

УДК 556.535.5

С.А. Агафонова¹, А.Н. Василенко², Н.Л. Фролова³

ФАКТОРЫ ОБРАЗОВАНИЯ ЛЕДОВЫХ ЗАТОРОВ НА РЕКАХ БАСЕЙНА СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

На примере наиболее проблемных участков рек бассейна р. Северная Двина рассмотрены современные особенности заторообразования, характеризующиеся сложным сочетанием меняющихся климатических условий и антропогенного воздействия.

Исследование на реках бассейна Северной Двины разных фаз ледового режима и его опасных проявлений выполнено на основе данных наблюдений на 15 гидрологических постах с начала наблюдений до 2015 г. включительно.

Рассмотрено применение искусственных нейронных сетей для прогноза максимальных заторных уровней воды. Наилучшие результаты для прогноза максимальных заторных уровней воды получены при использовании данных об уровнях воды в период установления ледостава и продолжительности осеннего шугохода, а также информации о суммах отрицательных значений температуры воздуха за холодный период. Для прогноза заторной составляющей максимального уровня воды дополнительно надо учитывать данные о толщине льда, а также информацию о расходах воды перед вскрытием реки. Использование данных об осенних условиях в качестве предикторов позволит составлять долгосрочные прогнозы максимальных заторных уровней воды, а использование информации за период, предшествующий вскрытию, позволит уточнить заторную составляющую максимального уровня воды. Положительный опыт применения искусственных нейронных сетей в этой сфере позволит в дальнейшем выработать наиболее эффективные рекомендации по снижению негативного воздействия вод на население и хозяйство.

Ключевые слова: опасные гидрологические явления, изменения климата, ледовый режим, заторы льда.

Введение. Исследование ледового режима рек – важная научная и практическая задача из-за особенностей географического положения и климатических условий нашей страны. Со сроками и продолжительностью ледовых явлений связаны многие виды хозяйственной деятельности – условия навигации, нормальное функционирование гидротехнических сооружений и др. Во многих случаях ледовыми явлениями обусловлены опасные гидрологические процессы. Среди них особое место занимают заторы льда. Скопления льдин в русле при заторах вызывают подъем уровня воды и наводнения. Нередко заторный уровень воды превышает максимальный уровень половодья. Заторные наводнения особо опасны тем, что происходят в холодное время года и сопровождаются выходом на берег льда, который разрушает сооружения, расположенные в пределах зоны затопления. Ущерб, причиняемый заторами льда, как правило, намного превышает ущерб от наводнений в период свободной ото льда реки [Бузин, 2004].

Заторы – важная особенность ледового режима рек, текущих с юга на север. Если процесс вскрытия распространяется от верхнего течения к нижнему, то заторы в период вскрытия формируются ежегодно, но не всегда ведут к значительному ущербу. Задерживая лед и давая тем самым воз-

можность рассредоточиться ледовым массам ниже по течению, они в какой-то мере нормализуют ледоход. При большом количестве ледового материала в бассейне после суровой зимы заторы образуются в верховьях рек и при благоприятных погодных условиях задерживают процесс вскрытия, пока реки не освободятся ото льда на достаточном протяжении. При малом количестве льда остановка ледяных полей происходит значительно ниже по течению. Распределение мест образования заторов по длине реки зависит также от водности в период вскрытия. Мощная волна половодья проталкивает лед на большее расстояние, и заторы образуются ниже по течению, чем в годы с низкой водностью [Опасные..., 2015].

В работе рассмотрены особенности образования заторов льда на р. Северная Двина и ее главных притоках (реках Сухона и Вага) (рис. 1), оценены современные методы прогнозирования максимальных заторных уровней воды для рек бассейна Северной Двины.

На р. Северная Двина заторы формируются чаще всего на участках вблизи г. Великий Устюг, г. Котлас, с. Двинский Березник, д. Орленцы, с. Холмогоры. Вблизи первых двух городов заторообразованию способствуют резкое уменьшение уклона

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: sv_andreevna@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, студент; e-mail: saiiia24@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, профессор, докт. геогр. н.; e-mail: frolova_nl@mail.ru

