

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.535.5(470.1/25)

ОСОБЕННОСТИ ЛЕДОВОГО РЕЖИМА РЕК БАСЕЙНА СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ¹

© 2006 г. С. А. Агафонова, Н. Л. Фролова

Московский Государственный университет, 119992 Москва, Ленинские горы

Поступила в редакцию 16.02.2006 г.

Проанализированы изменения характеристик ледового режима рек бассейна Северной Двины за последние 125 лет. Для низовьев Северной Двины оценены возможные изменения дат появления плавучего льда и вскрытия реки в зависимости от ожидаемых изменений температуры воздуха и водности. Особое внимание уделено факторам, влияющим на образование заторов льда, их пространственной и временной изменчивости. Приведен пример прогностической зависимости максимального заторного уровня р. Сухоны у г. Великий Устюг.

Активное вовлечение в хозяйственную сферу ресурсов речных бассейнов сопровождается комплексом негативных последствий, обуславливающих опасное изменение экстремальных расходов воды, направленности и интенсивности русловых деформаций, качества воды, состояния водных экосистем, условий хозяйственной деятельности населения. Для рек бассейна Северной Двины кризисные экологические ситуации возникают в период разливов речных вод во время половодья и формирования заторов льда. Поэтому изучение различных фаз ледового режима рек (замерзание, ледостав и вскрытие), непосредственным образом влияющих на особенности весеннего половодья и образование заторов льда, является важной научной и практической задачей. Рассмотрение этих вопросов и является целью данной статьи.

Стационарные наблюдения за ледовыми явлениями на реках бассейна Северной Двины начались одновременно с изучением уровня режима. Наиболее ранние из них относятся к 1876–1885 гг. (на реках Северной Двине, Сухоне, Вычегде). Эти многолетние данные позволяют дать подробную оценку пространственной и временной изменчивости характеристик ледового режима.

ФАЗЫ ЛЕДОВОГО РЕЖИМА РЕК БАСЕЙНА СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ

Реки бассейна Северной Двины характеризуются устойчивым ледоставом. Исключения составляют отдельные участки порожистых и карстовых водотоков, а также некоторых рек, вытекающих из озер. Здесь ледостав неустойчив, а иногда и вовсе отсутствует [9].

Характеристики ледового режима рек определяются, в первую очередь, климатическими факторами, но также зависят от морфологических и гидравлических особенностей русла и потока. Так, для малых рек (Тиксны, Емы, Енанги) процесс замерзания происходит путем смерзания заберегов при незначительной толщине льда. Для средних рек (Вычегды) характерно образование заберегов и льдин, ледоход. Ледяной покров по длине реки формируется при образовании перемычек в местах снижения ледопропускной способности потока. Для больших и средних рек (Северной Двины), особенно в годы с повышенной водностью и неустойчивыми погодными условиями, замерзание сопровождается образованием шуги и движением ее вниз по течению. На участках с повышенными уклонами образуются зажоры. Выше мест их возникновения вода выходит на лед, образуя слуд или наледи. Однако такие подъемы уровня непродолжительны и на большинстве рек, за редким исключением, составляют 100 см. Например, средний зажорный подъем уровня воды у д. Медведки (р. Северная Двина) составляет 140, а у г. Сыктывкар (р. Вычегда) – 120 см.

Установление ледостава на больших реках отличается некоторыми особенностями. На Северной Двине он наступает сначала в низовьях (раньше, чем на других участках в среднем на 8–10 дней). Благодаря нарастанию континентальности климата по направлению к верховьям р. Вычегды, ее низовья замерзают позднее, чем верховья. Разница в сроках установления ледостава по длине р. Сухоны связана с различием в уклонах водной поверхности. Для ее участка в районе с. Усть-Пинеги более ранние сроки замерзания связаны с впадением холодных вод р. Пинеги, а для средней Сухоны сроки замерзания определяются наличием перекатов.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 06-05-64099).

Средняя продолжительность периода ледостава на реках бассейна Северной Двины колеблется от 144 до 185 дней. На порожистых участках р. Сухоны – 144–150 дней, на северо-востоке бассейна до 185 дней.

Весенние процессы вскрытия на реках начинаются с таяния снега на льду. Под напором прибывающей с водосбора талой воды в ледяном покрове появляются трещины и закраины; отдельные ледяные поля всплывают; начинаются подвижки льда, переходящие в ледоход; нередко заторы льда. Таким образом, процесс вскрытия определяется как тепловые, так и механические факторы.

На Северной Двине прежде всего вскрываются участки ниже впадения рек Сухоны, Юга (г. Великий Устюг) и Ваги (д. Березник). Вскрытие рек Сухоны и Вычегды происходит очень дружно – в среднем в течение трех дней. Для Северной Двины продолжительность этого периода составляет в разные годы от 8 до 25 дней. В исключительных случаях вскрытие реки может произойти в течение двух дней. Таким образом, процесс вскрытия Северной Двины определяется характером вскрытия притоков, т.е. энергией волны половодья.

Процесс вскрытия в устьевой области Северной Двины имеет ряд особенностей. Вскрытие и ледоход в рукавах дельты начинаются в их истоках, одновременно с вскрытием реки у г. Архангельска. Первым вскрывается судоходный рукав Маймакса, где лед взламывается ледоколами. Вскрытие рукавов нередко сопровождается заторами льда. Естественный процесс нарушается искусственным разрушением льда, сбросом теплых вод ТЭЦ и сточных вод промышленных предприятий, загрязнением поверхности льда. Благодаря влиянию города ледоход в районе г. Архангельска в последние годы начинается на несколько дней раньше прежних сроков [8].

