- 220 приусадебных участков в СНТ «Мономер». - 40 приусадебных участков в СНТ «Заволжье». - 2 приусадебных участка на реке Пахма, д. Ивановский Перевоз (строящийся коттеджный поселок)	- 60 приусадебных участков с надворными постройками в СНТ «им. Мичурина» города Ярославля. - 13 приусадебных участков с надворными постройками в СНТ «Волга» города Ярославля. ИТОГО: всего подтоплено 335 приусадебных участков с надворными постройками (без постоянного проживания людей), из них: - 2 участка в д. Ивановский Перевоз (строящийся коттеджный поселок) на территории Ярославского муниципального района; - 333 приусадебных участка (без постоянного проживания людей), а также 1 участок дорожного полотна в садовом некоммерческом товариществе на территории г.о.г. Ярославль и Ярославского муниципального района.
06.02.2020 5 (пять) тер- риторий	- 220 приусадебных участков в СНТ «Мономер». - 40 приусадебных участков в СНТ «Заволжье». - 2 приусадебных участка на реке Пахма, д. Ивановский Перевоз	- 60 приусадебных участков с надворными постройками в СНТ «им. Мичурина» города Ярославля. - 13 приусадебных участков с надворными постройками в СНТ «Волга» города Ярославля.
07.02.2020 5 (пять) тер- риторий	- 220 приусадебных участков в СНТ «Мономер». - 40 приусадебных участков в СНТ «Заволжье». - 2 приусадебных участка на реке Пахма, д. Ивановский Перевоз	- 60 приусадебных участков с надворными постройками в СНТ «им. Мичурина» города Ярославля. - 13 приусадебных участков с надворными постройками в СНТ «Волга» города Ярославля.
08.02.2020 5 (пять) тер- риторий	- 220 приусадебных участков в СНТ «Мономер». - 40 приусадебных участков в СНТ «Заволжье». - 2 приусадебных участка на реке Пахма, д. Ивановский Перевоз	- 60 приусадебных участков с надворными постройками в СНТ «им. Мичурина» города Ярославля. - 13 приусадебных участков с надворными постройками в СНТ «Волга» города Ярославля.

<p>09.02.2020 7 (семь) территорий</p>	<p>- подтоплено дорожное полотно в СНТ «Мономер» Ярославского МР (2 линии, уровень воды от 1 до 50 см), а также 220 приусадебных участков (уровень воды от 10-50 см). На участках 52 и 53 зарегистрирована одна семья (2 чел). На остальных участках проживающих и зарегистрированных людей нет; - в СНТ «Заволжье» вблизи н.п. Вакарево подтоплено 40 приусадебных участков без постоянного проживания (уровень воды от 1 до 50 см); - д. Ивановский Перевоз (строящийся коттеджный поселок) подтоплено 2 приусадебных участка (уровень воды от 1 до 50 см). Всего в коттеджном поселке 2 построенных жилых дома, в них зарегистрировано 6 человек (детей нет). Администрацией Ярославского района предлагалась эвакуация, отказались. Дома не подтоплены (вода в подвале). Проблем жизнеобеспечения нет. Возможность передвижения по участку и возможность выезда имеется; - п. Волга, ул. Набережная д. 7 и д. 9. Подтоплено 2 приусадебных участка. Уровень воды от 1 до 50 см.</p>	<p>- в СНТ «им. Мичурина» города Ярославля подтоплено 60 приусадебных участков без постоянного проживания людей (уровень воды от 1 до 50 см); - в СНТ «Волга» города Ярославля подтоплено 13 приусадебных участков с надворными постройками (без постоянного проживания людей) (уровень воды от 1 до 50 см); - подтопление нижнего яруса Волжской набережной, протяженностью 400 метров. ИТОГО: по состоянию на 12.00 09.02.2020 остается подтоплено 337 приусадебных участков (за сутки подтопленных участков нет), а также 1 участок дорожного полотна в садовом некоммерческом товариществе и 1 участок Волжской набережной, из них: - 2 участка в д. Ивановский Перевоз (строящийся коттеджный поселок) на территории Ярославского муниципального района; - 333 приусадебных участка (без постоянного проживания людей), а также 1 участок дорожного полотна в садовых некоммерческих товариществах на территории г.о.г. Ярославль и Ярославского муниципального района за сутки +3 см; - 2 приусадебных участка в п. Волга Туношенского сельского поселения Ярославского МР; - 1 участок нижнего яруса Волжской набережной.</p>
---	---	--

