

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГИДРОСФЕРЕ:  
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ  
HAZARDOUS PROCESSES IN THE HYDROSPHERE:  
FUNDAMENTAL AND ENGINEERING ASPECTS

УДК 556.546

DOI: 10.34753/HS.2020.2.4.330

РОЛЬ ЛЕДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ В  
ДИНАМИКЕ ПОТОКОВ НА  
ПРИДЕЛЬТОВОМ УЧАСТКЕ  
СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ

С.В. Лебедева<sup>1,2</sup>, Л.С. Одоев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУ «Северное управление по  
гидрометеорологии и мониторингу окружающей  
среды», г. Архангельск, Россия;

<sup>2</sup>ФГБУ «Государственный океанографический  
институт им. Н.Н. Зубова», г. Москва, Россия  
hydrosima@gmail.com

ICE IMPACT ON THE FLOW  
DYNAMICS THE NORTHERN  
DVINA RIVER MOUTH AREA

Serafima V. Lebedeva<sup>1,2</sup>, Leonid S. Odoyev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Northern Agency for Hydrometeorology and  
Environmental Monitoring, Arkhangelsk, Russia;

<sup>2</sup>Federal State Budgetary Institution "N.N. Zubov  
State Oceanographic Institute", Moscow, Russia

hydrosima@gmail.com

**Аннотация.** Ледовые явления и их влияние на динамику потока на придельтовом участке реки Северная Двина рассмотрены на примере зимнего периода 2019-2020 годов. Мониторинг, расчеты и прогнозы гидрологических условий во время прохождения ледохода – актуальнейшие задачи для устьевой области реки Северная Двина. Гидрологический режим приливного многорукавного устья очень сложен, а заторные явления – одни из самых трудных для количественного описания гидрологических явлений. Используемые статистические методики краткосрочных прогнозов не обновляются много лет. В данной работе проводится попытка реализации интегрированного подхода к изучению заторов, включающего натурные ледовые обследования, анализ космических снимков, материалы наблюдений на сети гидрологических постов и гидродинамическое моделирование. Для двумерного численного моделирования используется программный комплекс STREAM\_2D CUDA, включающий блок для учета воздействия ледяного покрова.

Очевидно, что ледовые явления вносят значительные изменения в уровень и скоростной режим реки на устьевом участке реки

**Abstract.** The authors consider case of the winter period 2019-2020 as example of ice cover and ice jam influence on the flow dynamics in the section upstream the delta of the Northern Dvina River mouth area.

Hydrological monitoring, calculations and forecasts of the ice drift in the Northern Dvina River mouth area are actual practical tasks. The hydrological regime of a tidal river mouth is very complex phenomena and one of the most difficult for a quantitative description.

The authors implemented an integrated approach to study ice jams, including field ice surveys, satellite data analysis, data from the state hydrological monitoring system and hydrodynamic modeling. STREAM\_2D CUDA software is applied for two-dimensional numerical modeling. It takes into account the impact of ice cover.

Ice phenomena usually make significant changes in the water level and velocity regime. In 2019/2020 hydrological year the ice cover provided and maintained a large backwater during all the autumn and the winter. When the spring ice drift came from the river upstream there was a 3-4 meter water level rise, which lasted for 5 days, creating a threat of flooding of the Kholmogory village by a breakthrough wave. There is no effective technique

Северная Двина. Однако гидрологический 2019/2020 год был в этом отношении особенным. С осени и всю зиму поддерживалась большая величина дополнительного подпора, создаваемого ледяным покровом, которая при подходе основного ледохода весной еще увеличилась, произошел резкий скачок уровня воды и сформировался затор, который продержался в течение 5 суток, создавая угрозу затопления волной прорыва села Холмогоры. Методик прогноза развития таких ситуаций и количественной оценки характеристик возможных затоплений при том или ином сценарном варианте не существует. На данном этапе работы выявлен ряд трудностей, возникающих при анализе ледовой обстановки и при моделировании, а также сформулированы шаги по оптимизации проводимых наблюдений и обследований ледяного покрова, измерений расходов и уровней воды.

**Ключевые слова:** заторы льда; ледоход; устье; река Северная Двина; численное моделирование; затопление

### Введение

Формирование и разрушение заторов льда и связанные с этим изменения характеристик речного потока остаются слабо изученными и трудными для расчетов и прогнозов гидрологическими процессами. Между тем на реках, впадающих в северные моря, именно заторные явления наиболее часто определяют максимальные годовые уровни воды и вызывают наводнения.

Ледовые явления оказывают влияние на параметры потока в течение всей зимы. При установлении первой ледяной перемычки на поток начинает действовать дополнительное сопротивление. Так как на реке Северная Двина лед устанавливается не одновременно по всей реке, то на отдельных участках осенью всегда формируются зажоры различной мощности и продолжительности так, что продольный профиль водной поверхности соответствующим образом искажается относительно периода открытого русла. Обычно замерзание реки в

to forecast or assess probable scenarios for such situation.

The article identified difficulties arising during ice conditions analysis and hydrodynamic modeling of the situation. Steps to optimize the monitoring of ice cover, flow discharges and water levels are also formulated.

**Keywords:** ice jam; ice drift; river mouth area; the Northern Dvina; numerical model; flood

нижнем течении реки Северная Двина идет по третьему типу Р.В. Донченко [Донченко, 1987], то есть наблюдается выраженный ледоход и шугоход иногда с образованием зажоров. Тип вскрытия в каждую весну определяется комплексом условий: в некоторых случаях его можно определить как третий тип, когда вскрытие происходит на волне повышенного стока, но чаще – как второй тип, то есть смешанный, когда значительное влияние на вскрытие оказывают положительные температуры воздуха, солнечная радиация, а также мощность речного потока, действуя в комплексе [Донченко, 1987].

Период установления льда, так же как и период разрушения ледяного покрова, можно рассматривать как череду зажорных (или заторных) ситуаций, увеличивающих подпорный эффект, и ситуаций прорыва заторов с резким падением подпора и формированием волны прорыва. Такие ледовые явления играют роль регуляторов стока, которые могут приостановить или ускорить речной поток. В течение зимы

ледяной покров не только нарастает, изменяется и его структура, например, происходит перераспределение ледяных подсонов и шуги подо льдом, вместе с тем меняется и перераспределяется в пространстве фактор сопротивления льда потоку.

Характеристики ледяного покрова и особенно зажорных и заторных явлений очень индивидуальны для каждого участка реки, изменчивы во времени, трудно наблюдаемы и измеряемы. До сегодняшнего момента на практике в оперативных прогнозах для оценки наиболее вероятных сценариев развития заторных ситуаций используют статистические методики, разработанные на основе данных многолетних наблюдений, при этом каждую весну подбирают годы-аналоги по условиям формирования ледостава осенью и условиям развития весеннего половодья<sup>1</sup>. Ситуация весны 2020 года с развитием устойчивых заторных пробок в самом начале трех основных рукавов Холмогорского разветвления не имеет аналогов за период наблюдений начиная с 20-30-х годов XX века.

Существуют комплексы прогнозных гидрологических моделей, которые состоят из связки модели формирования стока и гидродинамической модели, которые могут давать прогноз весеннего половодья в соответствии с поступающим с водосбора стоком. Такие модели при должной настройке и апробации могут заменить статистические методики. Однако для реки Северная Двина, в частности ее устьевой области, этого недостаточно из-за значительного влияния на динамику потока ледовых явлений, которые в подавляющем большинстве случаев определяют формирование опасных гидрологических ситуаций в весенний период.

В работе [Krylenko et al., 2020] предложен алгоритм действий для разработки расчета и прогноза затоплений, вызванных заторами, для

участка реки Северная Двина вблизи города Великий Устюг на базе гидродинамической модели. За рамками этой работы остались вопросы оценки такого параметра как толщина ледяного покрова и тела затора в каждой конкретной ситуации, а также ее распределение по пространству в каждый момент времени. Параметр шероховатости при этом ставится в зависимость от задаваемой толщины.

