

Формирование ледяной плотины в низовьях рек Мезень и Кулой с 1983 по 2020 г.

© 2021 г. С.А. Агафонова*, П.Г. Михайлюкова, В.М. Колий

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

*sv_ice@list.ru

Formation of an ice dam in the lower reaches of the Mezen and Kuloy rivers from 1983 to 2020 (the White Sea basin)

S.A. Agafonova, P.G. Mikhaylyukova, V.M. Koliy

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*sv_ice@list.ru

Received October 28, 2020 / Revised April 19, 2021 / Accepted June 25, 2021

Keywords: *ice cover, macro-tidal estuary, satellite images, Mezen river, Kuloy river.***Summary**

The features of ice cover formation within the macro-tidal estuaries of the Mezen River and the Kuloy River are considered. The investigated rivers flow into the Mezen Bay of the White Sea. The main sources of information for the ice monitoring were the high spatial resolution images from the satellites Landsat 5-8 and Sentinel 1.2 with addition of medium spatial resolution images of MODIS/Terra and VIIRS/SuomiNPP. Every year, zones of continuous hummocks and ice dams are formed in the estuaries, which exert influence upon characteristics of the tidal waves. The fast ice and drifting ice areas are observed below the ice dam. Above the dam, amplitude the tidal fluctuations in the water level is reduced by 3–4 times. According to the data for the period 2017–2020, the area of relatively smooth ice cover is located at the distance of 48–49 km above the mouth of the Mezen River and 40–42 km above the same of the Kuloy River. Advancing of the ice edge to the mouth is accompanied by the formation of hummocky ice bridges, the position of which is confined to the narrowing and sharp turns of the channel. According to satellite images, it is established that the ice dam changes its position from year to year. In the period from 1983 to 2020, on the Mezen River, the ice dam was located at a distance of 21.0 to 30.5 km from the mouth, and on the Kuloy – from 13.7 to 27.5 km above the mouth. The position of the ice dam is weather dependent. In severe winters, the dam is located closer to the mouth gauge line. Snow, falling in November and December on areas of open water, delays advancing of the ice edge to the mouth. For Mezen, the relation between the position of the ice dam and three following predictors had been obtained: the sum of precipitation for November and December at the air temperature below -5°C , the sum of air temperatures below -5°C for January and March, and the sum of positive air temperatures for February. The proposed dependence made it possible to restore the positions of the ice dam for the years which were not provided with satellite data. These are 1994 and 1999.

Citation: Agafonova S.A., Mikhaylyukova P.G., Koliy V.M. Formation of an ice dam in the lower reaches of the Mezen and Kuloy rivers from 1983 to 2020 (the White Sea basin). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2021. 61 (3): 445–456. [InRussian]. doi: 10.31857/S2076673421030100.

Поступила 28 октября 2020 г. / После доработки 19 апреля 2021 г. / Принята к печати 25 июня 2021 г.

Ключевые слова: *ледяной покров, макроприливные устья, космические снимки, реки Мезень и Кулой.*

На основе данных космических снимков оптического и радиолокационного диапазонов рассмотрены особенности формирования ледяного покрова в пределах макроприливных устьевых участков рек Мезень и Кулой. Ежегодно в исследуемых эстуариях образуются зона сплошных торосов и ледяная плотина, влияющие на характеристики приливной волны. С 1983 по 2020 г. створ ледяной плотины на Мезени располагался на расстоянии от 21,0 до 30,5 км от устья, на Кулое – от 13,7 до 27,5 км от устья. Формирование ледяной плотины и её разрушение происходят с остановками в створах, приуроченных к сужениям и крутым поворотам русла. Показано, что в ноябре и декабре твёрдые осадки значительно задерживают продвижение кромки льда.