Примечание. С 15-00 10.02.2020 года на гидропостах Ярославской области гидрологическая обстановка в норме, контролируется. Ежедневно, начиная с 09.02.2020 года, наблюдается спад уровня воды в Горьковском водохранилище. Подтопления на территории Ярославской области нет.

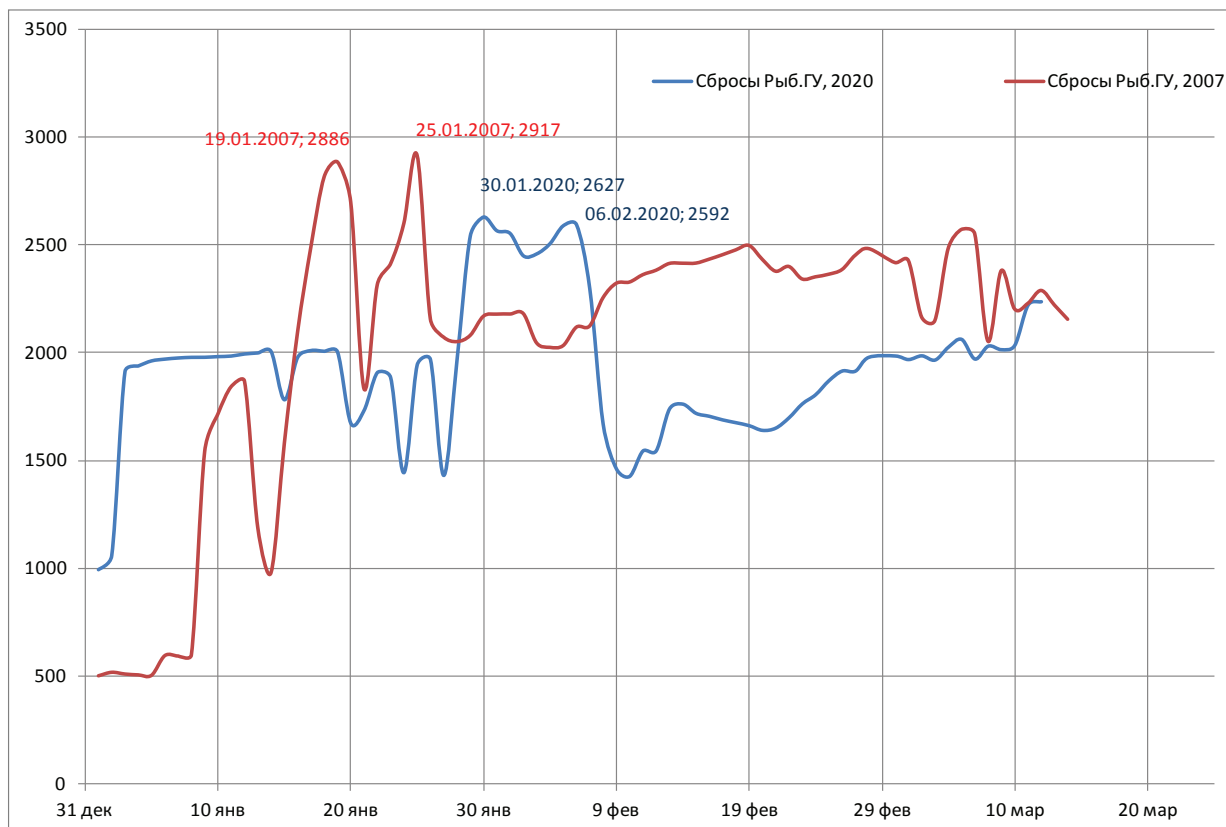


Рис. 5. Сбросные расходы через Рыбинский гидроузел, куб.м/с

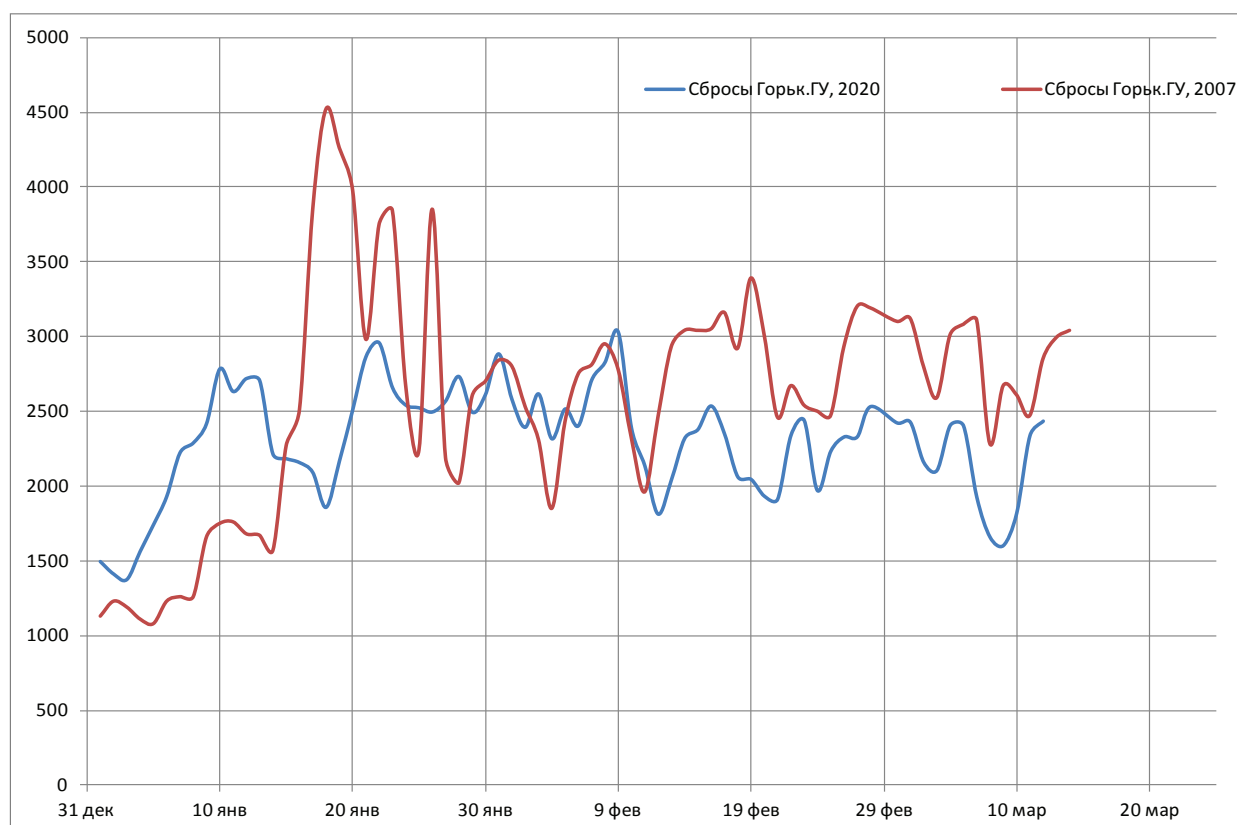


Рис. 6. Сбросные расходы через Нижегородский гидроузел, куб. м/с

Выводы

Выполненная качественная и количественная оценка факторов, повлиявших на возникновение ледового затора и развитие зимнего наводнения на р. Волге ниже Рыбинского гидроузла в районе г. Ярославль в феврале 2020 года, показала, что:

1. Решающую роль в формировании ледовых заторов на речном участке Горьковского водохранилища в Ярославской области как в 2020, так и в 2007 году, сыграл фактор недостаточной льдо- и водопропускной способности русла, связанный с морфологическими особенностями участка р. Волги.