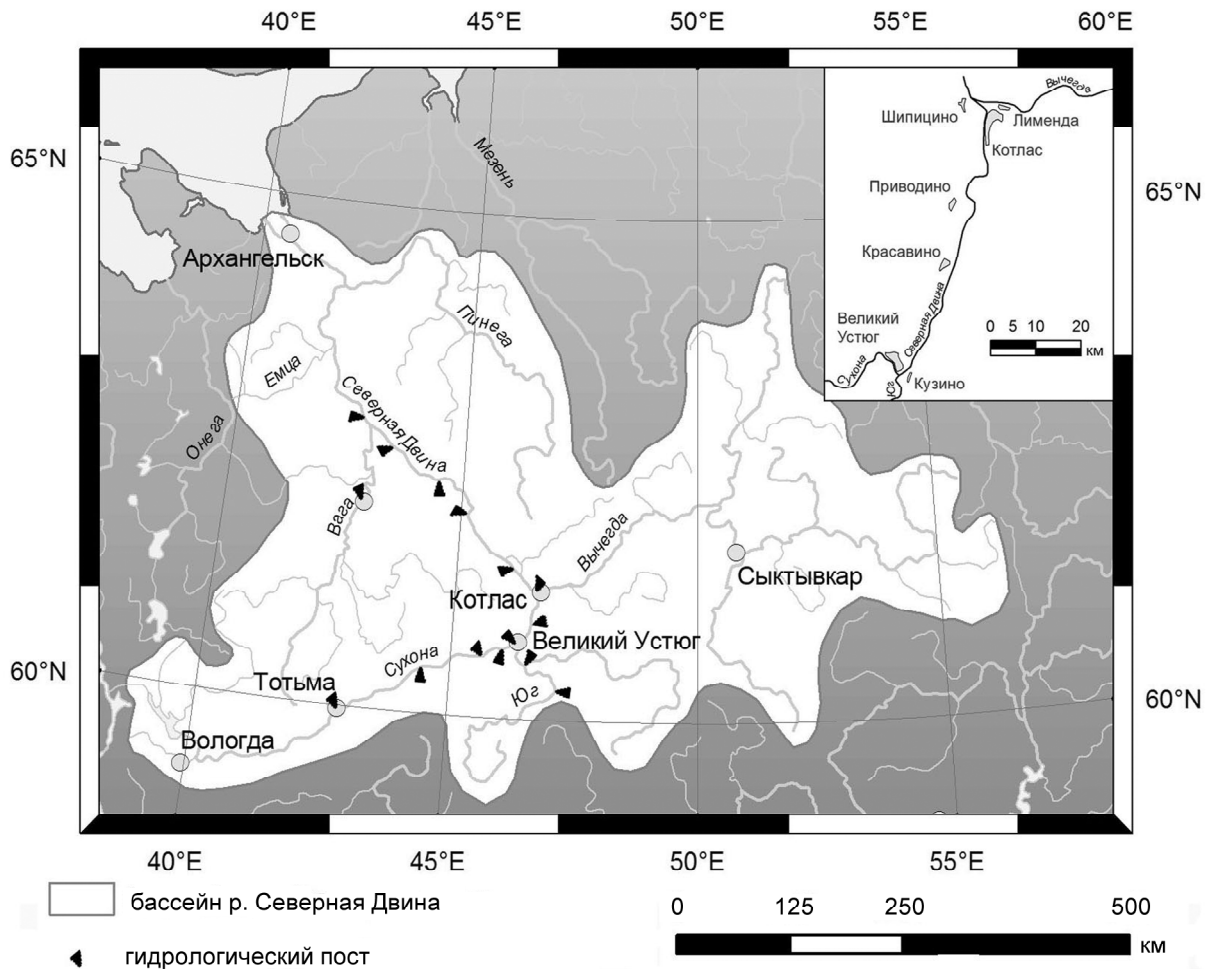


Рис. 1. Исследуемая территория (выделен участок Северной Двины от слияния Сухоны и Юга до впадения Вычегды)

Fig. 1. Study area (the Severnaya Dvina River from the confluence of the Sukhona and Yug rivers to the inflow of the Vychegda River is indicated)

водной поверхности, наличие островов и резких поворотов русла или коренного берега; у д. Орленцы – необычно крутой поворот реки и сужение русла; в районе Холмогор – разделение реки на многочисленные мелководные рукава и наличие нескольких резких поворотов основного русла, где лед при подвижках упирается в коренной берег. На р. Сухона заторы льда образуются обычно у островов Еловец, Осовой, Дедов и на крутых поворотах реки у деревень Двиницы, Мотыри, Черновские, Селище, Опоки. Нередки они и в устье реки у г. Великий Устюг. Заторы в устье обычно являются хвостовым продолжением упоминавшихся выше северодвинских заторов, но иногда голова затора устанавливается на р. Сухона перед ее слиянием с р. Юг. Последнее характерно в те годы, когда р. Юг, вскрываясь одновременно или несколько раньше, чем Сухона, создает сильный подпор на устьевом участке и препятствует поступлению сухонского льда в р. Северная Двина. Заторы льда постоянно образуются на р. Юг в месте ее крутого поворота у с. Стрелка, на 12 км выше устья [Русловые..., 2012]. Протяженность крупных заторов составляет нередко 10–20 км. Продолжительность существования заторов колеблется от нескольких часов до 3–5 дней.