Введение

Высокая пространственная неоднородность ледяного покрова северных рек обуславливает поиск дополнительных источников информации о его состоянии, помимо наблюдений на гидрологических постах (ГП). В последние десятилетия

такими источниками стали космические снимки разного спектрального диапазона и пространственного разрешения [1]. Снимки оптического диапазона высокого и сверхвысокого пространственного разрешения позволяют отслеживать кромку ледяного покрова, наличие полыней и появление трещин. В условиях большого числа

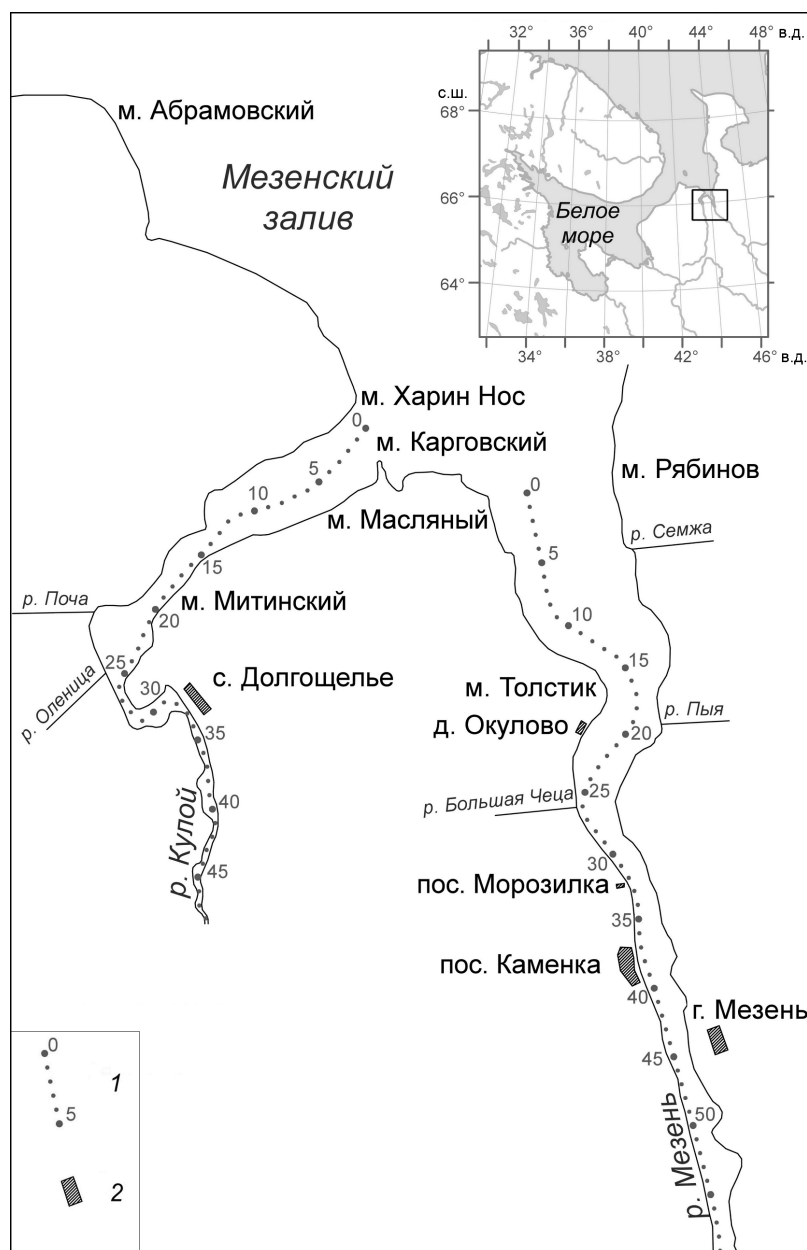


Рис. 1. Исследуемая территория:
1 – расстояние от устья, км; 2 – населённые пункты
Fig. 1. Study area:
1 – distance from the mouth, km; 2 – settlement

облачных дней и длительной полярной ночи особую актуальность приобретает возможность использования радиолокационных изображений.