В задачи данной статьи входит:

1) показать, насколько значительно ледовые явления влияют на динамику потока на придельтовом участке реки Северная Двина;

2) описать характеристики ледяного покрова на устьевом участке реки Северная Двина в сезон 2019-2020, насколько это возможно по имеющимся данным мониторинга, включающего космические снимки, съемка беспилотными летательными аппаратами (далее – БПЛА) и данные наблюдений на сети гидрологических постов Росгидромета;

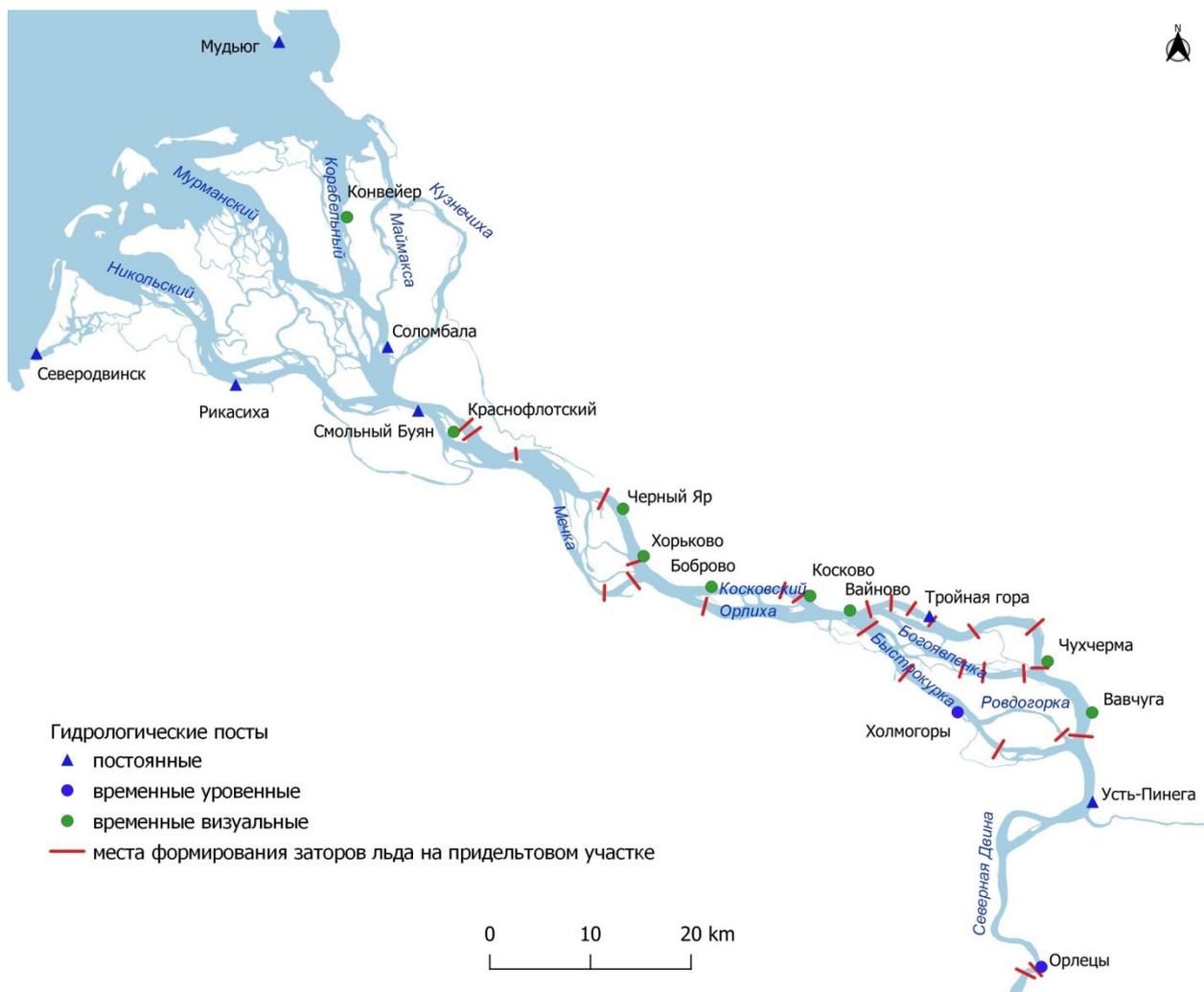
3) оценить достаточность имеющейся информации для воспроизведения наблюдавшейся реальной динамики потока на двумерной гидродинамической модели с учетом ледяного покрова на базе программного комплекса STREAM\_2D;

4) сформулировать необходимые шаги по расширению мониторинга и улучшения результатов моделирования.

### Объект исследования

Придельтовый участок реки Северная Двина представляет собой часть приливной многорукавной устьевой области от впадения реки Пинеги (выше гидрологического поста Усть-Пинега) до вершины дельты (створ гидрологического поста Смольный Буян) и имеет длину около 95 км (рисунок 1). Процессы, происходящие в дельте, заслуживают отдельного пристального внимания и не рассмотрены в данной статье.

<sup>1</sup> Исследование заторов льда в устьевой области Северной Двины с целью их предсказания. Отчет по оперативно-методической теме / Отв. исполнитель В.П. Попов. Архангельск: Северное УГМС, 1980. 122 с. Определение влияния заторов льда на уровень воды в устьевой области Северной Двины с целью предсказания заторных подъемов. Отчет по оперативно-методической теме / Отв. исполнитель В.П. Попов. Архангельск: Северное УГМС, 1982. 39 с.



**Рисунок 1.** Гидрографическая схема устьевой области реки Северная Двина с сетью наблюдений Росгидромета и местами наиболее частого образования заторов льда в пределах придельтового участка по архивным материалам ФГБУ «Северное УГМС»

**Figure 1.** The Northern Dvina mouth area with the observation network (Roshydromet) and usual places of ice jam formation (data from archival materials of the Northern Agency for Hydrometeorology and Environmental Monitoring)

Гидрологический режим устьевой области реки Северная Двина формируется под воздействием речных и морских факторов. Со стороны моря действуют ветровые нагоны и приливы, со стороны реки – речной сток, ледовые явления. Площадь водосбора, с которого в устьевую область поступает сток составляет 348 000 км<sup>2</sup>. Норма стока по гидрологическому посту в вершине устьевой области реки Северная Двина (135 км от морского края дельты в поселке Усть-Пинега) составляет 3 330 м<sup>3</sup>/с, а средний

максимальный расход весеннего половодья – около 21 000 м<sup>3</sup>/с. Величина приливов на морском крае дельты варьирует от 0,6–0,8 м (квадратурный прилив) до 1,25–1,50 м (сизигийный прилив). Период приливных колебаний составляет около 12,5 часов. Под воздействием приливов большую часть года на устьевом участке реки наблюдаются реверсивные течения. Дальность распространения обратных течений вверх по реке зависит преимущественно от величины речного стока, а также от фазы приливов и наличия

<sup>2</sup> Исследование заторов льда в устьевой области Северной Двины с целью их предсказания. Отчет по оперативно-методической теме / Отв. исполнитель В.П. Попов. Архангельск: Северное УГМС, 1980. 122 с.

ветровых нагонов или сгонов. В половодье, по мере роста притока воды с водосбора в устьевую область, режим односторонних течений устанавливается в среднем при расходах воды от 10 000 м<sup>3</sup>/с в створе гидрологического поста Усть-Пинега.

Основной ледоход проходит в устьевой области обычно раньше, чем максимальные расходы воды. Величина максимального стока во многом зависит от сроков прохождения пика половодья на крупнейших притоках: Сухоне, Вычегде, Ваге и Пинеге. Их наложение во времени может вызвать многоводное половодье, которое не становится опасным в пределах устьевой области в отсутствие заторов льда. Все экстремальные наводнения в период весеннего половодья в пределах устьевого участка реки связаны с заторами льда. Вблизи дельты на чистой воде достижение уровня неблагоприятного или опасного явления может также вызвать воздействие нагонных ветров, действующих одновременно с прохождением высоких речных расходов воды.

В естественных условиях заторы льда при весеннем вскрытии могут образовываться по всей длине придельтового участка реки (рисунок 1). Особое значение имеют заторы в Холмогорском разветвлении. В некоторых случаях при таких заторах затоплению подвергаются крупное село Холмогоры и другие населенные пункты. Заторы в Холмогорском разветвлении периодически образуются во всех рукавах, но только при образовании затора в главном русле происходит значительный подъем уровня воды и возможны неблагоприятные и опасные явления. В этом случае часть стока льда перераспределяется в другие рукава, Быстрокурка и Богоявленка, в которых в свою очередь могут тоже сформироваться заторы.

Морфологическими причинами образования заторов в Холмогорском разветвлении называют: снижение ширины русел после деления на рукава, наличие резких поворотов, излучин, мелководные перекаты в главном судоходном русле и во второстепенных рукавах, Быстрокурка, Богоявленка и другие [Завадский и др., 2010]. Мелководные участки с

глубинами менее 1 м зимой могут перемерзнуть до дна. В связи с этим авторы статьи [Завадский и др., 2010] для снижения вероятности формирования заторов предлагают разработку обширной прорези, срезающей мелководные области главного русла до глубин 3,5 м (от проектного уровня), при этом дана оценка временного периода, за который русло вернется в свое текущее естественное состояние, и этот период составляет 20 лет.

