

ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ РЕК СЕВЕРА ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ THE ICE REGIME OF THE NORTH OF THE EUROPEAN PART OF RUSSIA

Агафонова С.А., Фролова Н.Л. (Agafonova S.A., Frolova N.L.)

В данной работе проанализирована пространственно-временная изменчивость характеристик ледового режима рек, впадающих в Белое и Баренцево море, в том числе характеристик опасных ледовых явлений и процессов за период с 1936 по 2013 гг. Построены новые карты, показано, что происходящие изменения являются результатом сложного взаимодействия метеорологических и гидрологических условий.

Abstract

Time and space variability of characteristics of the ice regime of the rivers discharging into the White and Barents Sea from 1936 to 2013 are analyzed, including characteristics of hazardous ice phenomena and underlying processes. New maps

are compiled, and it is shown that the observed changes result from the complex interaction of meteorological and hydrological conditions.

Введение

Для большей части территории России ледовые явления в той или иной форме наблюдаются ежегодно, и их продолжительность составляет пять и более месяцев. Со сроками и продолжительностью ледовых явлений связаны многие виды хозяйственной деятельности – условия навигации, нормальное функционирование водозаборов, ледовых переправ, дорог и т.д. Часто речь идет не об исключительном действии ледовых явлений, а о неблагоприятном сочетании опасных проявлений водного, ледового режима и русловых процессов [Опасные..., 2015]. Из-за недостаточной изученности, а том числе гидрологической, для обеспечения устойчивости человеческой деятельности в арктическом регионе необходимы детальные исследования, в том числе и ледового режима рек.

Исследуемые реки относятся к бассейну Белого и Баренцева моря. В административном отношении – республика Карелия, Мурманская и Архангельская области (рис. 1). Территория расположена в пределах субарктического климатического пояса, значительная часть Кольского полуострова и побережье Белого моря относятся к умеренному поясу. Климат территории характеризуется суровой продолжительной зимой и коротким прохладным летом [Геоэкологическое ..., 2007].

В данной работе проанализирована пространственно-временная изменчивость характеристик ледового режима рек, в том числе характеристик опасных ледовых явлений и процессов за период с 1936 по 2013 гг. Были использованы данные по 74 гидрологическим постам (гп) на 65 реках (рис. 1), среди них 20 рек с площадью водосбора менее 1000 км² и 4 реки (рр. Онега, Северная Двина, Мезень и Печора) с площадью водосбора более 50 000 км². Среди характеристик ледового режима проанализированы сроки ледовых явлений, их продолжительность, а также характеристики уровня режима в период с ледовыми явлениями (табл. 1).

Характер ледового режима зависит от большого числа факторов, среди которых климатические условия, водность рек, величина грунтового питания, скорость течения и т.д. Для исследуемой территории особенности ледового режима отдельных участков рек связаны с наличием карста (бассейны рр. Кулой, Кепино и др.), истоком