Ледовый режим бассейна р. Северная Двина достаточно изучен, ежегодно привлекаются значительные силы и материальные средства для предотвращения образования заторов льда, мониторинг прохождения весеннего ледохода осуществляется как на сети постоянного действующих, так и временных гидрологических постов, с 2009 г. также используются данные космических снимков. Но ледовые проблемы для этой территории остаются до конца не решенными: ущерб судоходным компаниям из-за сокращения периода навигации при длительных заторах, повреждение опоры Котласского автомобильного моста при зимнем вскрытии в 2006 г., заторное наводнение в 2013 г. в районе г. Великий Устюг и г. Красавино и т.д.

Можно отметить снижение интенсивности заторных явлений на отдельных перекатах в районе г. Великий Устюг (перекаты Шабурный, Голодаевские, Аристовские).

Однако если рассматривать морфологически сложные участки, где кроме общего снижения пропускной способности русла важную роль в формировании заторов играет его морфология (узел слияния Сухоны и Юга, Нижний Бобровниковский – Даниловский перекаты, система перекатов в районе Приводинской излуцины – Кобыльниковские, Яро-

курский, Вотлажемские, Новинский перекааты), то практика проведения превентивных мероприятий не позволяет говорить об их достаточной эффективности [Frolova et al., 2015]. Ледовые заторы на них формируются практически ежегодно, и только в случае благоприятных климатических условий (малая толщина и слабая прочность ледового покрова, невысокая волна половодья и затяжной характер снеготаяния, одновременное прохождение ледохода на Сухоне и Юге) половодье на Северной Двине проходит без значительных ущербов.

Отметим, что проведение превентивных мероприятий и провоцирование преждевременного ледохода в условиях недостаточного ослабления структуры ледяного покрова в начальный период снеготаяния нередко приводят к ухудшению ситуации на участках, расположенных ниже. Аналогичная ситуация наблюдается при прорыве уже сформировавшихся заторов, в результате чего ледовые поля смещаются вниз по течению, где забивают русло на еще не вскрытых участках, приводя нередко к катастрофическим подъемам уровня воды. Такая ситуация сложилась весной 2013 г. – спровоцированный взрывными работами прорыв затора в районе д. Демьяново привел к формированию гораздо более мощного затора в районе Пускинской излучины, где лед не был подготовлен к вскрытию. Максимальные уровни воды в районе г. Красавино превысили исторический максимум 1914 г., что привело к катастрофическому затоплению города.

Организация мониторинга и разработка противозаторных мероприятий в рамках исследуемой территории осложняется наблюдаемыми изменениями ледового режима, связанными, в том числе, с меняющимися климатическими условиями.

Материалы и методы исследований. Исследование на реках бассейна Северной Двины разных фаз ледового режима и его опасных проявлений выполнено на основе данных наблюдений на 15 гидрологических постах (г/п) с начала наблюдений до 2015 г. включительно (рис. 1). Данные об опасных ледовых явлениях за последние годы, а также оперативные сводки об обстановке на реках взяты с сайтов Северного межрегионального территориального управления Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [Информация..., 2015] и Двинско-Печорского бассейнового водного управления Федерального агентства водных ресурсов [Отчет..., 2013, 2014, 2015].

Сделана попытка составить схему прогноза максимальных заторных уровней воды р. Сухона в районе г. Великий Устюг с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС). Обучение ИНС проводили с использованием программы Statistica 7. Модуль «Neural networks» этой программы – один из самых современных инструментов для обучения искусственных нейронных сетей, включающий в себя большое количество как простых, так и сложных архитектур, а также множество вариантов активирующих и весовых функций. При обработке данных использованы также статистические и прогности-

ческие методы, изложенные в [Руководство..., 1989; Христофоров, 1988].

В основе ИНС лежит попытка моделирования процессов, протекающих в человеческом мозге. Математический нейрон представляет собой взвешенный сумматор, который обрабатывает совокупность поступивших в него сигналов с помощью различных весовых функций либо коэффициентов в зависимости от типа ИНС. Каждая нейронная сеть имеет в составе входные нейроны, в которые помещается исходная информация; нейроны скрытого слоя, в которых идет преобразование данных, а также нейроны выходного слоя, в которые поступает результат вычислений. Совокупность нейронов и путей связи между ними представляет собой архитектуру нейронной сети [Васильев, 2009].

Искусственные нейронные сети успешно опробованы для прогнозирования стока, сроков наступления различных гидрологических явлений, расчетов загрязнений и воднобалансовых расчетов. Применение ИНС для прогнозирования максимальных заторных уровней может быть оправдано значительным числом факторов, влияющих на образование затора и заторного подъема воды [Darrell, Massie, 2002]. Отличительная черта ИНС – возможность ее обучения, т.е. обновления связей между различными предикторами с целью оптимизации прогноза и запоминания сетью всех шагов обучения. Обученная модель способна «распознавать» данные, необходимые для прогнозирования в массивах информации, и применять их для формирования прогноза.