Раньше других вскрываются озерные и карстовые реки. Например, р. Емца у с. Сельцо весной очищается ото льда, как правило, без ледохода (лед тает на месте) в среднем на 10–15 дней раньше, чем ближайшие некарстовые реки. На отдельных участках карстовые реки вообще не замерзают.

По характеру ледового режима бассейн Северной Двины можно разделить на три крупных района: восточный – бассейн р. Вычегды; южный – бассейн рек Сухоны и Юга; центральный – Северная Двина и ее притоки в среднем и нижнем течении.

Восточный район. Общее направление движения воды в бассейне р. Вычегды с северо-востока на юго-запад. Замерзание бассейна сопровождается образованием шуги, густыми шугоходами и зажорами (для большинства постов в 100% случаев). Благодаря субширотному течению р. Вычегды продолжительность осеннего ледохода по длине реки почти не изменяется. Вскрытие

происходит очень дружно – река вскрывается в среднем в течение трех дней. Заторы наблюдаются в районе крайне редко. Расположение района в восточной части бассейна определяет его континентальные климатические условия, что сказывается на продолжительности периода с ледовыми явлениями (до 220 дней).

Южный район. Бассейн р. Сухоны отличается широтное направление течения (с запада на восток). Ледовые явления начинаются 30 октября – 5 ноября. Особые условия формирования ледовых явлений характерны для р. Сухоны, вытекающей из Кубенского озера, а также для порожистых участков в ее среднем течении. Продолжительность осеннего ледохода (шугохода) на р. Сухоне увеличивается до 50–60 дней. Вскрытие происходит практически одновременно по всей длине реки (в среднем в течение трех дней). Продолжительность ледостава составляет 144–150 дней.

Центральный район. Для этой части бассейна характерно общее направление течения с юга на север. Ледовые явления начинаются 20–25 октября в северной части района и 26–30 октября – в остальной части. Устьевая область Северной Двины замерзает как со стороны взморья и мелководных рукавов дельты, так и со стороны реки. Основным действующим фактором процесса вскрытия является энергия волны половодья главной реки и притоков; вскрытие сопровождается заторами льда на поворотах и сужениях русла. На ледовый режим некоторых рек района (Емцы, Шелексы) оказывает влияние карст. Карстовые реки вскрываются на 10–15 дней раньше, а на некоторых участках не замерзают весь холодный период.

ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕДОВОГО РЕЖИМА

Для оценки изменения ледового режима рек бассейна Северной Двины за 1881–1988 гг. анализировались карты (рис. 1, 2) средних дат начала ледостава и вскрытия, рассчитанных для 1881–1937 гг. по [2] и 1938–1988 гг. – составленные авторами.

Замерзание рек бассейна Северной Двины начинается на севере и востоке 1–10 ноября, в центральной части бассейна – 10–15 ноября, 15–28 ноября замерзают реки южной части, в том числе среднее порожистое течение р. Сухоны. За 1881–1988 гг. ситуация в бассейне, за исключением бассейна р. Вычегды, изменилась мало. Для восточной же части бассейна следует отметить более ранние (на 2–3 дня по сравнению с нормой) сроки замерзания (рис. 2).

Вскрытие рек бассейна начинается на юго-западе. Сначала, в среднем 20 апреля, вскрываются порожистые участки р. Сухоны, реки бассейна

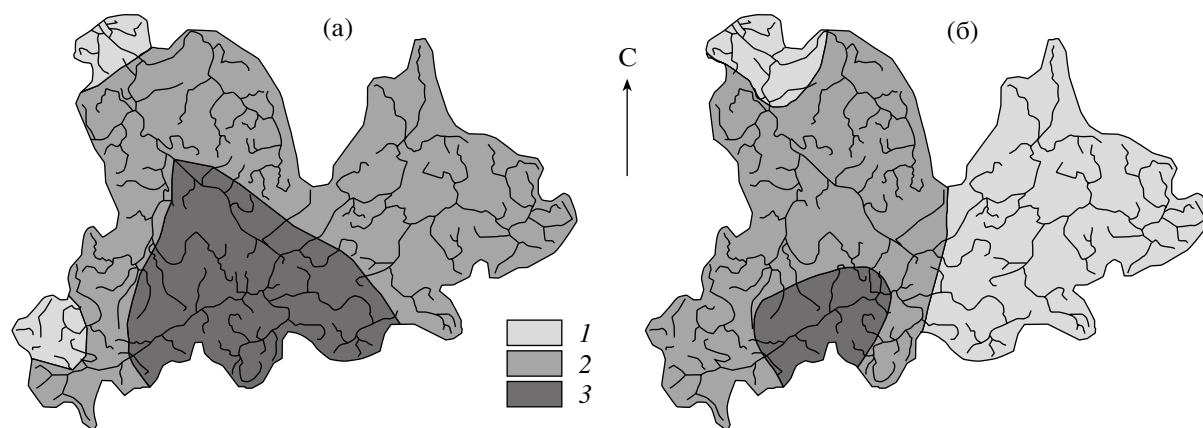


Рис. 1. Даты начала ледостава на реках бассейна р. Северная Двина за 1881–1938 по [2] (а) и 1938–1988 г.г. (б): 1 – до 10, 2 – с 10 до 15, 3 – после 15 ноября.