36

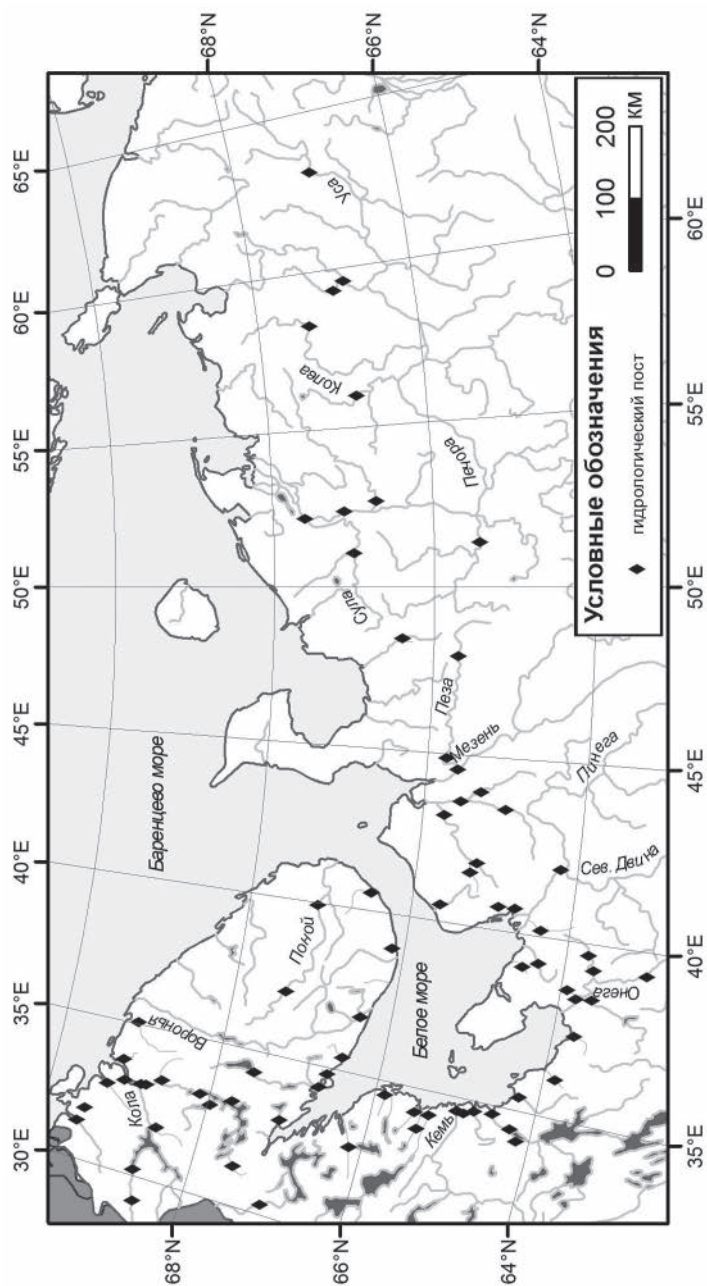


Рис. 1. Гидрологическая изученность Арктической зоны Европейской территории России

Таблица 1. Характеристики ледового режима рек

Фаза ледового режима	Характеристика	Краткое обозначение
Замерзание	Дата появления льда	$D_{\text{лд}}$
	Уровень на день появления льда	$H_{\text{лд}}, \text{см}$
	Продолжительность осеннего ледохода и шугохода	$T_{\text{штх}}, \text{сут}$
	Продолжительность замерзания	$T_{\text{зам}}, \text{сут}$
Ледостав	Дата установления ледостава	$D_{\text{лд}}$
	Уровень в день установления ледостава	$H_{\text{лд}}, \text{см}$
	Толщина льда максимальная	$\max h_{\text{л}}$
	Дата окончания ледостава	$D_{\text{конлд}}$
	Продолжительность ледостава	$T_{\text{лд}}, \text{сут}$
Вскрытие	Дата начала весеннего ледохода	$D_{\text{вскр}}$
	Максимальный уровень воды за период ледохода	$H_{\text{лдж}}, \text{см}$
	Продолжительность ледохода	$T_{\text{лдж}}, \text{сут}$
	Дата начала затора льда	$D_{\text{зтр}}$
	Максимальный уровень воды в период затора льда	$H_{\text{зтр}}, \text{см}$
	Заторный подъем уровня воды	$dH_{\text{зтр}}, \text{см}$
	Продолжительность затора льда	$T_{\text{зтр}}, \text{сут}$
	Продолжительность очищения ото льда	$T_{\text{оч}}, \text{сут}$
	Дата очищения ото льда	$D_{\text{оч}}$
	Продолжительность периода с ледовыми явлениями	$T_{\text{ля}}, \text{сут}$

из крупных озер (большинство рек Карелии), наличием перекатных участков (реки Кольского полуострова), для крупных рек – с основным направлением течения. Важной особенностью исследуемой территории является зарегулированность большинства средних рек Карелии и Кольского плотинами ГЭС. В результате, естественный режим, в том числе ледовый в пределах отдельных участков нарушен.