Использована архитектура трехслойного перцептрона (ТП), в которой каждому нейрону скрытого слоя назначается определенный вес, преобразующий исходные данные, и активационная функция, участвующая в передаче данных в выходной слой. Оптимизация прогноза проходила по методу антиградиента. В этом случае сигнал последовательно возвращается от выходных нейронов к скрытому слою, далее к входному слою, а затем возвращается к выходному, и так до тех пор, пока в многомерном анализируемом пространстве не будет достигнут минимум.

Результаты исследований и их обсуждение. В условиях климатических изменений особенности ледового режима Северной Двины носят сложный характер. Некоторые выводы о происходящих изменениях ледового режима изложены в предыдущих работах авторов [Агафонова, 2006; Agafonova, 2010]. Использование данных наблюдений последних лет (до 2015 г.) позволяет существенно дополнить характеристику наблюдаемых изменений. Особенно заметно в последние годы изменилось время установления ледостава (рис. 2, а). Для выяснения наличия у исследуемых рядов монотонного (возрастающего или убывающего) тренда использован непараметрический критерий тренда Спирмена [Христофоров, 1988]. Расчеты показывают, что изменения сроков наступления ледостава статистически значимы. Иногда ледостав устанавливает-

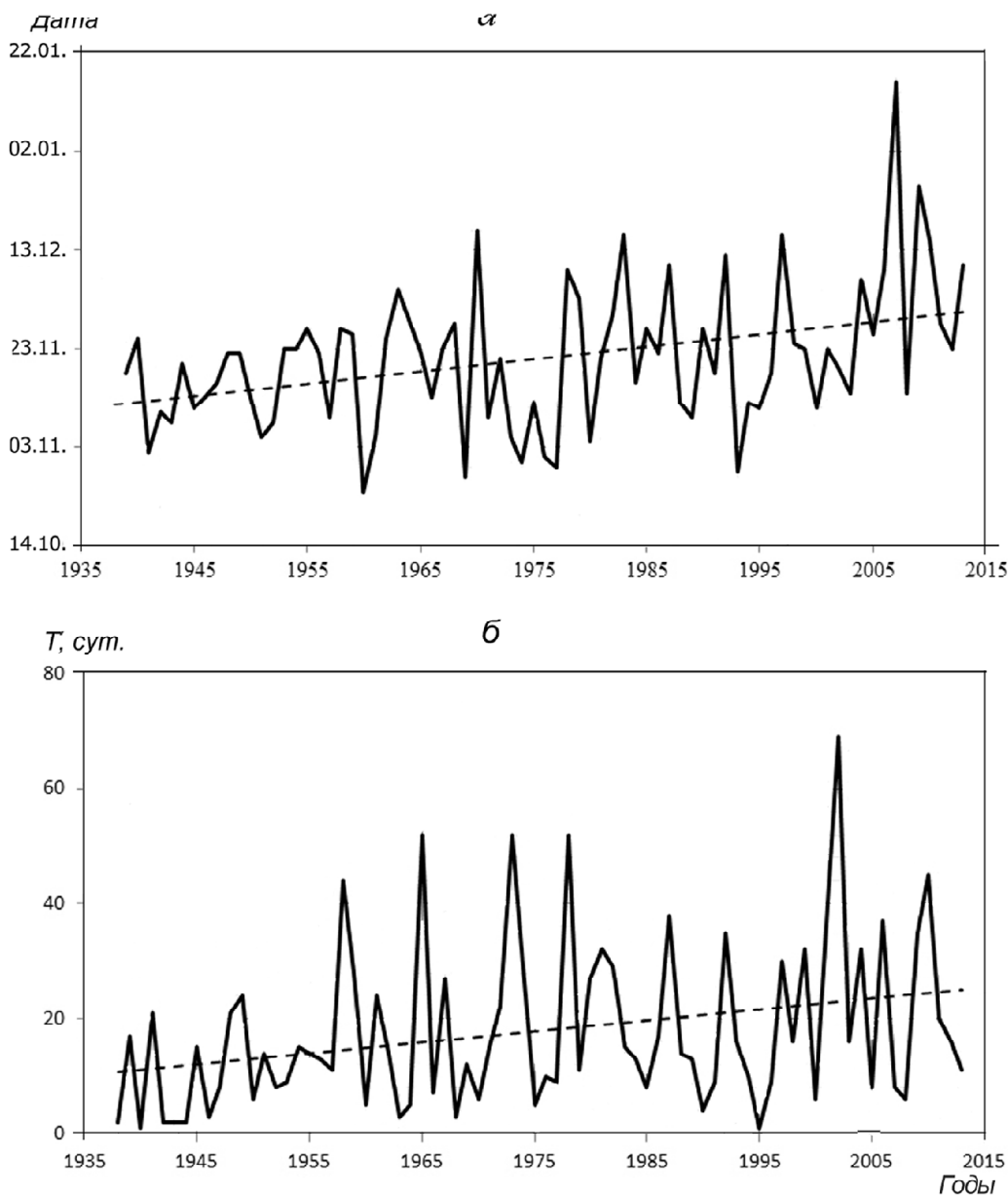


Рис. 2. Изменение даты начала ледостава (а) и продолжительности периода замерзания (б) р. Сухона в районе г. Великий Устюг
 Fig. 2. Changes of the freeze-up date (a) and the duration of the freezing period (b) on the Sukhona River in the town of Veliky Ustyug

ся на месяц и более позже среднего многолетнего срока, при этом срок появления льда меняется мало. Это связано с низкими расходами воды в период начала ледовых явлений и неустойчивым температурным режимом в ноябре (возвращением положительных значений температуры), который обуславливает формирование снегодождевых паводков.