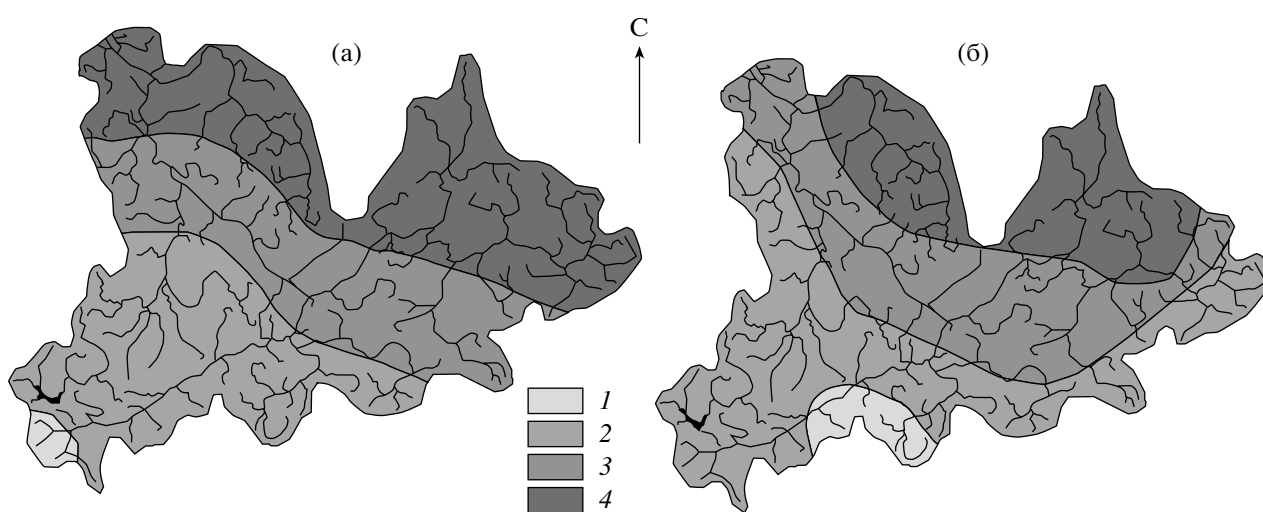


Рис. 2. Даты вскрытия рек бассейна р. Северная Двина за 1881–1938 по [2] (а) и 1938–1988 гг. (б): 1 – до 20.04, 2 – с 20 до 25, 3 – с 25 до 30, 4 – после 30 апреля.

Юг, Ваги, оставшаяся часть Сухоны вскрывается 20–25 апреля, Северная Двина и нижнее течение р. Вычегды – 25–30 апреля. Процесс вскрытия заканчивается на северо-востоке 30 апреля – 4 мая. За более чем столетний период (1881–1988 гг.) ситуация практически не изменилась (рис. 2).

Имеющиеся ряды наблюдений за характеристиками ледового режима продолжительностью >100 лет позволили более детально исследовать характер временной изменчивости ледовых явлений для рек бассейна Северной Двины.

В последние десятилетия XX в. резко возрос интерес к оценкам изменений климата и их возможных последствий. Как известно, за последнее столетие глобальная температура воздуха у поверхности Земли выросла на $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$. Для севера Европейской территории России рост среднегодовой температуры воздуха за этот период со-

ставлял 0.6°C (г. Архангельск), что в основном вызвано повышением температуры в холодный период ($1.0^\circ\text{C}/100$ лет) и в меньшей степени в переходные сезоны.

Глобальное потепление проявляется в целом ряде природных процессов, в том числе и в сроках образования и разрушения ледяного покрова на реках. Графики изменения аномалий дат появления льда и вскрытия для низовьев Северной Двины за последние 120 лет отражают общее смягчение ледового режима: линейный тренд сроков появления льда составил 4.6, а сроков вскрытия –1.2 сут за 100 лет. Анализ разностных интегральных кривых для этих величин и другие методы временного анализа позволили выделить периоды с преобладанием положительных и отрицательных аномалий. После периода с более ранними сроками появления льда (1882–1914 гг.) началось повы-

Таблица 1. Отклонение даты появления льда от среднего значения, сут, за 1961–1990 гг. в низовьях Северной Двины при изменении среднемесячной температуры воздуха Δt , °C за октябрь и стока воды ΔQ за период, предшествующий ледоставу

Δt , °C	ΔQ , %			
	–25	0	25	50
0.5	–1.5	0	1.5	3.0
1.0	0	1.5	3.0	4.5
1.5	1.0	3.0	4.5	6.0
2.0	1.5	4.5	6.0	7.5

Таблица 2. Отклонение даты вскрытия от среднего значения, сут, за 1961–1990 гг. в низовьях Северной Двины при изменении среднемесячной температуры воздуха Δt , °C, за апрель и стока воды ΔQ за период, предшествующий вскрытию

Δt , °C	ΔQ , %			
	–25	0	25	50
0.5	0.7	–0.3	–1.5	–2.5
1.0	0	–1.0	–2.0	–3.0
1.5	–0.5	–1.6	–2.5	–3.5
2.0	–1.0	–2.0	–3.0	–4.0

шение температуры воздуха в осенний, предшествующий ледоставу период, следствием которого стало более позднее появление льда на реках. Отклонение даты появления льда от нормы за 1961–1990 гг. составило 3 сут. Такая же интенсивность изменения сроков появления льда сохранилась и в последние 15 лет. Многолетняя изменчивость аномалий дат появления льда полностью повторяет ход температуры воздуха в осенний период, коэффициент корреляции между аномалиями дат появления льда и среднемесячной температурой воздуха за октябрь (г. Архангельск) равен 0.7. Другой фактор, влияющий на ледовый режим рек, – их водность в период, предшествующий ледоставу. Для Северной Двины коэффициент корреляции между аномалиями даты появления льда и расходом воды в этот период равен 0.46. Множественный коэффициент корреляции аномалии даты появления льда от двух упомянутых факторов равен 0.79. Отметим, что температура воздуха и водность реки в осенний период практически не связаны между собой – коэффициент парной корреляции между ними равен 0.12. В отличие от температуры воздуха водность Северной Двины в осенний период не имеет заметно выраженного тренда. Для процесса вскрытия низовьев реки характерна более сложная картина: в 1890–1900 и 1938–1972 гг. более низкие температуры воздуха