Для описания ледового режима рек исследуемой территории потребовалось восстановление коротких рядов данных, которое проводилось методом гидрологической аналогии с использованием

информации по створам, расположенным на реках со схожими физико-географическими условиями и характеристиками водосборов. Приведение к многолетнему ряду проводилось для 20 постов, прежде всего, для сроков ледовых явлений (появления льда, установления ледостава, окончания ледостава, вскрытия и очищения ото льда).

Для оценки временной изменчивости и современных изменений характеристик ледового режима был проведен анализ разностных интегральных кривых сроков и продолжительности ледовых явлений и особенности их многолетних колебаний. По этим данным выявлены точки перегиба на разностных интегральных кривых, делящих ряд на две части. Для большинства створов точкой перегиба является 1990 г. С учетом проведенного анализа и рекомендаций ВМО [ВМО–№ 100, 2014] для оценки наблюдаемых изменений сроков и продолжительности ледовых явлений сравнивались 2 периода: основной (1961–1990 гг.) и современный (1991–2013 гг.). Средние значения сроков и продолжительности ледовых явлений приведены в тексте за основной период, если не указано иначе.

Замерзание. Процесс ледообразования начинается с момента охлаждения поверхности воды до 0°C. Первые ледовые образования на средних реках – забереги и сало, на равнинных малых реках у берегов и в зонах с малыми скоростями течения – тонкий прозрачный лед. На больших реках забереги образуются главным образом из-за льда, принесенного течением во время ледохода. При охлаждении воды до 0°C на дне реки появляется донный лед – ноздреватая непрозрачная масса, состоящая из беспорядочно разросшихся кристаллов льда. Достаточно разросшиеся скопления донного льда всплывают. Всплывший донный лед и смерзшееся сало образуют шугу. С течением времени ледяные кристаллики сбиваются в комки, плывут, смерзаясь, и уплотняются. Бесформенные комья шуги смерзаются вместе, образуя льдины, шугоход сменяется ледоходом. В начале периода ледоход проходит спокойно, но по мере охлаждения воды и увеличения размеров льдин и заберегов интенсивность его резко возрастает. На реках с малыми скоростями течения в осенний период ледяной покров образуется путем роста и смыкания заберегов [Донченко, 1987].

Лед на реках исследуемой территории появляется в среднем в октябре – первых числах ноября: для рр. Уса, Адзьва, Колва – в первой декаде октября, для низовьев р. Печора и р. Мезень, а также для рр. Пеза

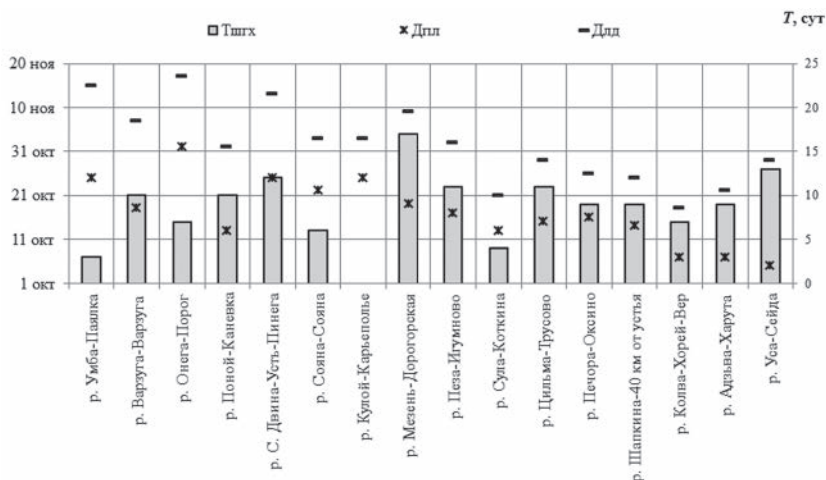


Рис. 2. Средние сроки появления льда ($D_{пл}$), установления ледостава ($D_{лд}$) и продолжительность осеннего ледохода и шугохода ($T_{шгх}$) для створов, с площадью водосбора более 5000 км²

и Пеша и рек Кольского полуострова – в середине октября, для рек бассейна Белого моря (р. Онега, Сума, Нючча и др.) – в первых числах ноября (рис. 2). Средняя продолжительность периода замерзания от 10 для плесовых участков на средних реках до 30–40 сут. для порожистых участков рек Кольского полуострова и озерных рек Карелии. Замерзание на средних и больших реках сопровождается шугоходом и ледоходом, на реках Карелии и Кольского полуострова – образованием зажоров. Средняя продолжительность осеннего ледохода и шугохода для большинства средних рек составляет около 10 сут.