Еще одним фактором формирования заторов в Холмогорском разветвлении являются условия прохождения ледохода на выше расположенных ключевых участках русла реки – это вынужденная излучина в районе деревни Орлецы и еще выше расположенные изгибы русла в районе мыса Кривое (35-40 км выше поселка Усть-Пинега). В годы, когда в этих районах формируются длительные и мощные заторы льда, вероятность установления опасных заторов в Холмогорском разветвлении невелика. В этой ситуации возрастает речной сток и уровни воды, ледяной покров в Холмогорском разветвлении подготавливается к вскрытию за счет теплового и механического воздействия.

На благоприятном временном увеличении глубин и скоростей течения при прохождении ледохода в Холмогорском разветвлении может также сказаться волна от прорыва заторов в деревне Орлецы и в районе мыса Кривое, если они были достаточно мощными.

После разрушения заторов в верхних частях рукавов Холмогорского разветвления лед скапливается на выходе из Холмогорского разветвления – в районе населенного пункта Вайново – там, где все рукава сливаются и речная долина имеет резкое сужение (рисунок 1).

Ниже по течению от населенного пункта Вайново характерным местом формирования заторов является район деревни Черный Яр (рисунок 1), однако этот район уже в большой степени подготавливается к вскрытию с помощью ледоколов.

Ледокольные работы проводятся на устьевом участке реки Северная Двина в преддверии прохождения ледохода наиболее активно с 1962 года. Ледокольные работы по

разрушению льда – мощнейший фактор прохождения ледохода в устьевой области реки Северная Двина. Анализ, выполненный в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Северное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» (далее – ФГБУ «Северное УГМС»), показал, что в период 1962–2004 годов средняя продолжительность заторов снизилась более чем в 10 раз по сравнению с периодом 1939–1961 годов и составила 6 часов, максимальные уровни весеннего половодья снизились на 50-70 см [Васильев, 2006]. Эта статистика относится к району вершины дельты и проведена по данным гидрологического поста Соломбала, однако ледокольные работы проводятся и играют роль в процессе вскрытия льда почти по всей длине устьевого участка реки, но чем выше по течению, тем труднее ледоколам оказать влияние на процесс вскрытия.

Дополнительный фактор в ледообразовании и весеннем вскрытии в устьевой области реки Северная Двина – воздействие приливов, которые приводят к реверсивным течениям и перемещениям льдин, а также ветровые стоны, которые в отдельных случаях могут способствовать интенсивному выносу льдин из устьевой области или наоборот их скоплению в дельте.

### Данные и методы

В представленном исследовании реализуется интегрированный подход, включающий анализ полевых материалов наблюдений, космических снимков и компьютерное гидродинамическое моделирование.

Гидродинамические условия в устьевой области могут быть смоделированы с помощью двумерной численной модели, которая была разработана ранее на базе программного

комплекса STREAM\_2D<sup>3</sup> откалибрована и валидирована на данных гидрологических ситуаций в отсутствие ледовых явлений [Лебедева и др., 2016; Alabyan, Lebedeva, 2018]. Двумерная модель на придельтовый участок реки (от гидрологического поста Усть-Пинега до гидрологического поста Смольный Буян) реализована на нерегулярной гибридной сетке, состоящей из четырехугольников и треугольников (всего 67 566 ячеек). Рельеф задан с использованием морских и речных лоций, топографических карт и материалов русловых съемок на отдельные участки реки. Эта расчетная сетка представляет собой верхнюю часть расчетной сетки модели, описанной в [Лебедева и др., 2016; Alabyan, Lebedeva, 2018], но в данном случае нижняя граница расположена в вершине дельты, так что саму дельту модель не включает.

Воздействие ледяного покрова добавлено в модель в рамках новой модификации используемого программного комплекса STREAM\_2D CUDA<sup>4</sup>. Для этого в систему уравнений Сен-Венана внесены изменения, учитывающие дополнительное сопротивление, создаваемое ледяным покровом и заторами льда, а также сужение поперечного сечения за счет толщины ледового образования. Измененная система уравнений представлена в работе [Krylenko et al., 2020].

В качестве граничных условий для моделирования задается на верхней границе – расход в створе гидрологического поста Усть-Пинега, на нижней границе – уровни воды по самописцу на гидрологическом посту Смольный Буян. Измерения расходов воды непосредственно во время прохождения ледохода не проводились и для восстановления временного хода расходов воды использовались данные измерений с вышележащих гидрологических постов на реке Северная Двина и ее притоках.

<sup>3</sup> Беликов В.В., Кочетков В.В. Программный комплекс STREAM\_2D для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014612181 от 20.02.2014.

<sup>4</sup> Алексюк А.И., Беликов В.В. Программный комплекс STREAM 2D CUDA для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках с использованием технологий Compute Unified Device Architecture (на графических процессорах NVIDIA). Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2017660266 от 20.09.2017.

Основным калибровочным параметром модели является коэффициент шероховатости (коэффициент Маннинга). Характеристики ледяного покрова: дополнительная шероховатость и толщина льда или тела затора – в отсутствии фактических данных также становятся калибровочными, что в виду многообразия ситуаций ледовой обстановки делает задачу калибровки практически невозможной. Перспективным представляется путь подбора параметров по фактическим сведениям о ледяном покрове.

На данном этапе работы проведен анализ всех доступных материалов для оценки развития ситуации весеннего вскрытия льда в 2020 году. При этом задействованы следующие источники информации:

1. радарные снимки спутников Sentinel-1 и оптические спутников Sentinel-2 и Landsat-8, находящиеся в открытом доступе;

2. материалы съемки с помощью БПЛА, которые проводятся в рамках ежегодной ледовой разведки весной перед ледоходом и во время ледохода<sup>5</sup>;

3. данные с временных гидрологических постов, которые открываются в весенний период на базе ФГБУ «Северное УГМС» для визуальных наблюдений за ледовой обстановкой. Некоторые из временных гидрологических постов ведут также наблюдения за уровнем (рисунок 1). Сроки наблюдений на гидрологических постах в период ледохода варьируют от 4 часов и чаще в случае необходимости;

4. данные ледовых обследований, которые проводятся сотрудниками ФГБУ «Северное УГМС» совместно с Центром обеспечения мероприятий гражданской защиты

Архангельской области в конце зимы перед ледоходом для оценки ледовых условий на ключевых участках реки Северная Двина, где наиболее вероятно установление затора льда весной.

По космическим снимкам и материалам съемки БПЛА составлены схемы ледовой обстановки на ключевые даты развития ситуации при установлении ледостава и при вскрытии (рисунки 2, 3, 4). Районирование заторов льда в схемах на рисунке 5 сделано в соответствии с терминологией, принятой в методических работах ФГБУ «Северное УГМС» В.П. Поповым<sup>6</sup>. Оно соотносится с терминологией, принятой в Наставлениях гидрометеорологическим станциям и постам<sup>7</sup> и у В.А. Бузина [Бузин, 2004] следующим образом. Замок или очаг затора, который представляет собой ледостав в трещинах или перемычку из ледяных полей, заклинивших русло и ставших преградой для движения льда, в нашей работе, как и в работе В.П. Попова, называется основанием затора. Головная и хвостовая части затора объединены и названы телом затора, также согласно работе В.П. Попова.