В сложившихся условиях все чаще наблюдаются длительные периоды замерзания, которые сопровождаются образованием зажоров и заканчиваются установлением ледостава при высоких уровнях воды (рис. 2, б). В настоящее время можно говорить о значительно возросшей значимости влияния зажорных явлений в предледоставный период на формирование ледовых заторов в период вскрытия рек и, соответственно, на максимальные уровни воды при прохождении половодья. Изменение характеристик ледового режима в период вскрытия заключается в сдвиге

средних сроков первой подвижки, начала ледохода и очищения на 1–3 дня раньше, и эти изменения статистически не значимы. Смещение сроков происходит из-за роста повторяемости экстремально раннего начала весенних ледовых процессов. При экстремально раннем вскрытии увеличивается вероятность резкого похолодания, при котором возрастает прочность льда, снижаются уровни воды, стабилизируются уже образовавшиеся заторы.

Для тех лет, когда вскрытие происходит в сроки, близкие к среднемноголетним, наблюдается четкая тенденция к уменьшению продолжительности продвижения фронта вскрытия и очищения, например по р. Сухона. Одновременное вскрытие протяженных участков увеличивает вероятность образования мощных заторов [Agafonova, Frolova, 2010].

В последние годы на европейской территории России наблюдается тенденция к снижению расхо-

дов воды в период весеннего половодья. В бассейне р. Северная Двина начиная с 2000 г. все чаще весенний ледоход проходит при низких расходах воды. Очищение ото льда в такие годы затягивается, что сокращает и без того непродолжительный период навигации [Агафонова, 2010; Frolova et al., 2015].

Важный фактор современного заторообразования на реках Сухона и Северная Двина – антропогенное воздействие. Речь идет прежде всего о противозаторных мероприятиях (ледорезных и взрывных работах, сбросе теплых сточных воды), объем которых с каждым годом растет.

На р. Малая Северная Двина от г. Великий Устюг до г. Котлас ледорезные работы с чернением пропилов проводятся ежегодно [Отчет..., 2013, 2014, 2015]. Но повторяемость заторов ниже г. Великий Устюг не снижается, как не снижаются и максимальные заторные уровни воды и их заторные составляющие (рис. 3, 4). В работе [Бузин и др., 2014] также подтверждено отсутствие статистически значимых изменений в многолетнем ряде максимальных заторных уровней воды р. Сухона у г. Великий Устюг.

Для защиты г. Котлас осуществляется сброс теплых сточных воды ТЭС-1 Котласского ЦБК для

какая образование заторов в относительно безопасных местах. Заторы в районе гп Каликино на р. Сухона создают условия для снижения вероятности образования заторов у г. Великий Устюг ниже по течению. Заторы в Орленцах позволяют Северной Двине ниже по течению достаточно подготовиться к вскрытию, в этом случае катастрофические заторы у Архангельска не образуются.

Среди населенных пунктов, для которых весенний ледоход проходит максимально сложно, выделим г. Великий Устюг. Большинство наводнений в Великом Устюге за всю историю наблюдений имело заторный характер. С 1877 по 2015 г. в пределах этого участка зафиксировано 9 катастрофических наводнений, вызвавших огромный экономический ущерб. Заторы, влияющие на максимальные уровни воды у города, обычно формируются на протяженном перекатном участке ниже узла слияния рек Сухона и Юг. Фактически это первое по течению речной системы место, где созданы все условия для образования заторов. С этим связана особая важность создания эффективной методики прогнозирования максимальных заторных уровней воды на этом участке.