весной были причиной более позднего вскрытия, в то время как рост температуры воздуха весной в 1901–1922 и 1973–2004 гг. привел соответственно к более раннему вскрытию Северной Двины в ее нижнем течении. Также как и для случая появления льда, два фактора – температура воздуха в период вскрытия и водность реки являются определяющими для этой фазы ледового режима. Коэффициент корреляции между рядами аномалий дат вскрытия и среднемесячной температуры воздуха за апрель $r = -0.74$, аномалий дат вскрытия и стоком Северной Двины (г/с Усть-Пинега) $r = -0.77$, а множественный коэффициент корреляции $r = 0.82$. Оценки возможных изменений сроков появления льда и вскрытия Северной Двины ниже с. Абрамково были сделаны по уравнению множественной регрессии, связывающему аномалии дат ледовых явлений с температурой воздуха и водностью реки за соответствующий месяц. Результаты расчетов приведены в табл. 1, 2. Значимые изменения сроков появления льда произойдут, если среднемесячная температура воздуха возрастет в среднем на 1°C (среднегодовая ~2°C), а водность в осенний период увеличится ~25%. Для сроков вскрытия реки возможные изменения будут еще менее значительными: при тех же изменениях температуры воздуха и весеннего стока дата вскрытия сместится в сторону более ранних сроков всего на два дня. Таким образом, даже существенные климатические изменения в ближайшие 20–30 лет не должны привести к значительным изменениям сроков ледовых явлений в низовьях Северной Двины.

Интересно отметить, что для р. Сухоны у г. Великий Устюг величина линейного тренда для сроков начала ледостава составляет всего 1 сут за 100 лет, а для ее верховьев (г. Тотьма) тренд не выражен. Для сроков вскрытия ситуация обратная – величина изменений за 100 лет нарастает от низовьев к верховьям Северной Двины соответственно от 1.2 для низовьев до 3.5 для Сухоны у г. Великий Устюг и 4 сут для Сухоны у г. Тотьма. Таким образом, наибольшие изменения в сроках появления льда произошли в самой нижней части Северной Двины, в сроках вскрытия – в верхней и средней частях реки (р. Сухоны). В целях выяснения существования у исследуемых рядов монотонного (возрастающего или убывающего) тренда использован непараметрический критерий тренда Спирмена [11]. Критерий использует оценку r_s коэффициента корреляции между рангами членов ряда и номерами соответствующих лет. Согласно полученным данным, убывающий тренд имеет ряд многолетних колебаний сроков вскрытия р. Сухоны (г. Тотьма и г. Великий Устюг), а возрастающий – ряды многолетних колебаний сроков появления льда на р. Северной Двине ниже с. Абрамково. Если в целом для малых и средних рек бассейна Северной Двины измене-

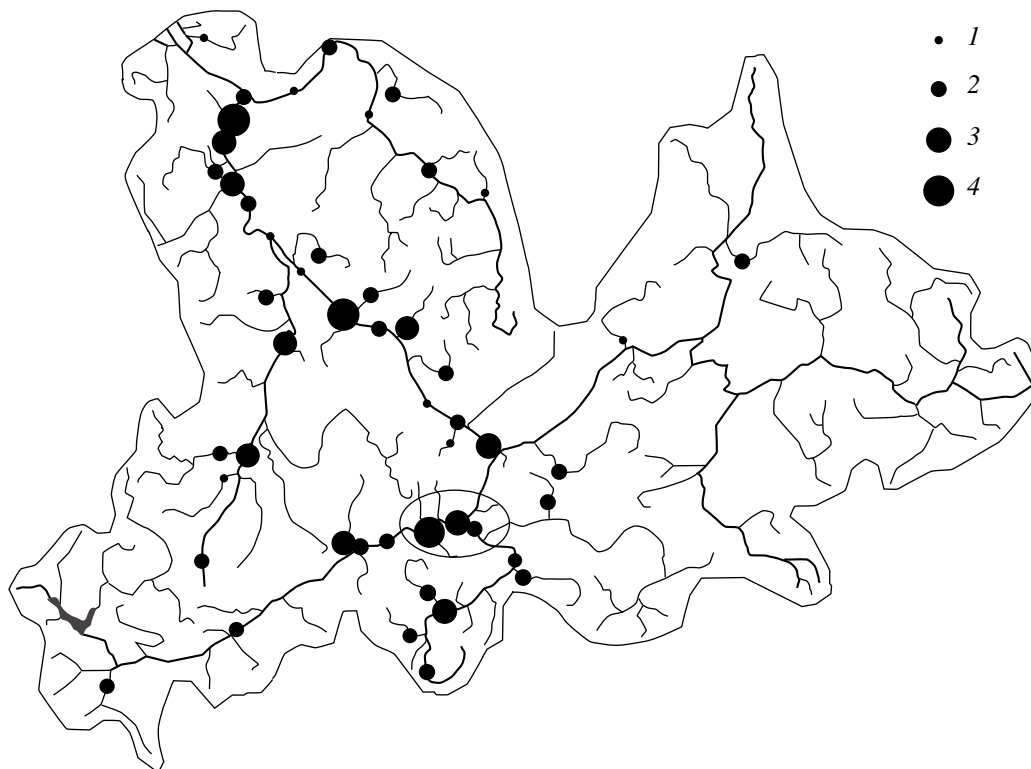


Рис. 3. Повторяемость заторов в бассейне р. Северная Двина, %: 1 – до 40, 2 – от 41 до 60, 3 – от 61 до 80, 4 – >80.

ния характеристик ледового режима незначительны, то для рек Сухоны и Северной Двины в целом можно отметить общую тенденцию смягчения ледового режима, которая выражается в соответствующем смещении сроков появления льда и вскрытия рек.