После этого проведены сценарные расчеты прохождения весеннего половодья 2020 года на модели:

1) без учета ледовых явлений, чтобы показать степень их участия в процессе;

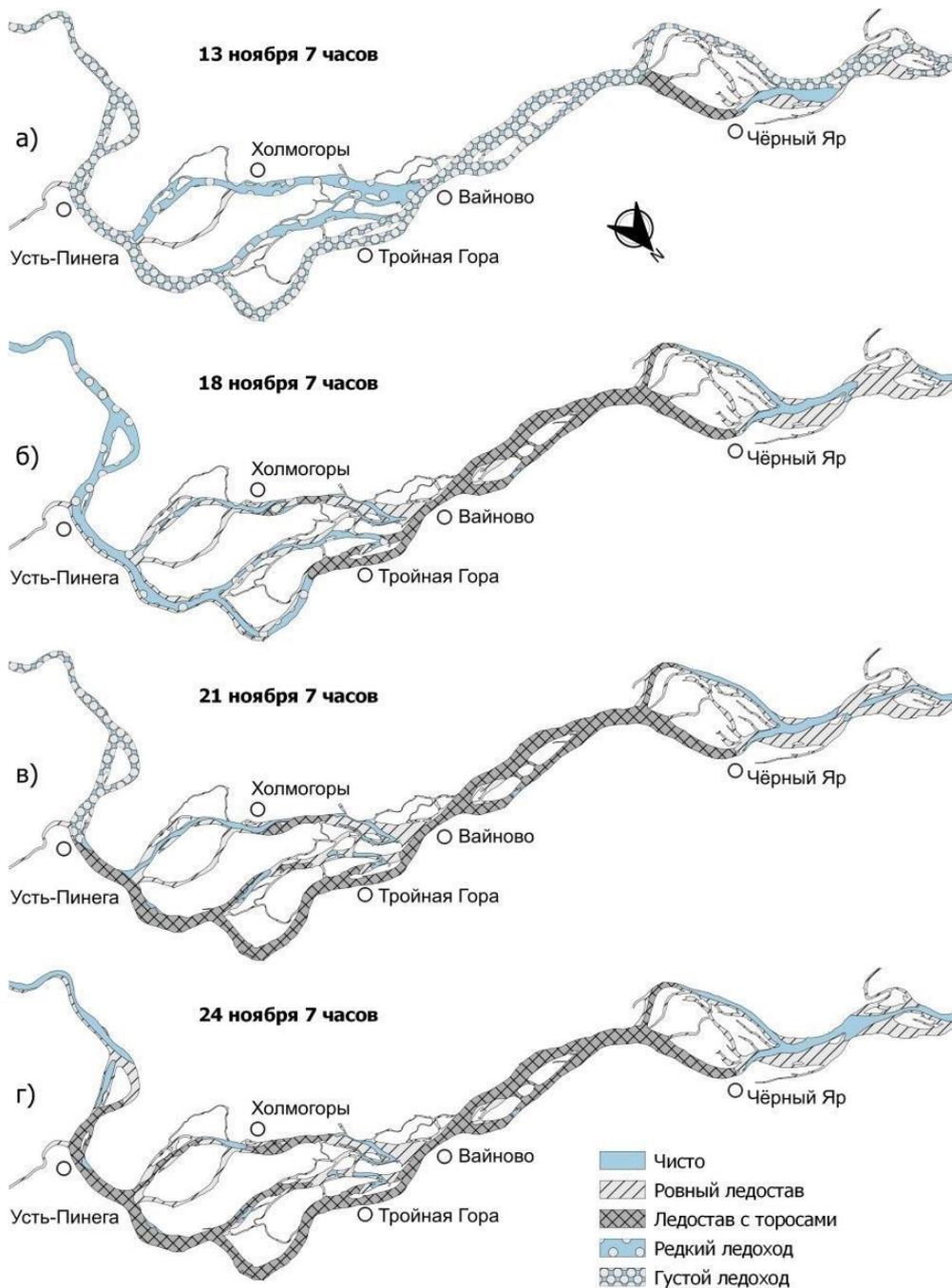
2) с учетом ледяного покрова и формирования заторов.

Построенные схемы ледовой обстановки использованы для задания распределения в пространстве параметров ледяного покрова (толщины и шероховатости).

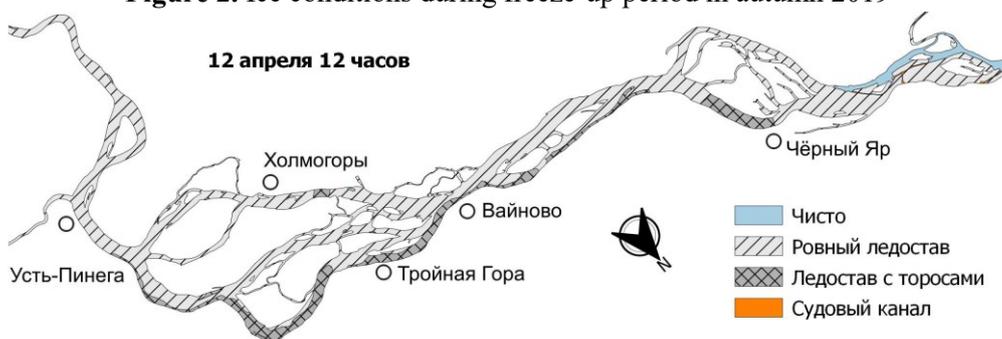
<sup>5</sup> Видеозаписи Архангельский Центр Беспилотных Технологий // ВКонтакте. URL: <http://vk.com/videos-103871656> (дата обращения: 21.12.2020).

<sup>6</sup> Исследование заторов льда в устьевой области Северной Двины с целью их предсказания. Отчет по оперативно-методической теме / Отв. исполнитель В.П. Попов. Архангельск: Северное УГМС, 1980. 122 с.

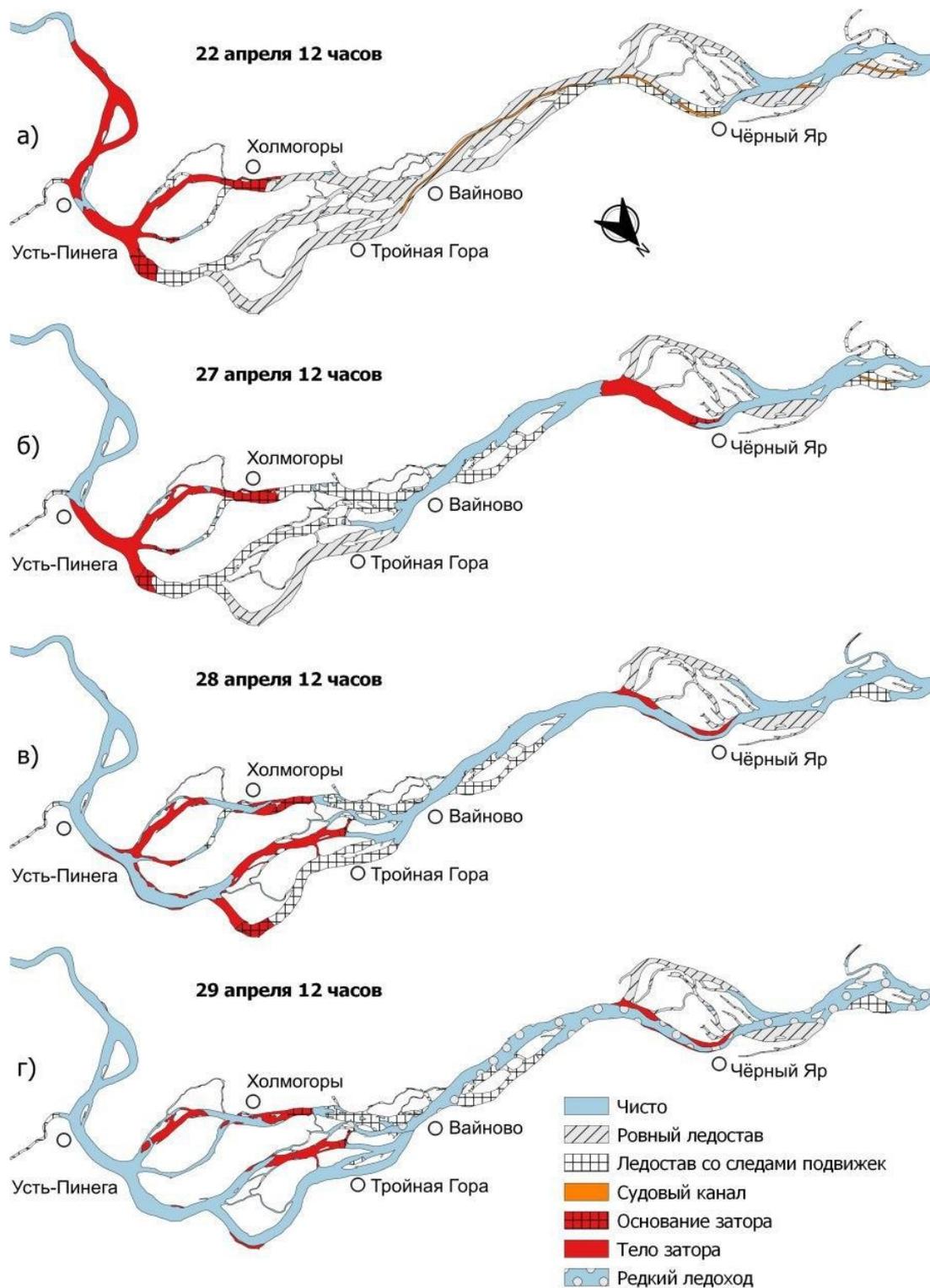
<sup>7</sup> Наставление гидрометеорологическим станциям и постам: в 12 вып. Выпуск 6. Гидрологические наблюдения и работы на речных станциях и постах: в 3 ч. Часть I. Гидрологические наблюдения и работы на больших и средних реках. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 382 с.