Устья рек Мезень и Кулой образуют единую устьевую систему, подверженную сильно-му воздействию приливов. За границу устьевых взморья принимают линию мыс Абрамовский – устье р. Мгла (рис. 1), в качестве устьевых створов для р. Кулой – мыс Харин Нос – мыс Карговский, для р. Мезень – мыс Масляный – мыс Рябинов. Для Мезенского залива характерен почти правильный полусуточный прилив. Прилив в устье Мезени составляет от 5,0 м в квадра-

туру до 7,6 м в сизигию, в устье р. Кулой – от 5,8 до 7,9 м соответственно. В эстуарии Мезени скорости приливо-отливных течений могут достигать 2,0–2,5 м/с. Величина прилива возрастает до устья р. Сёмжа, однако выше по течению она быстро уменьшается [2]. Наиболее сильная трансформация приливной волны наблюдается в районе мыс Толстик – устье р. Пыя, где поперечное сечение русла резко сужается. Эстуарий р. Кулой, как и эстуарий р. Мезень, имеет воронкообразную форму. В 20 км от устья он расширяется, и здесь за счёт перемещения наносов из мористой части сформировалась большая

грядовая отмель, вызвавшая интенсивную боковую эрозию. Длина устьевых участков р. Мезень — 90 км, р. Кулой — 100 км [3].

Лёд в приливных устьях влияет на характеристики приливной волны, условия проникновения солёных вод, режим транспорта наносов и русловых деформаций, а также условия формирования заторов и затопления территории. Ледовые условия в устьях определяют сроки зимней навигации, эксплуатацию ледовых переправ и ледовые нагрузки на гидротехнические сооружения [4]. Формирование ледяного покрова в приливных устьях зависит не только от метеорологических факторов и режима речного стока, но и от влияния приливно-отливных течений и сгонно-нагонных явлений. Динамическое воздействие колебаний уровня воды приводит к взламыванию вновь образовавшегося ледяного покрова и его торошению. Толщина затороженного ледяного покрова в приливных устьях соответствует величине прилива, т.е. при равных климатических условиях она будет тем выше, чем больше амплитуда колебаний уровня воды [5]. Лёд на приливных отмелях подвижен. Близ устьевых створа даже в условиях низких отрицательных температур воздуха могут оставаться участки открытой воды, где отмечаются снежура и шуга. В макроприливных устьях многослойные ледяные образования по берегам формируют вертикальные стенки, которые значительно сужают ширину русла, меняя условия трансформации приливной волны [6].

Многократное взламывание кромки льда в приливных устьях схоже с процессами формирования и разрушения ледяного покрова при колебаниях уровня воды в нижних бьефах ГЭС. Согласно работе [7], изменение уровня воды, сопоставимое с толщиной льда, приводит к появлению вдольбереговых трещин. При дальнейшем росте уровня ледяной покров отрывается от берегов и разламывается на ледяные поля. Под влиянием скоростей течения и ветра начинают подвижки, торошение и подныривание льдин. Форсирование попусков воды и рост скоростей течения вызывают уплотнение и динамическое увеличение толщины скоплений льда. Затухающие вверх по течению от устьевых створа колебания уровня воды определяют различия в условиях формирования ледяного покрова по длине устьевых участков. В работе [5] на основе данных наблюдений за ледовыми условиями в заливе Фанди

(Северная Америка) авторы выделяют для макроприливных эстуариев (устьевых участков) пять зон: 1) зону с ровным ледяным покровом и береговыми трещинами; 2) зону накопления льда и образования вертикальных ледяных стенок у берегов; 3) зону дрейфующего льда; 4) зону непрерывного ледообразования и 5) зону, свободную ото льда. В работе [8] для устья р. Пенжина (Камчатка), расположенной в более суровых климатических условиях, чем реки залива Фанди, выделено четыре зоны (от устьевых створа вверх по течению): 1) неустойчивого ледостава; 2) сплошных торосов; 3) ровного льда на фарватерах и торосов на мелководьях; 4) преимущественно ровного льда.