Надо отметить, что общая тенденция сдвига сроков появления льда и начала ледостава, а также сроков вскрытия характерна и для всего трехсотлетнего ряда наблюдений за этим явлениями на Северной Двине (г. Архангельск).

ФОРМИРОВАНИЕ ЗАТОРОВ ЛЬДА НА РЕКАХ БАССЕЙНА СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ

Важнейшей особенностью ледового режима рек бассейна Северной Двины является формирование заторов льда. Заторообразование характерно для начальной стадии вскрытия рек, когда лед еще не разрушен, в плавающем льде много крупных ледяных полей, провоцирующих создание ледяных плотин и энергии волны половодья недостаточно для их разрушения. Затопы нередко начинаются при подвижках льда. Их формирование часто вызвано несинхронностью волн половодья на основной реке и ее притоках (например, на р. Северной Двине у д. Березник). Места образования заторов могут меняться от года к году, но на больших реках они чаще стационарны.

Регулярны затопы на резких поворотах р. Северной Двине у д. Орленцы и Сухоны у д. Опоки, а также при разделении реки на многочисленные рукава в дельте Северной Двины.

Существует три группы признаков [12], определяющих образование затора

морфологические – характер участка реки, форма поперечного профиля долины и русловые образования, обуславливающие уменьшение пропускной способности русла;

гидрологические – интенсивность изменения уровня воды, форма гидрографа (половодье с одной или двумя волнами в период вскрытия реки, синфазность вскрытия, заторообразования и максимума расходов воды);

структурные – строение очага затора (общая структура заторного скопления льда), местоположение кромки ледяного покрова, ледяной перемычки, скопления ледяных полей, кромки ранее сформировавшегося заторного скопления, донного льда в зоне формирования.

В бассейне Северной Двины 114 заторных участков, на 60-ти проводятся либо проводились гидрологические наблюдения (рис. 3). Повторяемость заторов на отдельных участках достигает 86%. Заторные подъемы уровней воды колеблются от 80 (реки Верхняя Тойма, Яренга, Ежуга) до 100–150 см и более (реки Северная Двина, Сухона, Пинега и др).

На Северной Двине [9] заторы обычно формируются на участках вблизи г. Великий Устюг, г. Котлас, с. Двинский Березник, д. Орленцы, с. Холмогоры. Вблизи указанных двух городов заторообразованию способствуют резкое уменьшение уклона водной поверхности, наличие островов и крутых поворотов русла или коренного берега; у д. Орленцы – необычно крутой поворот реки и сужение русла; в районе с. Холмогоры – разделение реки на многочисленные мелководные рукава и наличие нескольких резких поворотов основного русла, где лед при подвижках упирается в коренной берег; в дельте реки – уменьшение уклонов водной поверхности и снижение энергии паводочной волны из-за дробления русла на ряд широких и мелководных протоков. Вскрытие Малой Северной Двины начинается в верховье; выносимый сверху лед наталкивается на неподвижный ледяной покров вблизи устья р. Вычегды и забивает суженное место реки (между о. Пустой и правым берегом) до дна, образуя затор, который распространяется вверх по течению на 10–12 км. Живое сечение забивается напессованным льдом на глубину 4–5 м. Высота торосов в отдельные годы достигает 6 м. Р. Вычегда всегда вскрывается позднее, поэтому не влияет на образование заторов на Малой Северной Двине [7]. Иного характера основная причина заторообразования у с. Двинский Березник. Заторы здесь обычно наблюдаются в годы, когда волна половодья р. Ваги значительно упреждает сухонскую (энергии важской волны недостаточно для вскрытия Северной Двины на значительном протяжении). Заторы также образуются в устье Северной Двины (у г. Архангельск). Благодаря ледокольным работам на сухоходном рук. Маймакса число заторов в дельте резко сократилось после 1915 г.

Вскрытие остальных рукавов дельты часто сопровождается мощными заторами, обычно возникающими в верхних частях водотоков [8].

На р. Сухоне 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. Сухоне перед ее слиянием с р. Юг. Последнее характерно для случаев, когда р. Юг, вскрываясь одновременно или несколько раньше Сухоны, создает сильный подпор на устьевом участке и препятствует поступлению сухонского льда в Северную Двину [1].

Заторы льда постоянно образуются на р. Юг в месте ее крутого поворота у с. Стрелка, в 12 км выше устья, на р. Вычегде у г. Сыктывкар, на р. Ваге у г. Шенкурск и на р. Пинега у с. Кузомень. Протя-

женность крупных заторов составляет несколько километров (на больших реках до 20 км). Продолжительность их существования – от нескольких часов до 3–5 дней. В местах разветвлений русла (устьевой участок Северной Двины) заторы обычно прорываются в обход скопления льда в основном русле, удерживающихся после этого еще 5–10 дней и более.

Процесс вскрытия на реках бассейна во многом определяется водностью и метеоусловиями. Можно отметить следующие закономерности распределения заторов в бассейне. В теплые (по сумме среднемесячных температур воздуха за зимний период – с ноября по март), многоводные (по максимальному расходу воды в нижнем течение Северной Двины у с. Усть-Пинега) и средневодные годы заторы образуются практически на всех заторных участках как в верховьях, так и в низовьях рек (1962, 1983 и 1955 гг.). В теплые маловодные годы заторы формируются в низовьях р. Сухоны и в верховьях р. Ваги. Задерживая процесс вскрытия, они способствуют беззаторному проходу льда по Северной Двине. В холодные годы заторы образуются равномерно, т.е. и в нижнем и в верхнем течении. Видимо этому благоприятствует большее количество льда на реках бассейна. В целом заторы в холодные годы образуются меньше, чем в теплые, когда вскрытие происходит довольно быстро (<10 дней) и заторы образуются по всей длине рек. В маловодные годы нередко заторы наблюдаются в бассейне р. Вычегды.