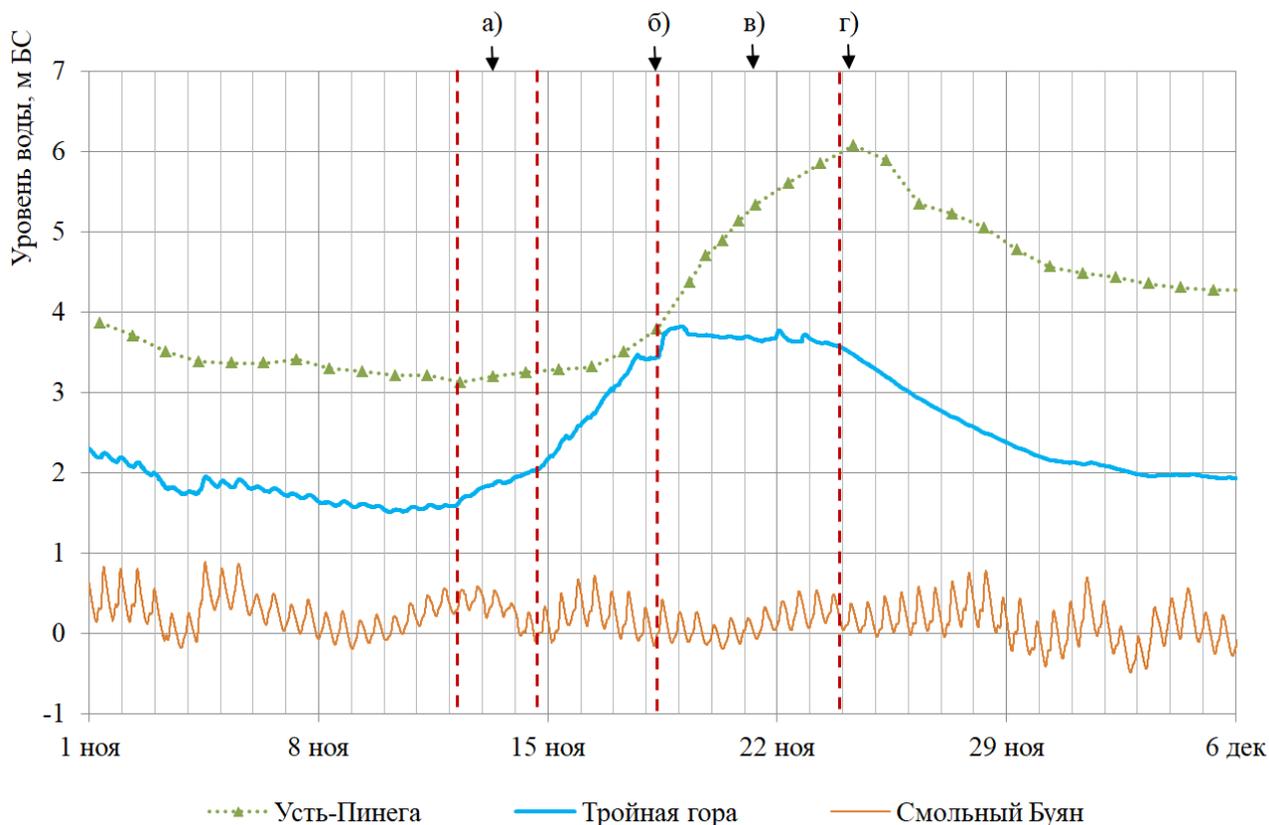
**Рисунок 2.** Схемы ледовой обстановки в период формирования ледяного покрова осенью 2019 года  
**Figure 2.** Ice conditions during freeze-up period in autumn 2019



**Рисунок 3.** Ледовая обстановка, отражающая состояние ледяного покрова перед ледоходом  
**Figure 3.** Ice condition before the breakup processes



**Рисунок 4.** Схемы ледовой обстановки в период весеннего ледохода 2020 года  
**Figure 4.** Ice conditions during the ice breakup in spring 2020



**Рисунок 5.** Графики изменения уровней на гидрологических постах в период формирования ледяного покрова осенью 2019 года.

Красными вертикальными пунктирами отмечены знаковые события в формировании ледостава, черными стрелочками – моменты времени, соответствующие схемам на рисунке 2

**Figure 5.** Water levels during the freeze-up period in autumn 2019. Red dotted lines mark significant events in the formation of freeze-up, black arrows mark the moments of ice conditions at figure 2

## Результаты

### *Установление ледостава в ноябре 2019 г.*

Появление первого льда и шуги в нижнем течении реки Северная Двина произошло 3-4 ноября 2019 года на фоне прохождения дождевых паводков при высоких уровнях воды и больших (паводочных) скоростях течения (третий тип замерзания по [Донченко, 1987]). На гидрологическом посту Усть-Пинега при этом наблюдался уровень воды, соответствующий расходу около 8 000 м<sup>3</sup>/с, что в 3-4 раза превышает среднемеженный расход воды. С 8 ноября 2019 года уже густой ледоход наблюдался в районе деревни Орлецы (160 км от морского края дельты), и весь этот лед активно поступал в акваторию устьевое участка реки Северная Двина и в дельту, где также образовывался свой местный лед. 12 ноября

2019 года образовался ледовый зажор у деревни Черный Яр (рисунок 2а), ледоход продолжил движение по левому рукаву Мечка. 14 ноября ледостав установился в реке Мечка, и весь приносной лед стал накапливаться на участке выше деревни Черный Яр. На графике уровней воды по гидрологическому посту Тройная гора можно заметить соответствующее увеличение градиента роста уровня воды с вечера 14 ноября 2019 года (рисунок 5). В первую очередь заполнялись льдом основные судоходные рукава (рукав Орлиха и главный правобережный рукав Холмогорского разветвления). 18 ноября 2019 года установился ледостав на гидрологическом посту Тройная гора, уровень воды по данным гидрологического поста вырос на 30 см за 4 часа (рисунок 2б, рисунок 5). С 19 ноября 2019 года началось заполнение льдом проток Богоявленка и Быстрокурка (рисунок 2в). Таким образом, в

течение более чем 2 недель лед с вышележащих участков реки поступал в устьевую область, а в течение 10 дней накапливался на участке от деревни Черный Яр до поселка Усть-Пинега. 24 ноября 2019 года в районе мыса Кривое сформировался зажор и прекратилось поступление приносного льда в устьевой участок реки (рисунок 2г). После этого с 24 по 29 ноября 2019 года происходил спад уровней воды во всем Холмогорском разветвлении на фоне спада паводочной волны (рисунок 5). При этом сформировавшийся ледяной покров, особенно на участках со значительными подсовами льдин и торосами, у берегов осел на прибрежные отмели. Всю зиму на острове-осередке в районе поселка Усть-Пинега можно было видеть ледяные глыбы мощностью более 2 м, сформировавшиеся в осеннем ледоходе и возвышающиеся над зимним уровнем воды.

В результате осеннего ледохода на придельтовом участке сформировались обширные области с наторошенным ледоставом и подсовами. Величина подъема уровня воды на гидрологическом посту Усть-Пинега, вызванного подпором ледяного покрова, составила около 2,5 м по результатам измерения расходов воды в феврале и марте 2020 года. Подобные условия подпора по данным гидрологического поста Усть-Пинега наблюдались ранее в 1983 и в 2007 годах. Обычно в этих случаях ожидается длительное прохождение весеннего ледохода с заторными остановками и соответствующими подъемами уровня воды. Весной 2020 года ожидалось формирование заторов льда в деревне Черный Яр и в главном русле Холмогорского разветвления.

Ледовые обследования в марте 2020 года показали, что мощность ледяного покрова с подсовами и шугой в районе деревни Черный Яр достигала 4 м при максимальной глубине до 15 м. При этом участок с подсовами и шугой мощностью от 1,5 до 4 м прослеживался на протяжении более 5 км. Главное русло Холмогорского разветвления не было обследовано так подробно как участок осеннего зажора у деревни Черный Яр, но в створе у деревни Матера (в 4 км выше гидрологического поста Тройная гора) мощность ледяного покрова

с подсовами и шугой составляла до 1,5 м при максимальной глубине в русле 7 м. Ледовая обстановка на момент перед началом ледохода в конце зимы отражена на рисунке 4.