Постановка проблемы

В Белом море интенсивное ледообразование начинается в декабре и распространяется от вершин заливов к центру. Из-за ветров преимущественно юго-западного направления льды накапливаются у восточных берегов заливов. Молодые льды вытаивают со второй декады апреля, а полное очищение моря приходится на первую декаду июня [9]. В Мезенском заливе припай зимой многократно взламывается, происходят сжатие, торошение и дрейф битого льда. Средняя высота торосов на плавучем льду — 3–4 м [10]. Согласно наблюдениям, в 6 км от устьевых створа Мезени у деревни Сёмжа с 1949 по 1979 г. появление плавучего льда отмечалось в среднем 25 октября, а продолжительность периода с ледовыми явлениями составляла 200 суток [10]. На речном участке нижнего течения Мезени (по данным ГП Дорогорское в 80 км от устья) ледостав устанавливается в среднем 13 ноября, вскрытие наблюдается 7 мая, а средняя с 1936 по 2018 г. продолжительность периода с ледовыми явлениями равна 205 сут.

Согласно отрывочным экспедиционным сведениям, опубликованным в работах [3, 10], на устьевом участке Мезени и Кулой кромка ледяного покрова отличается многочисленными подсовами, наслоениями и торосами. Нагромождения льда образуют «ледяную плотину», которая демпфирует приливную волну и создаёт в верхнем бьефе условия подпора. Амплитуда приливных колебаний уровня воды выше плотины уменьшается в 3–4 раза. Ниже плоти-

ны неподвижный лёд наблюдается лишь у берегов. В 1990, 2005 и 2008 гг. ледяная плотина в эстуарии Мезени располагалась в створе устья р. Большая Чеца и представляла собой сплошной барьер торосистого и застамушенного льда. В эстуарии Кулоя, согласно данным [3], плотина образуется у мыса Митинский. Особенности ледового режима исследуемых участков рек ограничивают хозяйственную деятельность. В нижнем течении Мезени и Кулоя ледовые переправы обустривают у с. Долгощелье и на автодороге пос. Каменка — г. Мезень. Затяжное установление сплошного ледяного покрова, формирование протяжённых заторошенных участков и трещин осложняют использование ледовых переправ. Так, зимой 2020 г. намороженный в начале зимы лёд неоднократно срывало приливной волной, а сформировавшиеся торосы и многочисленные ропаки не позволяли проложить трассу по кратчайшему расстоянию [11]. Кроме того, ежегодно волна прорыва ледяной плотины на р. Мезень вызывает резкие изменения морфологии дна эстуария, в том числе в пределах судоходного фарватера [12].

Отсутствие регулярных наблюдений не позволяет охарактеризовать сезонную динамику кромки ледяного покрова, особенности ледовых условий по длине устьевых участка и изменчивость положения створа ледяной плотины и заторошенных участков год от года. Согласно [13], на севере Европейской территории России с 1976 г. зимние температуры воздуха увеличиваются в среднем на 0,59 °C каждые 10 лет. Рассматриваемый период (1983–2020 гг.) характеризует современные климатические условия следующим образом: в холодные зимы (1985, 1987, 1998 и 1999 гг.) сумма отрицательных температур по данным метеостанции (МС) Мезень составляла менее –2000 градусо-дней мороза, в тёплые (1995, 2007 и 2019 гг.) — около –1200 градусо-дней, а зимой 2020 г. — –903 градусо-дней, что стало самым высоким значением за этот период. Наблюдаемые климатические изменения могут заметно изменить условия формирования ледяного покрова и эксплуатации ледовых переправ вплоть до смещения их створов выше по течению. Именно поэтому крайне важно оценить вклад метеорологических характеристик в формирование предельного за сезон створа ледяной плотины и участков заторошенного ледяного покрова.