Основными факторами заторообразования являются [10]: тип зимы (суровая, мягкая) и тип весны (дружная, затяжная); задержка вскрытия рек, связанная с большой толщиной ледяного покрова; наличие преграды водному потоку, обусловленной морфологическими особенностями русла; интенсивность подъема половодья.

Наличие мощного затора на реке оценивается по следующим показателям [3]: двойной или осенний тройной ледоход и высокий уровень воды в период замерзания реки; большой объем льда, обусловленный высоким уровнем замерзания, при котором значительная площадь реки покрыта льдом, существенная зашугованность русла (50–80% площади поперечного сечения) и толщина ледяного покрова к началу вскрытия реки >0.7 м; отношение толщины ледяного покрова на ледосборном участке к толщине в месте заторообразования <0.5; большая прочность льда перед вскрытием (уменьшение ее с начала таяния льда лишь на 10–30%); большая весенняя водность (модуль стока 30–70 л/(с км²)) при холодной весне в районе заторного участка реки и интенсивное снеготаяние (5–7 мм/сут) в верхней части речного бассейна, сопровождающееся выпадением обильных дождей; интенсивное поступление льда после вскрытия с

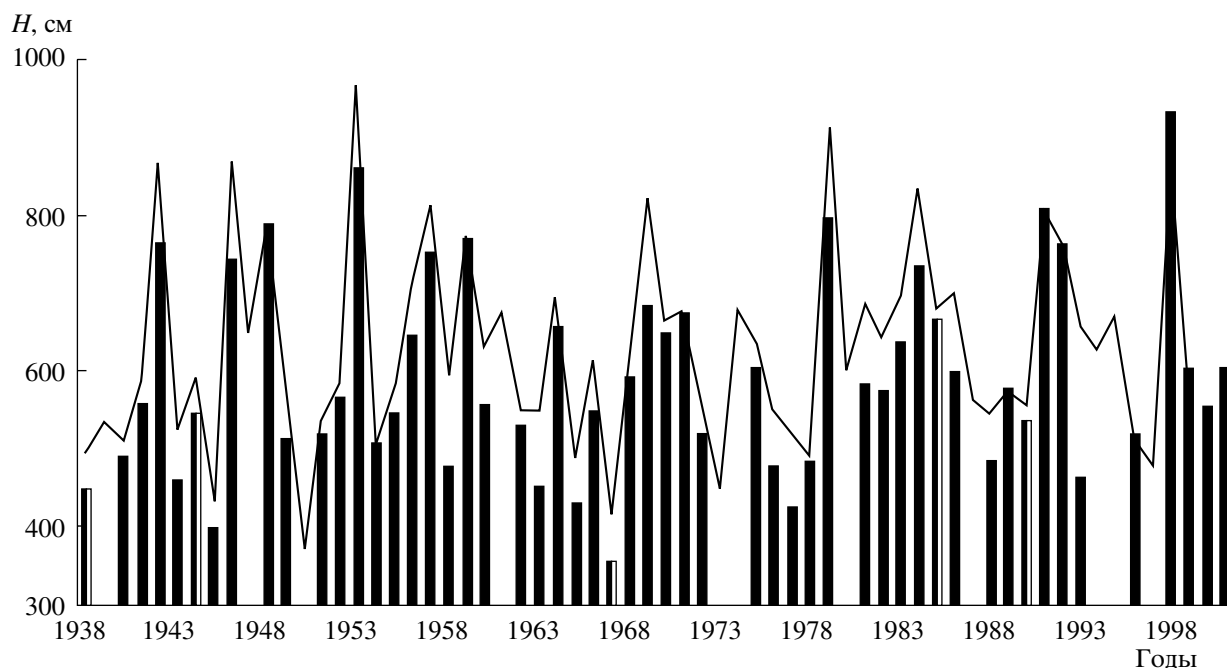


Рис. 4. Многолетние колебания максимальных весенних (ломаная линия) и заторных (черные столбики) уровней воды р. Сухона у г. Великий Устюг. Уровень H — уровень над нулем поста.

расположенного выше по течению участка реки, а также со вскрывающихся притоков.

Важную роль при образовании затора в конкретный год играют погодные условия в период вскрытия. Например, в районе г. Великий Устюг в годы с резким ростом температуры воздуха в период вскрытия (1974 г.) или значительными суммами жидких осадков (1961 г.), затор не образовывался. На временную изменчивость максимальных заторных уровней воды (рис. 4) оказывает влияние совокупность факторов, в том числе и проведение различных работ по подготовке реки к вскрытию. В 57% случаев максимальный уровень воды в районе г. Великий Устюг обусловлен заторами льда. Это самое высокое для бассейна Северной Двины значение, для остальных створов заторы определяют максимальный уровень воды весной в 12–50% случаев.

В бассейнах рек севера Европейской территории России заторы наблюдаются ежегодно, в больших или меньших масштабах. Благодаря определенному сочетанию факторов заторообразования для целого ряда лет (1962–1964; 1946, 1953, 1970 г. и др.) заторы наблюдались более, чем на трети заторных участков. В некоторых случаях (1962–1964 гг.) заторы были зафиксированы на 60–80% всех заторных участков. В среднем каждый год это явление наблюдалось на 25–30% створов.