2. Сочетание неблагоприятных морфологических условий с чередованием сильных оттепелей и значительных похолоданий, неустойчивым ледоставом и кратковременным зимним ледоходом на затороопасном участке в зоне выклинивания подпора уровня воды Горьковского водохранилища привели в феврале 2020 года к формированию ледового затора в русле р. Волги выше поселка городского типа Некрасовское. При этом снижение пропускной способности русла (по экспертной оценке) на этом участке не превысило 30-40%, а ледомерное обследование затора не проводилось.

3. Время образования ледовых заторов как в феврале 2020 года, так и в январе

2007 года однозначно совпало с периодами значительных колебаний сбросных расходов на Рыбинском гидроузле при общем их существенном росте. В обоих случаях во время формирования заторов осуществлялась сработка уровня воды у плотины гидроузла Горьковского водохранилища более чем на 0,3-0,35 м за счет соответствующего увеличения сбросных расходов на Нижегородском гидроузле. Это подтверждает исключительно негативное влияние предаводковой (предполоводной) сработки уровня воды в водохранилище на условия и возможность образования ледовых заторов на зарегулированном участке реки выше гидроузла.

4. Величина максимального подъема заторных уровней в Волге в районе Ярославля в 2020 году почти на 1 м превысила максимум 2007 года при даже несколько меньших колебаниях сбросов из Рыбинского водохранилища. При весьма сходных погодных и гидрометеорологических условиях в обоих случаях основным отличием являлся «пониженный фон» уровней воды в верхнем бьефе у плотины Нижегородского гидроузла (в 2020 году в январе-феврале они были на 0,8 м ниже, чем в 2007 году).

5. При установлении режимов работы водохранилищ следует, опираясь на «Правила использования водных

ресурсов водохранилищ» (в действующей редакции и в проекте), особо учитывать складывающуюся водохозяйственную и гидрометеорологическую обстановку с учетом анализа наблюдений за опасными гидрологическими явлениями на водном объекте.

Описанные в статье результаты исследований были получены при поддержке гранта Российского научного фонда (грант № 17-77-30006).