Продолжительность осеннего ледохода и шугохода изменяется год от года. Наибольшая его продолжительность характерна в годы с затянувшимся периодом замерзания для больших рек (52 дня, р. Онега – Порог, осень 2006 г.; 42 дня, р. Северная Двина – Усть-Пинега, осень 1977 г.), а также порожистых участков средних рек и рек, вытекающих из озер (45 дней, р. Варзуга – Варзуга, осень 2011 г.; 48 дней, р. Поной – Каневка, осень 1949 г.). Длительные периоды с ледоходом также характерны для участков, режим уровней которых определяется работой гидротехнических сооружений (например, р. Нижний Выг – г. Беломорск 70 дней и более осенью 1964, 1968, 1976 и 2006 гг.; р. Кемь – г. Кемь 100 и более дней осенью 1992, 2004 и 2007 гг.).

В годы с неустойчивым температурным режимом в период замерзания осенний ледоход, особенно на средних и малых реках, отличается прерывистым характером. На больших реках в такие годы потепление обычно сказывается в уменьшении густоты ледохода или шугохода.

Сроки появления льда определяются сроками устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха к отрицательным значениям. При этом сроки появления льда и установления ледостава смещаются в сторону более поздних в годы с высокой водностью, когда ледообразование сопровождается паводками [Агафонова, Фролова, 2006]. Изменение средних сроков осенних ледовых явлений для современного периода (1991–2013 гг.) по отношению к периоду 1961–1990 гг. для большинства рек исследуемой территории составляет 5–10 сут, для рек Карелии 0–5 сут.

Ледостав

Для большинства рек исследуемой территории характерен устойчивый ледостав, исключения составляют порожистые участки и истоки из крупных озер. Здесь ледостав кратковременный или не наблюдается вовсе (р. Монча – гп Мончегорск, р. Малая Белая – гп Хибини и др.). Ледостав также не наблюдается на участках сброса промышленных сточных вод, ниже плотин ГЭС. Например, для створа р. Кодина – гп Кодино устойчивый ледостав не наблюдался до 1992 г., когда завод, расположенный в 1,0 км выше поста прекратил функционировать.

На р. Печора и притоках ледостав устанавливается в среднем в конце октября, на реках Кольского полуострова – в первой декаде ноября, на реках Карелии – во второй декаде ноября. Средняя продолжительность ледостава колеблется в широких пределах и составляет от 150 до 220 сут (рис. 3). В зимний период на реках исследуемой территории организуются ледовые переправы пешие и автомобильные разной грузоподъемностью.

Процесс нарастания толщины льда происходит под воздействием характера ледообразования в начальный момент формирования ледяного покрова; погодных условий осенне-зимнего периода; температуры поверхности льда; гидродинамических условий взаимодействия льда с воздушными и водными потоками и т. д. [Одрова, 1979]. В зимний период для малых тундровых рек из-за промерзания