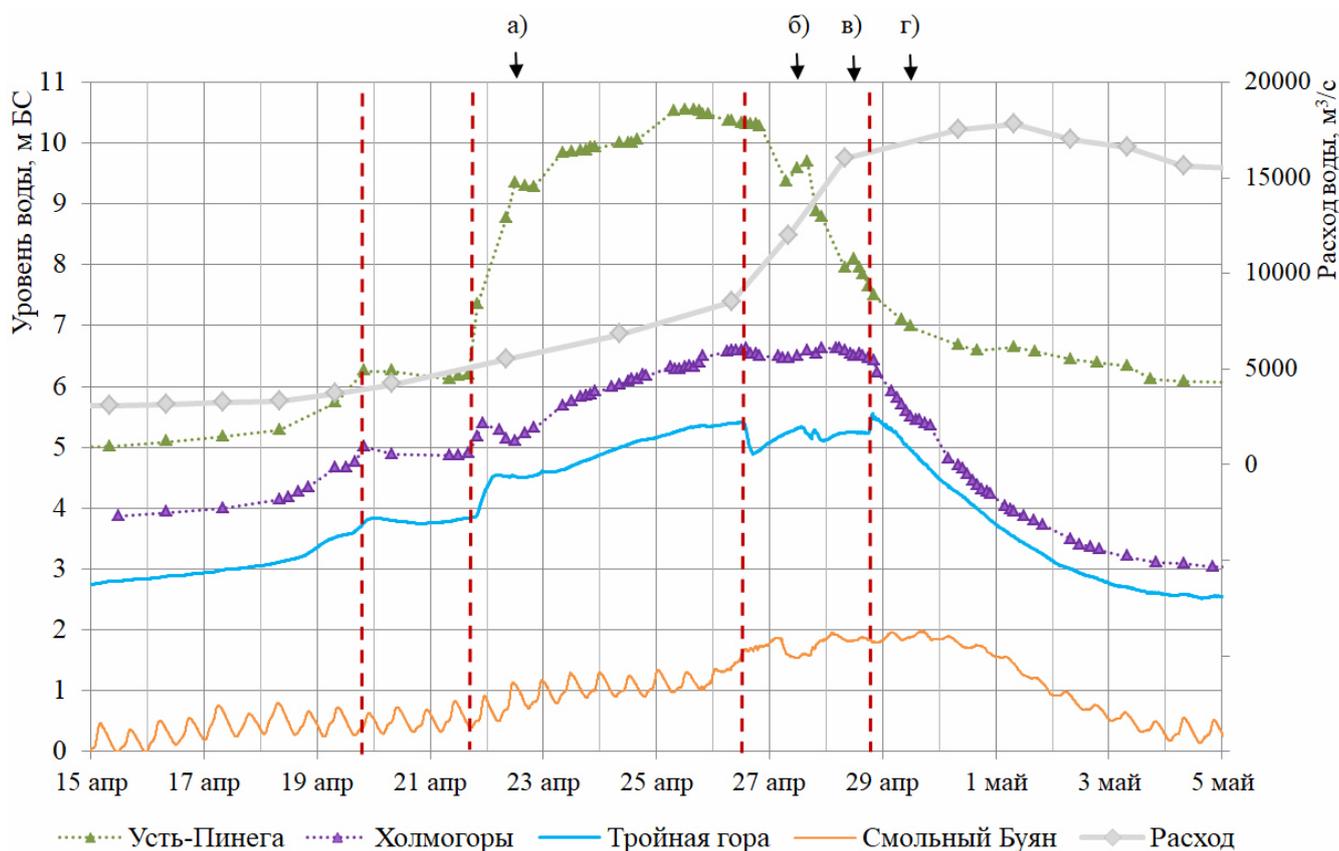
#### *Разрушение ледяного покрова весной 2020 г.*

Первые весенние изменения в ледяном покрове на придельтовом участке реки Северная Двина были связаны с ледокольными работами, которые начались с 15 апреля 2020 года. 18 апреля 2020 года пара ледоколов дошли до нижней части Холмогорского разветвления в районе населенного пункта Вайново, оставив во льду судовые каналы, но не вызвав еще значимого выноса или подвижек льда (рисунок 4а). Вечером 19 апреля 2020 года основной ледоход пришел по реке Северная Двина к деревне Орлецы и там остановился в заторе (рисунок 6), движение льда продолжилось менее чем через двое суток, и вечером 21 апреля 2020 года ледоход остановился ниже поселка Усть-Пинега в районе разделения русла на три рукава: Быстрокурка, Ровдогорка и главное судоходное русло Холмогорского разветвления (рисунок 4а). Главное русло было плотно заполнено льдом с осени, о чем свидетельствуют космические снимки и результаты ледемерной съемки, проведенной в марте. В протоку Быстрокурка лед набился вечером 21 апреля 2020 года, в нее перераспределилась большая доля стока, который не смог направиться в главный рукав из-за мощных зажоров, сформировавшихся осенью. Уровень воды по гидрологическому посту Усть-Пинега при этом вырос на 3 м за сутки (рисунок 6). За время стояния этого затора в течение последующих четырех суток уровень воды на гидрологическом посту Усть-Пинега вырос еще на 1 м. При этом средний уклон водной поверхности на участке между гидрологическими постами Усть-Пинега и Холмогоры достигал 0,2‰, в случае прорыва затора в протоке Быстрокурка угрожая затопить село Холмогоры.

25-26 апреля 2020 года на придельтовом участке вплоть до населенного пункта Вайново проводились повторные ледокольные работы, которые вызвали освобождение ото льда судоходного рукава разветвления в районе деревни Черный Яр и вынос льдин из рукава

Орлиха и вышележащих участков. 26 апреля 2020 года около 14 часов были проведены взрывные мероприятия совместно с ледокольными работами в районе населенного пункта Вайново, после чего начался интенсивный вынос крупных льдин с этого участка и из протоки Богоявленка. Этот момент отразился на графике уровней воды по гидрологическому посту Тройная гора в виде резкого снижения примерно на 0,5 м, а несколькими часами позднее тот же эффект виден и на гидрологическом посту Усть-Пинега (рисунок 6). Часть ледохода, сформировавшегося на участке ледокольных и взрывных работ, задержалась в районе деревни Черный Яр, сформировав непродолжительный затвор (рисунок 4б), который прорвался меньше чем через сутки поздним вечером 27 апреля 2020 года (рисунок 4в).

В течение дня 28 апреля 2020 года происходило медленное, с остановками, вскрытие главного рукава Холмогорского разветвления. Движение в главном русле могло быть спровоцировано затвором в протоке Богоявленка: по данным наблюдателя в населенном пункте Вайново к утру 28 апреля 2020 года вынос льда из нее прекратился. В 18 часов 28 апреля 2020 года на волне движения ледохода началось освобождение ото льда главного русла в створе гидрологического поста Тройная гора, при этом уровень воды в течение часа вырос на 30 см (рисунок 6). В результате первым в Холмогорском разветвлении очистилось ото льда главное русло (рисунок 4г). К 1 мая 2020 года произошло полное освобождение ото льда проток Богоявленка и Быстрокурка.



**Рисунок 6.** Графики изменения уровней на гидрологических постах, а также расчетная оценка объемов притока воды к устьевой области в период весеннего ледохода весной 2020 года.

Красными вертикальными пунктирами отмечены знаковые события в развитии ледохода, черными стрелочками – моменты времени, соответствующие схемам на рисунке 5

**Figure 6.** Water levels and river discharge during the breakup period in spring 2020. Red dotted lines mark significant events of the break-up period, black arrows mark the moments of ice conditions at figure 5

### Результаты моделирования

Были проведены четыре сценарных расчета на основе данных за период половодья с 1 апреля по 30 мая 2020 года. Заданные условия по расходам воды на верхней границе и уровням воды на нижней границе представлены на рисунке 7. Ледовая обстановка была задана в следующих вариантах:

- 1) полное отсутствие влияния ледовых явлений,
- 2) с учетом воздействия ледяного покрова посредством снижения поперечного сечения потока за счет задания толщины ледостава по всей модельной области;
- 3) с учетом дополнительного сопротивления за счет задания дополнительного параметра шероховатости льда (но без учета сужения поперечного сечения потока);

4) с учетом обоих параметров ледяного покрова: толщины и шероховатости.

Для расчетов 2, 3 и 4 ледовая обстановка задавалась в соответствии с составленными схемами ледовой обстановки (рисунки 4-5). Весь расчетный период разделен на отрезки времени с разной ледовой обстановкой (таблица 1).