Библиографический список

1. Козлов Д.В., Кулешов С.Л. Многомерный анализ данных при оценке факторов заторообразования в речных бассейнах // Водные ресурсы. – 2019. – Т. 46. № 2. – С. 132-141.
2. Прогноз чрезвычайной обстановки на территории Российской Федерации на 2020 год. МЧС России. Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России. 25.12.2019 г. № 6276-19-3-2. Москва – 2019.
3. Готлиб Я.Л., Донченко Р.В., Пехович А.И., Соколов И.Н. Лед в водохранилищах и нижних бьефах ГЭС. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 200 с.
4. Деев Ю.А., Попов Е.Г. Затопы льда и проблема борьбы с ними // Метеорология и гидрологи. – 1968. – № 8. – С. 45-47.
5. Донченко Р.В. Ледовый режим рек СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 242 с.
6. Лисер И.Я. Весенние затопы льда на реках Сибири. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 105 с.
7. Нежиховский Р.А., Бузин В.А. Условия образования и прогнозы затопов льда на реках // Метеорология и гидрология. – 1977. – № 5. – С. 70-75.
8. Шуляковский Л.Г., Еремина В.И. К методике прогноза затопных уровней воды // Метрология и гидрология. – 1952. – № 1. – С. 46-51.
9. Ashton G.D. (ed.). River and lake ice engineering. Water Resources Publications, Littleton, Colorado U.S.A, 1986.
10. Kennedy J.F. Ice jam mechanics // Proc. IAHR Symp. on Ice Problems. – Hanover, 1975. – P. 143-164.
11. Бузин В.А. Затопы льда и затопные наводнения на реках. Монография. – СПб.: Гидрометеиздат, 2004. – 196 с.
12. Бузин В.А. Затопы и зажоры льда на реках России. – СПб: Изд-во Государственного гидрологического института, 2015. – 242 с.
13. Бузин В.А., Зиновьев А.Т. Ледовые процессы и явления на реках и водохранилищах. Методы математического моделирования и опыт их реализации для практических целей (обзор современного состояния проблемы). – Барнаул: Изд-во ИВЭП Сибирского отд. РАН, 2009. – 169 с.
14. Опасные ледовые явления на реках и водохранилищах России. Монография. Под общ. Ред. Д.В. Козлова – М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2015. – 348 с.
15. Василенко Н.Г., Банщикова Л.С. Оперативная оценка участков образования затопов льда и их параметров // Лед и снег. – 2010. – № 2. – С. 61-66.
16. Винников С.Д., Банщикова Л.С. Оценка местоположения и параметров затопы льда на основе исследования уровненного режима реки // Proceedings. Of the 17th International Symposium on Ice VNIIG. – Saint-Petersburg: 2004. – V. 3. – P. 44-47.
17. Дебольская Е.И. Математические модели ледовых затопов и их последствий. Монография под ред. В.К. Дебольского. – М.: Изд-во РУДН, 2014. – 131 с.
18. Кулешов С.Л., Козлов Д.В. Анализ влияния морфометрии русла на частоту образования весенних затопов льда в пределах речного бассейна // Природообустройство. – 2017. – № 5. – С. 15-19.
19. Агафонова С.А., Василенко А.Н., Фролова Н.Л. Факторы образования ледовых затопов на реках бассейна Северной Двины в современных условиях // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2016. – № 2. – С. 82-90.
20. Шаталина И.Н., Трегуб Г.А. Ледовые проблемы строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений. – СПб.: Издательство ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2013. – 452 с.
21. Beltaos S. and Prowse T.D. Climate impacts on extreme ice jam events in Canadian rivers; Hydrological Sciences Journal, 2001, v. 46, no. 1, p. 157-181.
22. Beltaos S. et al. Climate Impacts on Ice-jam Floods in a Regulated Northern River. In: Woo M. (eds) Cold Region Atmospheric and Hydrologic Studies. The Mackenzie GEWEX Experience. 2008, Springer, Berlin, Heidelberg.
23. Wong J, Beltaos Spyros, Krishnappan B. Laboratory tests on surges created by ice jam release // Canadian Journal of Civil Engineering, 2011, Vol. 12, 1985. P. 930-933.

24. **De Munck Stéphane, Gauthier Yves, Bernier Monique, Chokmani Karem, Légaré Serge.** River predisposition to ice jams: A simplified geospatial model // *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2017, № 17. P. 1033-1045.

25. **Lier Oyvind.** Modelling of ice Dams in the Karasjohka River // *Ice in the Environment: Proceedings of the 16th IAHR International Symposium on Ice, Dunedin, New Zealand, 2nd-6th December 2002*, International Association of Hydraulic Engineering and Research.

26. **Mahabir C., Robichaud C., Hicks F., Fayek A.R.** Regression and Fuzzy Logic Based Ice Jam Flood Forecasting. In: Woo M. (eds) *Cold Region Atmospheric and Hydrologic Studies*. 2008, The Mackenzie GEWEX Experience. Springer, Berlin, Heidelberg. 507 p. – Pp. 307-325.