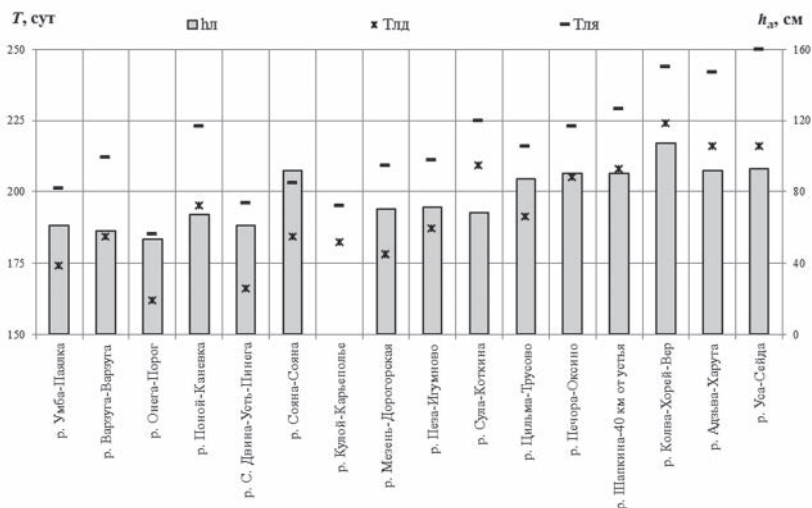


Рис. 3. Средняя продолжительность ледостава ($T_{\text{л}}$), периода с ледовыми явлениями ($T_{\text{ля}}$) и толщины льда к концу зимнего периода ($h_{\text{л}}$, см) для створов, с площадью водосбора более 5000 км²

на мелководных перекатах характерно образование наледей, за счет которых происходит резкое увеличение толщины ледяного покрова на 1,0–1,5 м. В особо суровые зимы промерзают перекаты на реках с площадью водосбора до 3000–5000 км². Другая крайность для малых рек тундры наблюдается, если русло рек заносится снегом. Под такой «шубой» лед может не образовываться вовсе [Ресурсы..., 1972].

В начале зимы наблюдается быстрый рост толщины льда (0,8–1,2 см/сут), и уже в конце ноября на большинстве рек она может достигать 20–30 см и более. Максимальной мощности ледяной покров достигает обычно к концу зимнего периода (в марте–апреле). Для средних рек, где локальные особенности участка оказывают не такое большое влияние, существуют некоторые закономерности распределения толщины льда к концу зимнего периода по территории (рис. 4): средние значения увеличиваются с запада на восток.

Вскрытие

С началом весенних процессов при устойчивом переходе температур воздуха через 0°C увеличивается приток воды в русло реки с поверхности водосбора. Вследствие таяния снега на льду появляет-

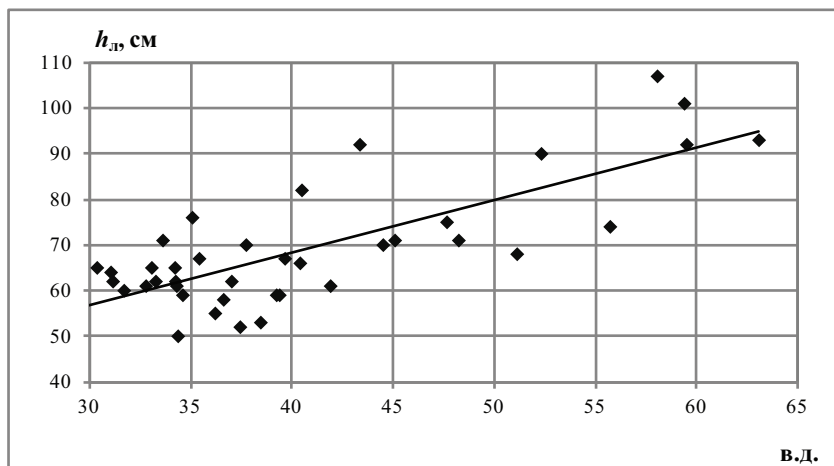


Рис. 4. Зависимость средней толщины льда к концу зимнего периода от долготы гидрологического поста

ся вода (в основном у берегов). Постепенно снег на льду пропитывается талой водой. Наиболее интенсивно таяние льда происходит вдоль более прогретых берегов. Подъем уровней воды в реке вызывает вспучивание льда, в нем появляются трещины. Вдоль берегов образуются закраины, по которым течет вода, размывая ледяной покров. Постепенно закраины расширяются и углубляются. Ледяной покров начинает отрываться от берегов. На льду появляются скопления воды, проталины. Отдельные ледяные поля начинают всплывать. Процесс разрушения ледяного покрова более активен на перекатах, где лед тоньше, чем на плесах. Это является причиной смещения ледяных полей с плесов вниз по течению, подвижек льда. Они обычно наблюдаются незадолго до начала ледохода при подъеме уровней воды. Уменьшение толщины льда из-за стаивания к началу подвижек обычно не превышает 10–20 см. При подвижках происходит раскалывание сплошного ледяного покрова, торошение льда, подныривание льдин под сохранившийся ледяной покров. Дальнейшее увеличение расходов воды, уменьшение прочности ледяного покрова под влиянием теплого воздуха, солнечной радиации или выпадения дождей приводит к нарастающим деформациям льда. Разрушенный ледяной покров приходит в движение. Динамический тип вскрытия рек, при котором разрушение ледяного покрова происходит преиму-