Толщина льда оценена исходя из ледемерных съемок, проведенных в Холмогорском разветвлении и в районе деревни Черный Яр в марте 2020 года. Параметр коэффициента шероховатости льда задан согласно рекомендациям [Krylenko et al., 2020], выведенных по результатам множества калибровочных расчетов заторных ситуаций на реке Северная Двина в районе Великого Устюга (таблица 2).

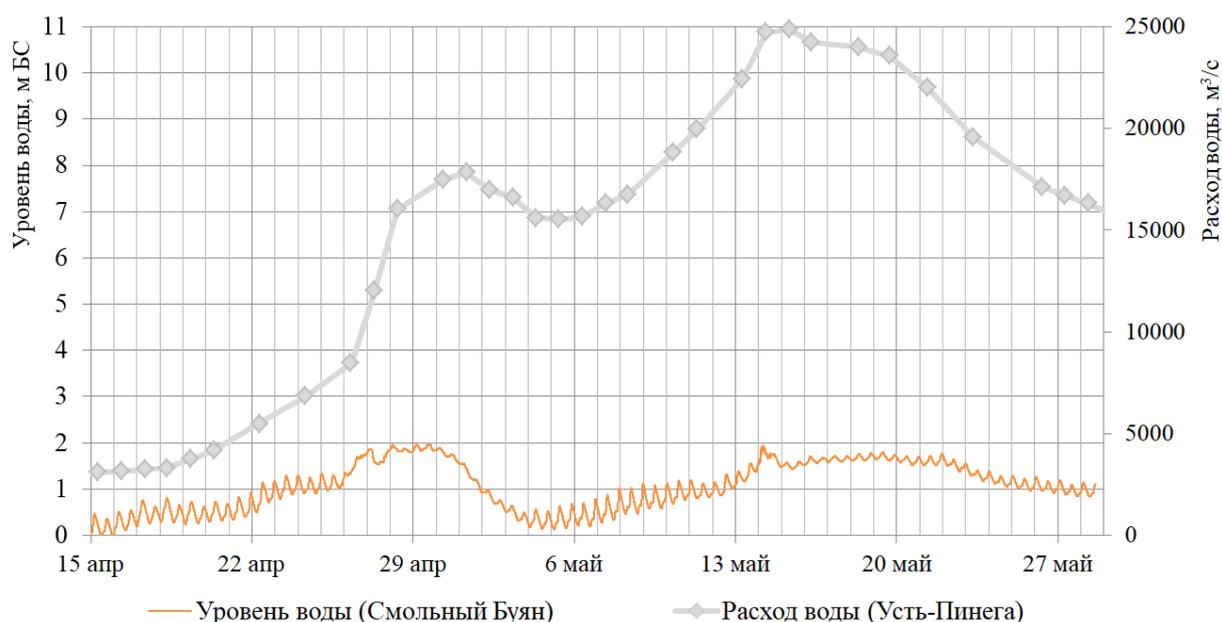


Рисунок 7. Граничные условия для модельных расчетов

Figure 7. Boundary conditions for modeling

Таблица 1. Временные периоды с различной ледовой обстановкой, принятые для моделирования

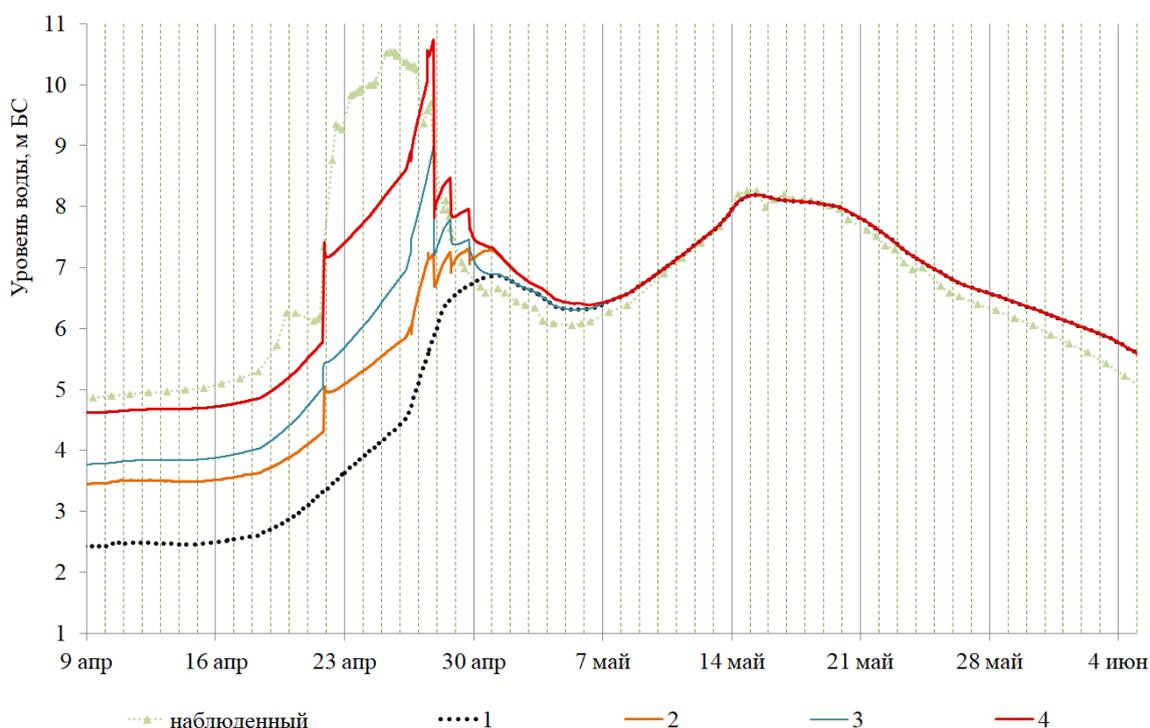
Table 1. Time periods with different ice conditions, used for modeling

Период времени		Ледовая обстановка
с	по	
начало расчета	21 апреля 20 ч.	рисунок 3
21 апреля 20 ч.	26 апреля 14 ч.	рисунок 4а
26 апреля 14 ч.	27 апреля 12 ч.	рисунок 5б (без затора у деревни Черный Яр)
27 апреля 12 ч.	27 апреля 18 ч.	рисунок 4б
27 апреля 18 ч.	28 апреля 18 ч.	рисунок 4в
28 апреля 18 ч.	29 апреля 18ч.	рисунок 4г
29 апреля 18 ч.	конец расчета	без учета ледяного покрова

Таблица 2. Параметры ледяного покрова, заданные в модельных расчетах

Table 2. Ice cover parameters for modeling

Категория ледовой обстановки на схеме	Толщина льда, м	Коэффициент шероховатости ледяного покрова
ледостав	0,5	0,025
ледостав с подвижками	0,5	0,025
торосы	2,5	0,045
основание затора	1	0,025
тело затора	3	0,075
судовый канал	0	0,005
редкий ледоход	0	0
чисто	0	0



**Рисунок 8.** Наблюдаемый уровень воды на гидрологическом посту Усть-Пинега и результаты модельных расчетов: 1 – расчет без учета ледовых явлений, 2 – расчет с учетом толщины ледяного покрова, 3 – расчет с учетом дополнительного коэффициента шероховатости, 4 – расчет с учетом обоих факторов: толщина ледяного покрова и шероховатость

**Figure 8.** Water levels observed at Ust-Pinega gauge and modelled: 1 – without ice cover impact, 2 – taking into account ice and ice-jam thickness, 3 – taking into account ice roughness coefficient, 4 – taking into account both: ice roughness coefficient and ice and ice-jam thickness.

По результатам моделирования по расчету 3 (рисунок 8) удалось воспроизвести максимальный уровень на верхней границе модели (гидрологический пост Усть-Пинега) довольно точно, но он был смоделирован на двое суток позже, чем случился по факту. Большую часть периода стояния затора льда в Холмогорском разветвлении (22-26 апреля

2020 года) его воздействие на уровень воды оказалось недооценено примерно в полтора раза. Зимние условия подпора уровня воды воспроизведены с ошибкой не более 15 см, что составляет около 10% от общей величины подпора, вызванного льдом.

По результатам расчетов 1 и 2 видно, что оба фактора воздействия ледяного покрова

(толщина и шероховатости) внесли значительный сопоставимый вклад в расчет уровня. Небольшое количество фактических данных о ледяном покрове и наличие ряда других неопределенностей не позволяет назвать причины ошибок в данном расчете. Это может быть недооцененность мощности ледовых «пробок», формирующихся в процессе ледохода при сжатии льда и перераспределении его по рукавам, а также суммарный вклад ряда других ошибок.