Материалы и методы

Опубликованные сведения о ледовом режиме исследуемых участков обобщают, прежде всего, отрывочные результаты экспедиций Ленгидропроекта, Государственного океанографического института (ГОИН), Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) и Северного УГМС. Основные задачи этих экспедиционных исследований — изучение условий судоходства и возможности строительства Мезенской приливной станции. Именно в связи с возрождением интереса к приливным электростанциям зимой 2005 и 2008 гг. сотрудниками ГОИН и МГУ имени М.В. Ломоносова проводились инженерно-гидрологические изыскания, в том числе обследования берегов и акватории Мезенского залива для оценки состояния припая, дрейфа льда и морфометрических характеристик ледовых образований [14, 15]. Стационарные наблюдения за ледовым режимом велись только в створе деревни Сёмжа, в 6,0 км от устья Мезени, с 1949 по 1979 г. В настоящее время в Мезенском заливе действует морская гидрометеорологическая береговая станция Абрамовский маяк. На устьевых участках регулярные наблюдения не проводятся, ближайшие к устьевым створам действующие речные посты расположены на р. Мезень у с. Дорогорское, в 80 км от устья, и на р. Кулой у деревни Кулой, в 209 км от устья; действующая МС находится в г. Мезень.

В условиях отсутствия материалов регулярных наблюдений по всей длине устьевых участков в качестве исходных данных мы использовали оптические и радиолокационные космические снимки (табл. 1). Основной источник информации для ледового мониторинга — снимки высокого пространственного разрешения Landsat 5–8 и Sentinel 1, 2. Для снимков Sentinel-1 применён продукт Level1 (GRD — Ground Range Detected) с частично выполненной геометрической коррекцией. Перед тематическим анализом радиолокационные данные были предварительно обработаны — проведены радиометрическая калибровка, фильтрация спекл-шума (фильтр Lee с размером окна 5) и устранение геометрических искажений. Данные программ Landsat и Sentinel позволили охватить период с 1983 по 2020 г. Из-за пропусков данных миссии Landsat в 2003–2007 и 2009–2011 гг. за каждый ледовый сезон удалось полу-

Таблица 1. Параметры спутниковой съёмки

Спутник	Пространственное разрешение используемых каналов, м	Повторная съёмка через каждые	Число сцен	Годы
TM/Landsat-4	30	16 сут.	1	1983
TM/Landsat-5	30	16сут.	84	1984–1998
ETM+/Landsat-7	30	16 сут.	32	2000–2018
OLI/Landsat-8	30	16сут.	39	2013–2020
MSI/Sentinel-2	10	2–5 сут.	58	2016–2020
Sentinel-1	10	12 сут.	43	2017–2020
MODIS/Terra	500	2 раза в сут.	87	2002–2020
VIIRS/SuomiNPP	500	2 разавсут.	27	2020

чить менее трёх снимков, что недостаточно для достоверных результатов. Для уточнения сведений о ледовой обстановке за эти годы использовались снимки MODIS/Terra и VIIRS/Suomi NPP. Информация, полученная по этим снимкам, носит справочный характер, поскольку их пространственное разрешение существенно ниже основного массива космических снимков. При низкой сплочённости дрейфующего льда граница вода–лёд хорошо фиксируется в красном или ИК-каналах. Для исследуемых рек применение оптических снимков с ноября по январь ограничено из-за низкой освещённости и сплошной облачности. Дешифрирование ледовой обстановки возможно с февраля до мая–июня.