шественно под воздействием достаточно большой интенсивности и скорости движения волны половодья, наиболее ярко проявляется для больших рек, текущих с юга на север [Донченко, 1987].

Средние сроки окончания ледостава имеют четкое пространственное распределение по территории: в последней декаде апреля заканчивается период ледостава на рр. Онега, Северная Двина, в бассейне р. Кулой и на реках Карелии; в первой декаде мая – на рр. Мудьюга, Мезень, Пе́за Пе́ша и на большинстве рек Кольского полуострова; во второй декаде мая – на реках Большеземельской тундры. На малых и карстовых реках весеннего ледохода не наблюдается, лед тает на месте. Для средних и больших рек весенний ледоход наблюдается ежегодно, средняя его продолжительность составляет до 10 сут и не зависит от площади водосбора (рис. 5).

Средние сроки очищения ото льда для рек южного побережья Белого моря наблюдаются в начале мая, для рек Кольского полуострова – в середине, а для рек бассейна р. Печора – в конце мая.

Изменение сроков вскрытия рек в последние годы обусловлено как смещением сроков устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 0°C в сторону положительных значений, так и изменениями водного режима в период весеннего половодья. Низкие расходы воды в период вскрытия могут приводить к задержке сроков начала весеннего ледохода.

Изменение средних сроков весенних ледовых явлений для современного периода (1991–2013 гг.) по отношению к периоду 1961–1990 гг. для большинства рек исследуемой территории составляет 5–8 сут.

К важным характеристикам потенциальной опасности ледового режима относятся повторяемость выхода воды на пойму в период весеннего ледохода и повторяемость заторов льда [Агафонова, Фролова, 2009]. Весенний ледоход для всех рек исследуемой территории, за исключением карстовых проходит при высоких уровнях воды и нередко сопровождается выходом воды на пойму (рис. 6, см. вклейку, 7). Благодаря суровой зиме и большому количеству льда в бассейнах рек в весенний период на отдельных участках образуются заторы льда. Заторообразование характерно для начальной стадии вскрытия, когда энергия волны половодья еще невелика, лед не мятый, среди плавающего льда много крупных льдин, являющихся «лидера-

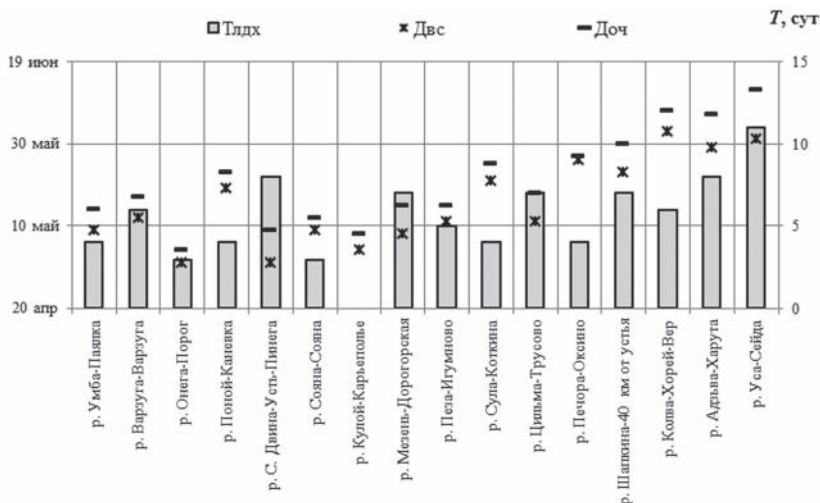


Рис. 5. Средние сроки вскрытия ($D_{вс}$), очищения ($D_{оч}$) и продолжительность весеннего ледохода ($T_{лhx}$) для створов, с площадью водосбора более 5000 км²

ми» заторообразования. Заторы образуются на участках с недостаточной ледопропускной способностью русла (участки крутых поворотов, разветвлений, резких изменений уклонов водной поверхности).