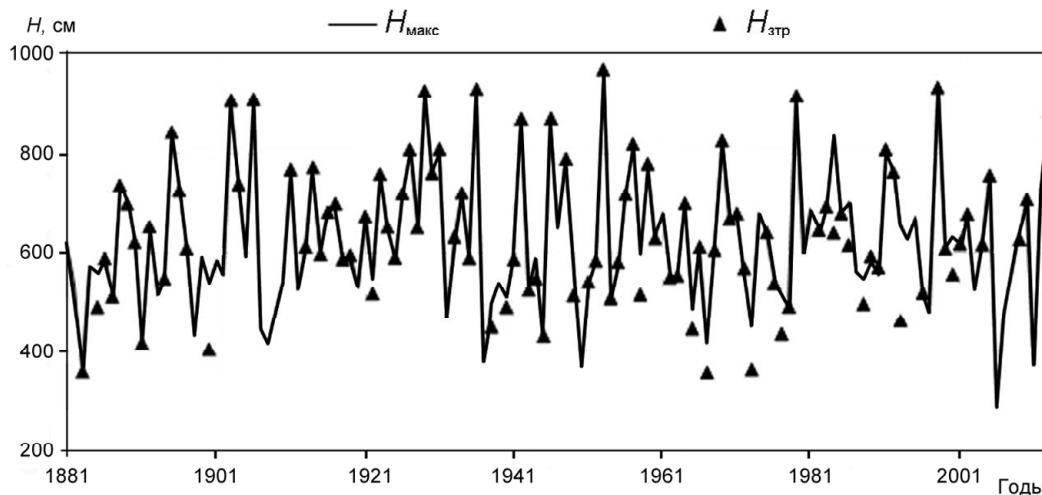


Рис. 3. Изменение максимального уровня воды р. Сухона в районе г. Великий Устюг в период весеннего ледохода (H_{\max}) и в период образования заторов льда ($H_{\text{зтр}}$) (отметка «нуля» графика поста 49,34 м БС)

Fig. 3. Changes of the maximum water level during the ice run period (H_{\max}) and the ice jam period (H_{icejam}) on the Sukhona River in the town of Veliky Ustyug (the gauge «zero» is 49,34 m BS)

образования протяженной полыньи. Заторы не образуются на довольно протяженном участке, но ежегодно формируются у кромки полыньи в районе гидрологического поста (гп) Телегово.

На сегодняшний день оценки эффективности противозаторных мероприятий на реках России расходятся. Огромные объемы ледорезных и взрывных работ не снижают повторяемость заторных наводнений. Отметим, что на реках, текущих с юга на север, невозможно обеспечить беззаторное прохождение весеннего ледохода от истока до устья. Планирование противозаторных мероприятий должно быть организовано только в рамках всего речного бассейна в целом. Необходимо предотвращать заторы ниже крупных населенных пунктов, допус-

Существующие методики прогноза максимальных заторных уровней, в том числе для р. Сухона у Великого Устюга, основаны на эмпирических зависимостях [Карнович, 1984; Бузин, 1986, 2010; Агафонова, 2006]. Но в настоящее время погрешность прогнозов по таким методикам увеличилась [Бузин и др., 2014]. Главная причина – меняющиеся условия прохождения весеннего ледохода: климатические изменения, возрастающий объем противозаторных мероприятий, снижение ледопроемной способности русла из-за прекращения дноуглубительных работ.

Для составления прогноза максимальных заторных уровней воды р. Сухона в районе Великого Устюга нами использован метод ИНС. В качестве предикторов взяты данные по гп на реках Сухона и

Юг, характеризующие различные гидрологические условия от образования ледостава до подготовки к вскрытию. Прогноз составлялся как для максимального заторного уровня воды, так и для заторной составляющей максимального уровня. Предикторы разделены на три блока: «Осень» – уровни воды при установлении ледостава на р. Сухона в районе гп Тотьма, Березовая Слободка, Каликино и Великий Устюг, а также продолжительность осеннего шугохода на р. Сухона в районе г. Великий Устюг; «Зима» – сумма отрицательных значений температуры воздуха с метеостанции (мс) Котлас, максимальная толщина льда и толщина льда перед вскрытием на р. Сухона в районе гп Тотьма, Березовая Слободка, Каликино и Великий Устюг; «Весна» – даты вскрытия Сухоны в районе гп Тотьма, Березовая Слободка, Каликино и Великий Устюг, расходы воды р. Сухона у с. Каликино и р. Юг у с. Подосиновец перед вскрытием.

Включение в прогноз данных с нескольких гп на Сухоне позволяет учесть распределение характеристик условий, сложившихся к началу вскрытия, возможное распределение заторов по длине реки и вероятность формирования затора льда ниже г. Великий Устюг. Были опробованы различные сочетания предикторов. В результате значение квадрата коэффициента корреляции между фактическими и спрогнозированными значениями составило 0,60–0,75. Модуль «Neural networks» в качестве оценки качества получаемой зависимости предлагает отношение стандартного отклонения ошибки прогноза к стандартному отклонению исходных данных. В практике гидрологических прогнозов для оценки качества зависимости используется характеристика s/δ , где s – среднее квадратическое отклонение эмпирических точек от установленной зависимости, а δ – среднее квадратическое отклонение предсказываемой величины [Руководство..., 1989].