При составлении прогноза максимальных заторных уровней воды $H_{\max}$ (или уровней весеннего ледохода $H_{\text{лhx}}$) [6] обычно используются предикто-

ры, характеризующие условия замерзания (предледоставный уровень воды $H_{\text{пр}}$), условия ледостава (максимальная толщина льда $h_{\text{л}}$) и условия вскрытия (авторами было выбрано нарастание расхода воды между первой подвижкой и предшествующим днем ΔQ). Рассмотрение этих факторов для всех заторных участков рек бассейна Северной Двины показало, что наилучшую связь максимальный заторный уровень имеет с уровнем воды в период установления ледостава (парные коэффициенты корреляции $r = 0.50–0.75$), коэффициенты корреляции с максимальной толщиной льда $r = 0.45–0.55$, наконец, коэффициенты корреляции максимального уровня с интенсивностью нарастания расходов воды $r = 0.45–0.60$. В будущем для анализа условий заторообразования в бассейне Северной Двины предполагается увеличить число используемых факторов. Учитывая, что мощные заторы льда — довольно частое явление на реках бассейна, была исследована пространственная изменчивость перечисленных выше факторов заторообразования. Все исходные ряды были пересчитаны в ряды аномалий, нормированные на среднее многолетнюю величину. Характер изменчивости уровней воды в осенний период и толщина льда определяются как общими климатическими изменениями, так и местными условиями. Для рек Сухоны, Юга и Северной Двины изменения уровней довольно синхронны: коэффициенты корреляции между рядами уровней в период установления ледостава $r = 0.6–0.7$. Отдельно можно выделить бассейн р. Пинеги, где для реки и ее притоков ха-

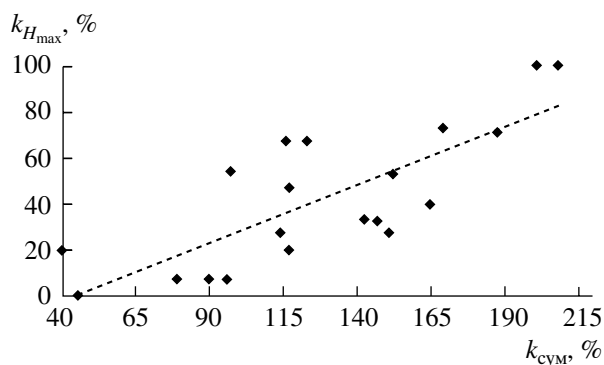


Рис. 5. Зависимость коэффициента экстремальности максимального заторного уровня от суммарного коэффициента экстремальности его предикторов $k_{H_{max}} = f(k_{сум})$ для заторных участков бассейна Северной Двины. Штриховая линия соответствует уравнению регрессии.

рактерны свои условия колебаний уровня воды. Аномалии толщины льда значительно меньше скоррелированы между собой. Коэффициенты парной корреляции для этой характеристики на реках бассейнов Сухоны и Юга в среднем равны 0.3–0.4, бассейна Пинеги – 0.4–0.6. Видимо, уровень воды в период установления ледостава является основным фактором, определяющим формирование максимальных заторных уровней на довольно большой территории, толщина льда и интенсивность нарастания расходов воды в период вскрытия в большей степени зависят от местных условий.

Для оценки степени опасности образования мощных заторов в бассейне Северной Двины в целом был использован коэффициент экстремальности k , численно равный процентному соотношению заторных участков с положительными значениями аномалий уровня, толщины льда и т.д. Подобный коэффициент был использован ранее климатологами [4] для оценки экстремальности и изменчивости климатических характеристик на больших территориях. Коэффициент экстремальности климатических характеристик – доля площади территории, для которой характерна определенная аномалия одной или нескольких характеристик. В данной работе подобным образом были рассчитаны k для предледоставного уровня воды, максимальной толщины льда, интенсивности нарастания расхода воды в период подвижки и максимального уровня весеннего ледохода $k_{H_{max}}$. Также был оценен общий $k_{сум}$ для трех выбранных предикторов максимального заторного уровня. Особый интерес представляют годы с высокими значениями величины k – 1946, 1947, 1953, 1957, 1961, 1969, 1979 гг. Для высокого значения $k_{H_{max}}$ необходимо сочетание очень больших значений k хо-

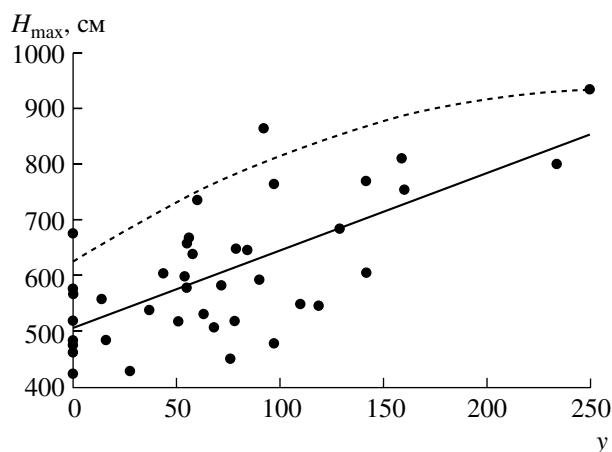


Рис. 6. Кривая для прогноза максимальных заторных уровней воды Н р. Сухоны у г. Великий Устюг в зависимости от $y = \sqrt{\Delta Q(H_{пр} - h_{л})}$ (пунктир – верхняя огибающая зависимости, сплошная линия соответствует уравнению регрессии).

тя бы для одного предиктора и просто больших – для остальных. На рис. 5 приведена зависимость $k_{H_{max}} = f(k_{сум})$, построенная для заторных участков рек бассейна Северной Двины. Как правило, при высоких значениях $k_{H_{max}}$ на многих реках формируются мощные заторы, когда подъемы уровней достигают опасных отметок.