27. **Morin Stephanie, Boucher Etienne, Buffin-Bélanger Thomas.** The spatial variability of ice-jam bank morphologies along the Mistassini River (Quebec, Canada): an indicator of the ice jam regime? // *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*. 2015. T. 77. Vol. 3. P. 2117-2138.

28. **Prowse TD, Conly M, Lalonde V.** Hydrometeorological conditions controlling ice-jam floods, Peace River near the Peace-Athabasca Delta. Northern river basins study, Project report. 1996, No. 103, NRBS, Edmonton, Canada.

29. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 3. Прогноз ледовых явлений

на реках и водохранилищах. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – 168 с.

30. Методические указания по предотвращению образования ледовых заторов на реках Российской Федерации и борьбе с ними. / Шахраманьян М.А., Векслер А.Б., Козлов Д.В., и др. – М.: ФЦ ВНИИ ГОЧС, 2004. – 234 с.

31. Каталог заторных и зазорных участков рек СССР. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. Т. 1. – 260 с.; Т. 2. – 288 с.

32. Проект Правил использования водных ресурсов Рыбинского и Горьковского водохранилищ на р. Волге. – М.: ФГУП ЦРиК, 2011.

33. **Калинин В.Г.** Ледовый режим рек и водохранилищ бассейна Верхней и Средней Камы. – Пермь: ПГНИУ, 2008. – 252

Материал поступил в редакцию 31.03.2020 г.

Сведения об авторах

Беднарук Сергей Евстафьевич, начальник Информационно-аналитического центра регистра и кадастра ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт водных проблем РАН; 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, 2; e-mail: sebed@vodinfo.ru

Козлов Дмитрий Вячеславович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Гидравлики и гидротехнического строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; Институт водных проблем РАН; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: kozlovdv@mail.ru

S.E. BEDNARUK

Federal state budgetary educational institution of higher education «Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev», Institute of water problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

D.V. KOZLOV

Department of Hydraulics and hydraulic construction, National research Moscow state University of civil engineering, Institute of water problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

CAUSES AND CONSEQUENCES OF THE FLOOD-PRONE ICE SITUATION BELOW THE RYBINSK HYDROELECTRIC POWER STATION

Flooding due to ice jam is very dangerous. In Russia, in 1991-2017, 134 these floods with recorded material damage were registered. A qualitative and quantitative assessment of the factors that influenced the occurrence of icejam and the development of winter flooding on the Volga river below the Rybinsk hydroelectric station in the Yaroslavl region in February 2020 was performed. Operational reports and forecasts of the Ministry of emergency situations of Russia, RusHydro and Rosgidromet, as well as information from Federal Water Resources Agency (Rosvodresurs) about the water management situation on the territory of the Upper-Volga Basin water management and the operating modes of reservoirs of the Volga-Kama cascade were used as initial information. The analysis

of the causes and consequences of the ice-jam situation in the river section of the Gorky reservoir below the Rybinsk hydroelectric station showed that one of the three main factors of ice jam congestion played a decisive role in the formation of ice congestion, namely, insufficient ice and water flow capacity of the channel, associated with its morphological features. The combination of unfavorable morphological and complex hydrometeorological conditions, the presence of unstable ice jam conditions and a fairly high water content in January-February 2020 throughout the upper Volga region led in February 2020 to the formation of an ice jam in the Volga riverbed above the urban-type settlement of Nekrasovskoye and to a flood of ice jam type in the area of the city of Yaroslavl. The time of ice jam formation both in February 2020 and in January 2007 coincided with periods of significant fluctuations in discharge costs at the Rybinsk HPS, with their overall significant growth. This confirmed the extremely negative impact of pre-flood water level development in the reservoir on the conditions and the possibility of ice jams on the regulated section of the river above the reservoir. These studies can be used to justify the modes of operation of reservoirs in the Volga-Kama cascade of water nodes and to develop rules for the use of water resources in reservoirs.