Для большинства опробованных вариантов сочетания предикторов значение s/δ , определенное методом выбрасываемой точки [Христофоров, 1988], составило $<0,7$, что соответствует удовлетворительному качеству прогнозов. Наилучшие результаты для прогноза максимальных заторных уровней воды получены при использовании блока осенних условий отдельно и совместно с данными о суммах значений

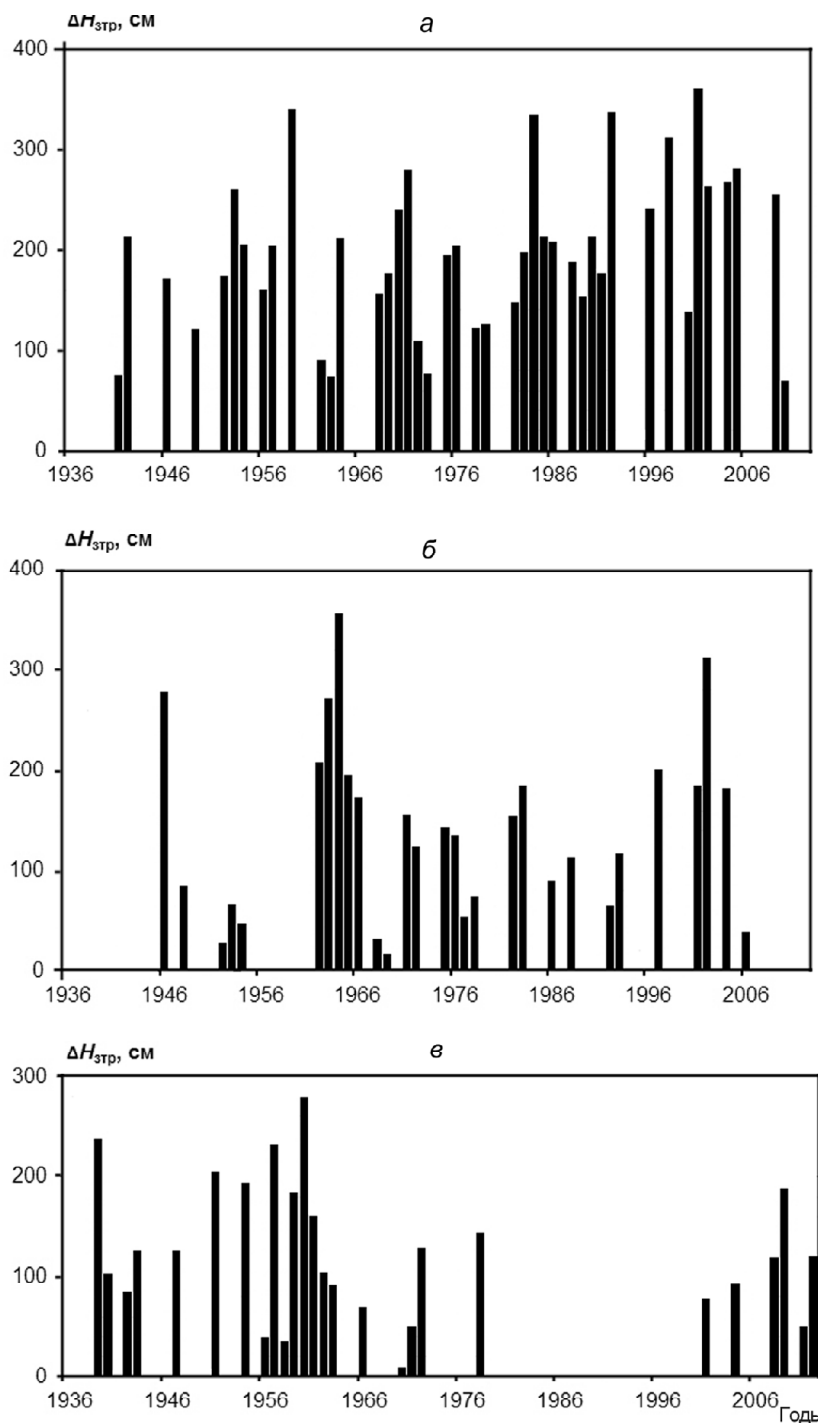


Рис. 4. Изменение величины заторной составляющей уровня воды р. Сухона в районе г. Великий Устюг (а), Малой Северной Двины в районе д. Медведки (б) и г. Котлас (в)

Fig. 4. Changes of the ice jam component of water level on the Sukhona River in the town of Veliky Ustyug (a), on the Severnaya Dvina River in Medvedki (b) and in the town of Kotlas (v)

отрицательной температуры ($s/\delta=0,6$), для прогноза заторной составляющей максимального уровня воды – при использовании блока осенних условий совместно с данными о толщине льда перед вскрытием, а также при использовании блока весенних условий ($s/\delta=0,5$). Использование данных об осенних условиях в качестве предикторов позволит составлять долгосрочные прогнозы максимальных заторных уровней воды, а использование весенних условий –

уточнит заторную составляющую максимального уровня воды. Проверка методики прогноза на независимом материале показала удовлетворительный результат.