Помимо общего заключения о степени опасности образования мощных заторов в бассейне Северной Двины для отдельных участков могут быть разработаны местные зависимости для прогноза максимальных заторных уровней. Это требует больших временных затрат на сбор информации и поиск подходящих предикторов. Так, при составлении прогнозной зависимости максимальных заторных уровней воды H_{max} для р. Сухоны у г. Великий Устюг после анализа более чем 20 возможных предикторов [5] был выбран показатель $y = \sqrt{\Delta Q(H_{пр} - h_{л})}$, где $H_{пр}$ – уровень воды р. Сухоны у г. Великий Устюг в день установления ледостава, см, $h_{л}$ – максимальная толщина льда за период ледостава на р. Сухоне у г. Великий Устюг, см, Q – интенсивность роста расхода воды р. Сухоны у г. Тотыма за период между первой подвижкой и предшествующим днем. Для г. Великий Устюг прогноз по верхней огибающей зависимости $H_{max} = f(\sqrt{\Delta Q(H_{пр} - h_{л})})$ дает завышение уровней воды на 100–200 см (рис.6). Прогнозы заторных уровней р. Сухоны по средней зависимости, составленные для периода половодья в 2002–2005 гг., дали хорошие результаты.

Для оценки качества зависимости было использовано отношение $s = \sqrt{V_k/\sigma}$ [11],

$$V_k = \frac{1}{n-k} \left(1 + \frac{k}{n-k-1} \right) \sum_{i=1}^n (H_{\Phi} - H_p)^2,$$

σ – среднее квадратическое отклонение исходного ряда максимальных заторных уровней, n – длина ряда, k – число параметров, H_{Φ} – фактические значения, H_p – рассчитанные значения максимального заторного уровня. Величина s для данного прогнозистического уравнения равна 0.76, поэтому полученную зависимость можно считать удовлетворительной.

Заторы приносят значительные ущербы, источниками которых служат не только непосредственное затопление территории, но и сокращение периода навигации, что особенно актуально для районов, где отсутствует железнодорожное сообщение; повреждение судов в заторах портов; унос древесины льдом. Причиненный ущерб зависит от трех основных факторов: повторяемости превышения критического уровня, плотности населения и генезиса чрезвычайных ситуаций, что определяет возможность прогноза и меры по ликвидации опасной ситуации. Особо опасны заторы и подпорные уровни в районе г. Котласа, г. Шенкурска, с. Палауза и других населенных пунктов, где заторы в большинстве случаев вызывают выход воды на пойму. Наиболее значительный ущерб приносит затопление городов Вологды, Великого Устюга, Сыктывкара и Архангельска.

Дальнейшие исследования особенностей ледового режима рек данной территории и совершенствование методов прогноза его характеристик сможет уменьшить возможные негативные воздействия ледового режима на хозяйственную деятельность человека.

ВЫВОДЫ

За истекшее столетие на большинстве рек бассейна Северной Двины не отмечено заметных изменений в датах наступления ледостава и вскрытия, за исключением самой Северной Двины и р. Сухоны. В низовьях Северной Двины отмечено статистически значимое смягчение ледового режима: сроки появления льда за 1880–2004 гг. стали более поздними (на 4–5 дней), а вскрытия более ранними (на два дня). В верховьях бассейна Сухоны, наоборот: смягчение ледового режима проявилось в существенно более раннем вскрытии (на 4 дня). Расчеты показали, что в ближайшие десятилетия существенные изменения сроков появления льда произойдут, если среднемесячная температура воздуха вырастет в среднем на 1°C, а среднегодовая – на 2°C, а водность реки в осенний период увеличится ~25%. Для сроков вскрытия реки возможные изменения будут еще более незначительными: при тех же величинах изменения темпера-

туры воздуха и весеннего стока дата вскрытия сместится в сторону более ранних сроков всего на два дня. Таким образом, даже существенные климатические изменения в ближайшие 20–30 лет не приведут к значительным изменениям сроков ледовых явлений в низовьях Северной Двины.

Важнейшей особенностью ледового режима рек бассейна Северной Двины является формирование заторов льда. Для оценки заторной опасности в бассейне предложено совместное рассмотрение аномалий основных предикторов – уровня воды в период установления ледостава, максимальной толщины льда и интенсивности нарастания расходов воды в период подвижки льда. На примере г. Великий Устюг показана возможность построения локальных прогнозных зависимостей для оценки максимального заторного уровня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алабян А. М., Алексеевский Н. И., Евсеева Л. С. и др. Генетический анализ причин весеннего затопления долины Малой Северной Двины в районе г. Великий Устюг // Эрозия почв и русловые процессы. 2003. Вып. 14. С. 104–130.
2. Брегман Г. Р. Атлас вскрытия и замерзания рек Европейской территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1947. 253 с.
3. Бузин В. А. Заторы льда и заторные наводнения на реках. СПб.: Гидрометеиздат, 2004. 203 с.
4. Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 50–66.
5. Каинова С. А., Фролова Н. Л. Формирование максимальных заторных уровней воды р. Сухоны у г. Великий Устюг и возможности их долгосрочного и краткосрочного прогнозирования // Безопасность гидротехнических сооружений. 2003. Вып. 11. С. 265–275.
6. Карнович В. Н., Кулешова Т. В. Прогноз максимальных уровней воды при заторах льда на Северной Двине // Метеорология и гидрология, 1984. № 4. С. 89–94.
7. Коновалов И. М., Баланин В. В., Щербакова Р. И. Заторы льда на рр. Сухоне и Северной Двине, мероприятия по предупреждению и борьба с ними // Тр. ЛИВТа, 1962. Вып. XXX.
8. Михайлов В. Н. Устья рек России и сопредельных стран: Прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
9. Ресурсы поверхностных вод СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1972. Т. 3. 663 с.
10. Руководство по гидрологическим прогнозам. Л.: Гидрометеиздат, 1989. Вып. 3. 168 с.
11. Христофоров А. В. Теория случайных процессов в гидрологии. М.: Изд-во МГУ, 1994. 141 с.
12. Чижов А. Н. О механизме формирования заторов льда и их типизация // Тр. ГТИ. 1975. Вып. 227. С. 3–17.