Ice jam, the flood-prone ice situation, flooding, channel capacity, hydroelectric power station (HPS), reservoir, discharge flow, morphometric features

References

1. **Kozlov D.V., Kuleshov S.L.** Multidimensional data analysis in assessing factors of flooding in river basins // Water resources. 2019. Vol. 46, No. 2. P. 132-141.
2. Forecast of the emergency situation on the territory of the Russian Federation for 2020. EMERCOM of Russia. All-Russian research Institute for civil defense and emergency situations of the Ministry of emergency situations of Russia. 25.12.2019, No. 6276-19-3-2. Moscow-2019.
3. **Gotlib J.L., Donchenko R.V., Pejovic A.I., Sokolov I.N.** The ice in the reservoirs and lower pools of hydroelectric power plants. L.: Hydrometeoizdat, 1983. – 200 p.
4. **Deyev Yu.A., Popov E.G.** Ice Jams and the problem of fighting them. – Meteorology and hydrology, 1968. No. 8. Pp. 45-47.
5. **Donchenko R.V.** Ice regime of rivers of the USSR. L.: Hydrometeoizdat, 1987. – 242 p.
6. **Liser I.Ya.** Spring ice jams on the rivers of Siberia. L.: Hydrometeoizdat, 1967. – 105 p.
7. **Nezhikhovskiy R.A., Buzin V.A.** Conditions of formation and forecasts of ice congestion on rivers // Meteorology and hydrology. 1977. No. 5. Pp. 70-75.
8. **Shulyakovskiy L.G., Eremina V.I.** to the method of predicting congestion water levels // Metrology and hydrology. 1952. No. 1. Pp. 46-51.
9. **Ashton G.D.** (ed.). River and lake ice engineering. Water Resources Publications, Littleton, Colorado U.S.A, 1986.
10. **Kennedy J.F.** Ice jam mechanics // Proc. IAHR Symp. on Ice Problems. – Hanover, 1975. – P. 143-164.
11. **Buzin V.A.** Ice blocks and ice-dam flooding on the rivers. Monograph. S.-Pb.: Hydrometeoizdat, 2004. – 196 p.
12. **Buzin V.A.** Congestion and ice jams on the rivers of Russia. S. – Pb: Publishing house of the State hydrological Institute, 2015. – 242 p.
13. **Buzin V.A., Zinoviev A.T.** Ice processes and phenomena on rivers and reservoirs. Methods of mathematical modeling and experience of their implementation for practical purposes (review of the current state of the problem). Barnaul: Publishing house of IWEP Sibirskoe otd. RAS. 2009. – 169 p.
14. Dangerous ice phenomena on rivers and reservoirs in Russia. Monograph. Under the General Editorship of D.V. Kozlov-M.: RGAU-MSHA named after K.A. Timiryazev, 2015. – 348 p.
15. **Vasilenko N.G., Banshchikova L.S.** Operational assessment of ice congestion formation sites and their parameters // Ice and snow. 2010. No. 2. Pp. 61-66.
16. **Vinnikov S.D., Banshchikova L.S.** Estimation of the location and parameters of ice congestion based on the study of the river level regime // Proceedings. of the 17th International Symposium on Ice VNIIG, Saint-Petersburg, Russia. 2004. Vol. 3. Pp. 44-47.
17. **Debolskaya E.I.** Mathematical models of ice jams and their consequences. Monograph under the editorship of V.K. Debolsky. Moscow: RUDN Publishing house, 2014. – 131 p.
18. **Kuleshov S.L., Kozlov D.V.** Analysis of the influence of channel morphometry on the frequency of formation of spring

ice jams within the river basin // Prirodobustroystvo. 2017. No. 5. P. 15-19.

19. **Agafonova S.A., Vasilenko A.N., Frolova N.L.** Factors of formation of ice jams on the rivers of the Northern Dvina basin in modern conditions // Bulletin of the Moscow University. Series 5: Geography. 2016. No. 2. Pp. 82-90.