### Обсуждение результатов

Представленную работу следует рассматривать как начальный этап исследования.

Очевидно, что ледовые процессы оказывают определяющее влияние на развитие весеннего половодья на устьевом участке реки Северная Двина. Причем разнообразие возможных вариантов развития событий очень велико. Все эти варианты можно описать распределением в пространстве и во времени толщины ледовых образований и создаваемых ими дополнительных шероховатостей.

Результаты моделирования показывают трудность задания подходящих параметров ледяного покрова, а также выявляют неопределенности в задании верхнего граничного условия из-за большого влияния происходящих ледовых явлений на расходы воды в створе гидрологического поста Усть-Пинега. Однако, без проведения калибровки параметров ледяного покрова, используя материалы натуральных наблюдений и космических снимков, удалось воспроизвести зимний уровень воды перед вскрытием у поселка Усть-Пинега в условиях значительного подпора, а также значение максимального уровня воды, сформировавшегося от мощнейшего затора, установившегося во всех рукавах Холмогорского разветвления весной 2020 года.

По текущим итогам можно сказать, что по имеющейся информации о развитии ледовой обстановки можно получать почти исчерпывающую картину хронологии развития весеннего ледохода (по космическим снимкам, съемке БПЛА, визуальным наблюдениям на гидрологических постах). Однако толщину

(мощность) заторных образований и ее распределение по пространству пока не удается достоверно описать по имеющимся материалам. Для решения этой задачи запланировано: во-первых, расширение и оптимизация планирования ледемерных съемок в зимний период. Ледемерные профили должны быть выполнены на участках осенних зажоров после установления ледостава осенью и перед вскрытием реки весной. Во-вторых, автоматизированное дешифрирование радарных снимков с целью количественной оценки мощности ледяного покрова и формирующихся заторов. Заторные и зажорные участки на снимках имеют обычно наибольшую яркость пикселей, а ровный ледяной покров – более темный цвет. В качестве эталонов для дешифрирования могут быть использованы данные о толщине льда и мощности заторов из результатов ледемерных съемок.

Для того чтобы полно анализировать динамичное развитие ситуации во время продвижения ледохода с заторными остановками, необходимо обеспечение всех ключевых уровней гидрологических постов самописцами с непрерывной автоматической записью. Четырехсрочные наблюдения не позволяют точно определить момент начала резкого подъема или спада уровней воды, что вызывает трудности с определением направления движения волны попуска или подпора и не позволяет однозначно оценить причину скачка уровня воды. Временная установка самописцев уровня воды на период осеннего и весеннего ледохода, к сожалению, очень затруднена из-за большой опасности потери прибора вместе с данными.

При моделировании большая неопределенность содержится в задании верхнего граничного условия. Во время ледохода створ гидрологического поста Усть-Пинега постоянно находится в состоянии подпора разной величины. Измерение расходов воды во время ледохода затруднены. Тем не менее максимальную достоверность информации о расходах на верхней границе модели нужно стремиться достичь за счет повышения качества и количества измерений. Для исключения дополнительных

ошибок необходимо провести актуализацию рельефа на придельтовом участке, так как после прохождения половодья с формированием

мощных и длительных заторов возможны значительные переформирования в русле.

### Благодарности

Авторы благодарят коллектив отдела речных и морских гидрологических прогнозов ФГБУ «Северное УГМС» за помощь и обратную связь при анализе ледовых процессов. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-35-60032 «Комплексное исследование динамики вод в многорукавном приливном устье реки Северная Двина на основе синтеза компьютерной модели, сетевых и экспедиционных гидрологических данных»).

### Литература

Бужин В.А. Заторы льда и заторные наводнения на реках. СПб.: Гидрометеиздат, 2004. 202 с.

Васильев Л.Ю. Весеннее наводнение и противозаторные мероприятия в устьевой области Северной Двины // Доклады VI Всероссийского гидрологического съезда. Секция 2. Наводнения и другие опасные гидрологические явления: оценка, прогноз и смягчение негативных последствий (г. Санкт Петербург, 28 сентября – 1 октября 2004 г.). М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. С. 223-229.

Донченко Р.В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 242 с.

Завадский А.С., Иванов В.В., Рулева С.Н., Чалов Р.С., Чалов С.Р. Руслевые процессы, ледовые явления и регулирование русла в Холмогорском разветвлении на реке Северной Двине // Эрозия почв и руслевые процессы. 2010. Т. 17. С. 198-217.

Лебедева С.В., Алабян А.М., Крыленко И.Н., Федорова Т.А. Наводнения в устье Северной Двины и их моделирование // Геориск. 2015. №1. С. 18-25.

Alabyan A.M., Lebedeva S.V. Flow dynamics in large tidal delta of the Northern Dvina river: 2D simulation // Journal of Hydroinformatics. 2018. Vol. 20. Iss. 4. P. 798-814. DOI: [10.2166/hydro.2018.051](https://doi.org/10.2166/hydro.2018.051).

### Acknowledgements

The reported study was funded by RFBR, project number 19-35-60032 («Flow dynamics in large tidal delta of the Northern Dvina River, based on the synthesis of computer modelling, stationary and expeditionary hydrological observations»).

### References

Alabyan A.M., Lebedeva S.V. Flow dynamics in large tidal delta of the Northern Dvina river: 2D simulation. *Journal of Hydroinformatics*, 2018, Vol. 20, no. 4, pp. 798–814. DOI: [10.2166/hydro.2018.051](https://doi.org/10.2166/hydro.2018.051).

Buzin V.A. *Zatory l'da i zatornye navodneniya na rekakh [Icejams and icejam river floods]*, Saint Petersburg, Publ. Hidrometeoizdat, 2004. 204 p. (In Russian).

Donchenko R.V. *Ledovyi rezhim rek SSSR [Ice regime of the USSR rivers]*. Leningrad, Publ. Hidrometeoizdat, 1987. 246 p. (In Russian).

Krylenko I., Alabyan A., Alekseyuk A., Belikov V., Sazonov A., Pimanov I., Potryasaev S., Zelentsov V. Modeling Ice-Jam Floods in the Frameworks of an Intelligent System for River Monitoring. *Water Resources*, 2020, vol. 47, pp. 387-398. DOI: [10.1134/S0097807820030069](https://doi.org/10.1134/S0097807820030069).

Lebedeva S.V., Alabyan A.M., Krylenko I.N., Fedorova T.A. Navodneniya v ust'e Severnoi Dviny i ikh modelirovanie [Floods in the Northern Dvina river mouth and the modeling of them]. *Georisk [Georisk]*, 2015, no. 1, pp. 18-25. (In Russian; abstract in English).

Vasil'ev L.Yu. Vesennnee navodnenie i protivozatornye meropriyatiya v ust'evoi oblasti Severnoi Dviny [Spring flooding and preventive mash activities in the mouth area of the Northern Dvina]. *Doklady Shestogo Vserossiiskogo*

Krylenko I., Alabyan A., Aleksyuk A., Belikov V., Sazonov A., Pimanov I., Potryasaev S., Zelentsov V. Modeling Ice-Jam Floods in the Frameworks of an Intelligent System for River Monitoring // Water Resources. 2020. Vol. 47. P. 387-398. DOI: [10.1134/S0097807820030069](https://doi.org/10.1134/S0097807820030069).

*gidrologicheskogo s"ezda. Sektsiya 2. Navodneniya i drugie opasnye gidrologicheskie yavleniya: otsenka, prognoz i smyagchenie negativnykh posledstviy (g. Sankt Peterburg, 28 sentyabrya – 1 oktyabrya 2004 g.) [Reports of the Sixth All-Russian Hydrological Congress. Section 2. Floods and other hazardous hydrological phenomena: assessment, forecast and mitigation of negative consequences (St. Petersburg, September 28 – October 1, 2004)].* Moscow, Publ. Meteoagenstvo Rosgidrometa, 2006, pp. 223-229. (In Russian).

Zavadskii A.S., Ivanov V.V., Ruleva S.N., Chalov R.S., Chalov S.R. Ruslovye protsessy, ledovye yavleniya i regulirovanie rusla v Kholmogorskom razvetvlenii na reke Severnoi Dvine [Evolution of river bed, ice phenomena and channel regulation in the Kholmogorsk branch on the Northern Dvina river]. *Eroziya pochv i ruslovye protsessy [Soil erosion and evolution of river bed]*, 2010, vol. 17, pp. 194–213. (In Russian).