Скопления льдин в русле при заторах вызывают подъем уровней воды и наводнения. Нередко заторные уровни воды превышают максимальные уровни половодья. Заторные наводнения особо опасны тем, что происходят в холодное время года и сопровождаются выходом на берег льда, который разрушает расположенные в пределах зоны затопления сооружения. Хотя заторные наводнения и кратковременны (до 10 сут.), причиняемый ими ущерб, как правило, намного превышает ущерб от наводнений в период свободной ото льда реки [Бузин, 2004; Frolova, Agafonova et al., 2015].

Заторы не всегда ведут к бедствию. Задерживая лед и давая тем самым возможность рассредоточиться ледовым массам ниже по течению, они в какой-то мере нормализуют ледоход. На средних и больших реках при большом количестве ледового материала в русловой сети после суровой зимы заторы образуются в верховьях рек и, при благоприятных погодных условиях, задерживают процесс вскрытия,

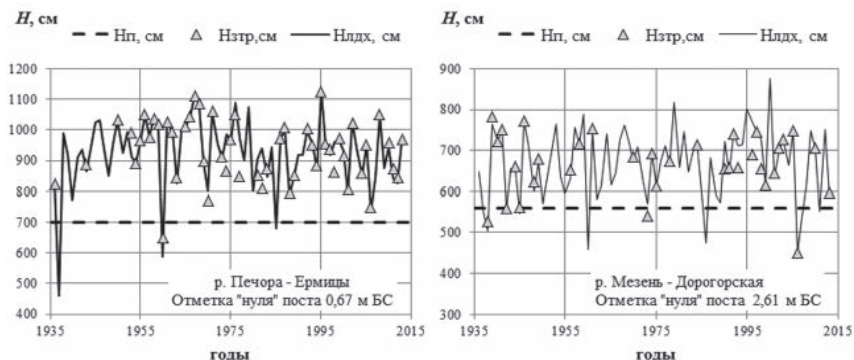


Рис. 7. Максимальные уровни воды в период весеннего ледохода ($H_{лhx}$) и в период заторов льда ($H_{зтр}$)

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.

Для рек Кольского полуострова и Карелии подъем уровня воды при образовании заторов ($dH_{зтр}$, см) в большинстве случаев не превышает 1,0 м (табл.2). Исключение составляет створ р. Варзуга – гп Варзуга, здесь заторные подъемы уровня воды достигают 3 м и более (например, в 1999 и 2013 гг.). Высокие заторные уровни воды на этом участке вызывают подтопление с. Варзуга. Крупные заторы ($dH_{зтр} > 3$ м) наблюдаются также в низовьях рр. Северная Двина, Мезень и Печора (табл. 2).

Литература

- Агафонова С.А., Фролова Н.Л. Влияние ледового режима рек севера Европейской территории России на гидроэкологическую безопасность в условиях изменения климата // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2009. № 4. С.55–61.
- 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.: Гидрометеиздат, 2004. 203 с.

Таблица 2. Заторы льда на реках Арктической зоны Европейской территории России

Река – пост	$P_{зтр}, \%$	Места образования заторов льда	Максимальные заторные подъемы уровня воды, м
р. Ура – гп Ура-Губа	76	поворот русла ниже поста	2,0 (1956 г.)
р. Варзуга – гп Варзуга	50	остров выше поста	3,0 (2013 г.)
р. Шуя – гп Шуерецкое	21	порог ниже поста	1,0 (1979 г.)
р. Онега – гп Турчасово	41	ниже поста	2,0 (1946 г.)
р. Северная Двина – гп Усть-Пинега	53	Холмогорское разветвление ниже поста	5,5 (1955 г.)
р. Мезень – гп Дорогорская	42	острова ниже поста	3,0 (1939 г.)
р. Пеза – гп Сафоново	33	крутой поворот русла	2,0 (1939 г.)
р. Пеза – гп Игумново	45	выше и ниже поста	2,5 (1940 г.)
р. Печора – гп Ермицы	70	в створе и выше поста	3,5 (1981 г.)
р. Сула – гп Коткина	30	выше поста	2,5 (1953 г.)