20. **Shatalina I.N., Tregub G.A.** Ice problems of construction and operation of hydraulic structures. SPb.: Publishing house of VNIIG im. B.E. Vedeneeva, 2013. – 452 p.

21. **Beltaos S. and Prowse T.D.** (2001): Climate impacts on extreme ice jam events in Canadian rivers; Hydrological Sciences Journal, v. 46, no. 1, p. 157-181.

22. **Beltaos S.** et al. (2008) Climate Impacts on Ice-jam Floods in a Regulated Northern River. In: Woo M. (eds) Cold Region Atmospheric and Hydrologic Studies. The Mackenzie GEWEX Experience. Springer, Berlin, Heidelberg.

23. **Wong J, Beltaos Spyros, Krishnappan B.** (2011). Laboratory tests on surges created by ice jam release // Canadian Journal of Civil Engineering, 2011, Vol. 12, 1985. P. 930-933.

24. **De Munck Stéphane, Gauthier Yves, Bernier Monique, Chokmani Kareem, Légaré, Serge.** (2017). River predisposition to ice jams: A simplified geospatial model // Natural Hazards and Earth System Sciences, 2017, № 17. P. 1033-1045.

25. **Lier Oyvind.** (2019). Modelling of ice Dams in the Karasjohka River // Ice in the Environment: Proceedings of the 16th IAHR International Symposium on Ice, Dunedin, New Zealand, 2nd-6th December 2002, International Association of Hydraulic Engineering and Research

26. **Mahabir C., Robichaud C., Hicks F., Fayek A.R.** (2008) Regression and Fuzzy Logic Based Ice Jam Flood Forecasting. In: Woo M. (eds) Cold Region Atmospheric and Hydrologic Studies. The Mackenzie GEWEX Experience. Springer, Berlin, Heidelberg. 507 p. – Pp. 307-325.

27. **Morin Stephanie, Boucher Etienne, Buffin-Bélanger Thomas.** (2015). The spatial variability of ice-jam bank morphologies

along the Mistassini River (Quebec, Canada): an indicator of the ice jam regime? // Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards. 2015. T. 77. Vol. 3. P. 2117-2138.

28. **Prowse TD, Conly M, Lalonde V.** (1996) Hydrometeorological conditions controlling ice-jam floods, Peace River near the Peace-Athabasca Delta. Northern river basins study, Project report no. 103, NRBS, Edmonton, Canada

29. Guide to hydrological forecasts. Vol. 3. Forecast of ice events on rivers and reservoirs. L.: Hydrometeoizdat. 1989. – 168 p.

30. Guidelines for preventing and combating ice jams on rivers of the Russian Federation. Shakhramanyan / M. A., Veksler A.B., Kozlov D.V., et al. – Moscow: Federal research center of higher education, 2004. – 234 p.

31. Catalog of congestion and ice jams of rivers of the USSR L.: Hydrometeoizdat, 1976. Vol. 1. – 260 p.; Vol. 2. – 288 p.

32. Draft Rules for the use of water resources in the Rybinsk and Gorky reservoirs on the Volga river (2011).

33. **Kalinin V.G.** Ice regime of rivers and reservoirs in the Upper and Middle Kama basin. Perm: PGNIU, 2008. – 252 p.

The material was received at the editorial
31.03.2020

Information about the authors

Bednaruk Sergey Evstafyevich, head of the Information and analytical center of the register and cadastre, Russian state agrarian University – MTAA named after K.A. Timiryazev; Institute of water problems of the Russian Academy of Sciences; 2 Pryanishnikova str., Moscow, 127550: e-mail: sebed@vodinfo.ru

Kozlov Dmitry Vyacheslavovich, doctor of technical Sciences, Professor, head of the Department of Hydraulics and hydraulic construction, National research Moscow state University of civil engineering, Institute of water problems of the Russian Academy of Sciences; 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26; e-mail: kozlovdv@mail.ru