Выводы:

– в современных условиях прогнозирование максимальных заторных уровней воды и организация противозаторных мероприятий остаются весьма актуальными. Заторы занимают особое место среди опасных ледовых явлений. Ущерб, причиняемый заторами льда, как правило, намного превышает ущерб от наводнений в период, когда река свободна ото льда;

– современные особенности образования заторов на реках бассейна р. Северная Двина обусловлены изменением климата, а также возросшим антропогенным воздействием, в том числе колоссальным объемом противозаторных мероприятий;

– ежегодно проводимые в бассейне р. Северная Двина противозаторные мероприятия не приводят к снижению повторяемости заторов льда. Следует учитывать, что на реках исследуемой территории, текущих с юга на север, невозможно обеспечить беззаторное прохождение весеннего ледохода на всем протяжении от истоков до устьев, и организация мер по борьбе и предотвращению заторов возможна лишь в рамках всего бассейна в целом;

– погрешность прогнозов максимальных заторных уровней воды, основанных на эмпирических зависимостях, для этого участка растет. Авторы приняли попытку составить схему прогноза с помощью искусственных нейронных сетей. Наилучшие результаты для прогноза максимальных заторных уровней воды получены при использовании данных об уровнях воды в период установления ледостава и продолжительности осеннего шугохода, а также информации о суммах отрицательных значений температуры воздуха. Для прогноза заторной составляющей максимального уровня воды дополнительно надо учитывать данные о толщине льда перед вскрытием, а также информацию о расходах воды перед вскрытием реки. Использование данных об осенних условиях в качестве предикторов позволит составлять долгосрочные прогнозы максимальных заторных уровней воды, а использование информации в период, предшествующий вскрытию, – уточнить заторную составляющую максимального уровня воды;

– положительный опыт применения искусственных нейронных сетей в этой сфере позволит в дальнейшем выработать наиболее эффективные рекомендации по снижению негативного воздействия вод на население и хозяйство.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-37-00038).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агафонова С.А., Фролова Н.Л. Особенности ледового режима рек бассейна Северной Двины // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 6. С. 1–9.

Бузин В.А. Заторы льда и заторные наводнения на реках. СПб.: Гидрометеоздат, 2004. 203 с.

Бузин В.А. Факторы образования и прогноз заторов льда на реках Севера европейской территории России // Метеорология и гидрология. 2010. № 4. С. 63–74.

Бузин В.А., Горошкова Н.И., Стриженок А.В. Максимальные заторные уровни воды северных рек России в условиях изменения климата и антропогенного воздействия на процесс заторообразования // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 55–61.

Бузин В.А., Чачина Н.С., Шаночкин С.В. Прогнозы максимальных зазорных и заторных уровней воды рек Северная Двина и Даугава // Тр. ГГИ. 1986. Вып. 323. С. 19–27.

Васильев А.Н., Тархов Д.А. Нейросетевое моделирование. Принципы. Алгоритмы. Приложения. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009. 527 с.

Информация ФГБУ «Северное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». URL: <http://sevmeteo.ru/weather/rivers/> (дата обращения: 01.05.2015).

Карнович В.Н., Кулешиова Т.В. Долгосрочный прогноз максимальных уровней воды при заторах льда на Северной Двине // Метеорология и гидрология. 1984. № 4. С. 89–94.

Опасные ледовые явления на реках и водохранилищах России. М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2015. 348 с.

Отчет о прохождении половодья и паводков по зоне деятельности Двинско-Печорского БВУ в 2013 году. Архангельск, 2013. 98 с.

Отчет о прохождении половодья по зоне деятельности Двинско-Печорского БВУ в 2014 году. Архангельск, 2014. 94 с.

Отчет о прохождении половодья и паводков по зоне деятельности Двинско-Печорского БВУ в 2015 году. Архангельск, 2015. 101 с.

Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 3. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 168 с.

Русловые процессы и водные пути на реках бассейна Северной Двины. М.: ООО Журнал «РТ», 2012. 492 с.

Христофоров А.В. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. 131 с.

Agafonova S.A., Frolova N.L. Influence of ice regime of the northern rivers of European Russia on the hydroecological safety under the climate changes // The 20th IAHR Symposium on Ice: proceedings. Finland, Lahti, 2010.

Darrell M.D., White S.F., Daly K.D. Application of neural networks to predict ice jam occurrence // Cold Regions Sci. and Technology. 2002 Vol. 35, Iss. 2. P. 115–122.

Frolova N.L., Agafonova S.A., Krylenko I.N., Zavadsky A.S. An assessment of danger during spring floods and ice jams in the north of European Russia // Proc. IAHS. 2015. Vol. 92. P. 1–5. doi:10.5194/piahs-369-37-2015.

Поступила в редакцию 28.09.2015
Принята к публикации 25.01.2016