- ВМО – №100. Руководство по климатологической практике. – 2014 – 147 с.
- Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования / Под ред. Н.И. Алексеевского – М.: ГЕОС, 2007. 585 с.
- Донченко Р. В. Ледовый режим рек СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. 246 с.
- Одрова Т. В. Гидрофизика водоемов суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. 312 с.
- Опасные ледовые явления на реках и водохранилищах России / Козлов Д.В., Бузин В.А., Фролова Н.Л., Агафонова С.А. и др. – М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2015. 348 с.
- 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. 92. 2015. Pp. 1-5. DOI:10.5194/piahs-369-37-2015.

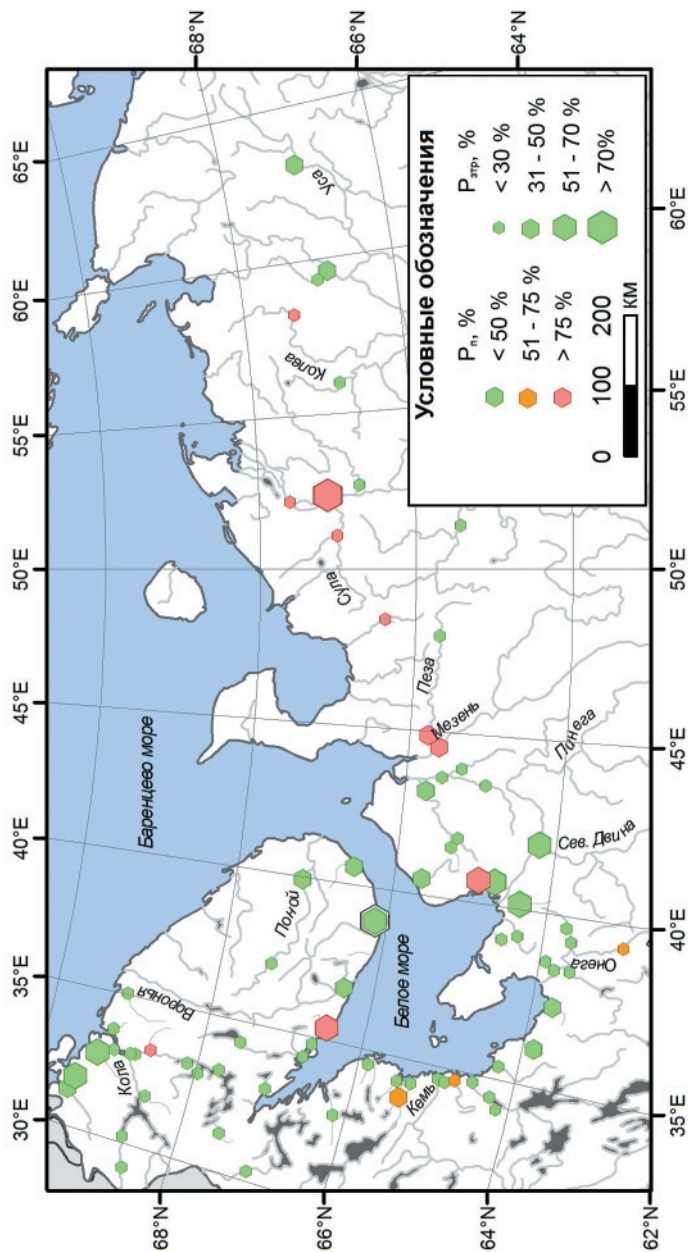


Рис. 6. Повторяемость выхода воды на пойму в период весеннего ледохода ($P_{ит}, \%$) и повторяемости затворов льда ($P_{зр}, \%$)