В отличие от съёмки в оптическом диапазоне радиолокаторы позволяют получать изображение вне зависимости от облачности и условий освещения. На формирование отражённого радиолокационного сигнала влияют несколько факторов: влажность, шероховатость, диэлектрическая проницаемость и структура поверхности, от которой отражается сигнал. Неодинаковое соотношение воды, льда, снега и воздуха определяет разный механизм отражения сигнала и его интенсивность. Для заторошенной поверхности ледяного покрова характерны высокие значения коэффициента обратного рассеяния, для поверхности ровного льда и открытой воды — низкие [16, 17]. Для приливных устьев с помощью радиолокационных изображений можно выделять зоны торосов, ровного льда, дрейфующий лёд и участки, свободные ото льда. Серия снимков позволяет отслеживать изменения в ледяном покрове в течение периода ледостава: формирование полыней, заторошенных участков и начальные процессы разрушения льда [16, 18, 19].

Для корректного дешифрирования космических снимков использованы данные подспутниковых наземных обследований, выполненных в январе–феврале 2019 г. в рамках экспедиции кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ. Программа полевых работ предусматривала ледомерные съёмки на р. Кулой у с. Долгощелье и на р. Мезень от створа, в 56 км от устья до р. Пыя. Согласно экспедиционным данным, на р. Мезень зона сплошных торосов располагалась на участке от пос. Морозилка до устья р. Пыя, ниже по течению наблюдался дрейфующий лёд по фарватеру и многослойные забереги. В створе пос. Каменка (38 км от устья) максимальная высота торосов и ропаков составила 1,5 м, а в 56 км от устья — 0,5 м. Толщина ровного ледяного покрова у пос. Каменка менялась по створу от 36 см на фарватере до 87 см у берегов, в створе «56 км от устья» — от 35 до 50 см, на р. Кулой у с. Долгощелье — от 28 до 40 см соответственно. Для перечисленных створов образцы, выпиленные из ледяного покрова, имели схожее строение: сверху — белёсый мутный снеговой и наслудный лёд, ниже — лёд с включениями наносов, снизу — кристаллический прозрачный лёд.

В настоящей работе использованы статистические методы анализа данных. Для рядов наблюдений проводили проверку на соответствие статистическим гипотезам с помощью критериев Андерсона $t(A)$, коэффициента ранговой корреляции Спирмена (*Spearman RCC*, или r_s), коэффициентов Стьюдента (*t-test*) и Фишера (*F-test*) при уровне значимости $\alpha = 5\%$. Проверка значимости коэффициентов корреляции также выполнялась при $\alpha = 5\%$. Для оценки меры точности и эффективности регрессионной зависимости использовалось отношение средней квадратической погрешности рассчитанных зна-

чений s к среднеквадратическому отклонению рассчитываемой величины σ по формуле

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y - y')^2}{n - m}},$$

где y и y' — фактические и рассчитанные значения соответственно; n — число членов ряда; m — число параметров регрессионного уравнения; при значениях отношения $s/\sigma = 0,50 \div 0,80$ предлагаемая методика расчёта считается удовлетворительной, при значениях $\leq 0,50$ — хорошей [20] (из-за малой длины ряда оценка ошибок регрессионной зависимости проводилась методом выбрасываемой точки).

Результаты

Совместное использование радиолокационных и оптических снимков позволило подробно отследить сезонные изменения ледовых условий и установить особенности формирования ледяного покрова в пределах исследуемых участков за период с 2017 по 2020 г. Согласно данным космической съёмки, кромка льда продвигалась прерывисто, как будто «по ступенькам», с формированием ледяных перемычек. Так, зимой 2018 г. на р. Мезень с 30 января по 4 февраля кромка сместилась на 5 км всего за пять дней, однако в последующую неделю положение кромки было стабильным [21]. Поверхность ледяного покрова у кромки — заторошенная и хорошо определяется по снимкам. Положение ледяных перемычек приурочено к участкам сужений, крутых поворотов русла и изменений продольного профиля. В 2017–2020 гг. к середине февраля (в 2018 г. — к середине марта) кромка ледяного покрова достигала своего предельного положения, где и формировалась ледяная плотина [22]. Начало термической деградации льда и сглаживание поверхности торосов по данным снимков отмечалось с начала марта. Очищение ото льда начиналось с середины апреля от створа ледяной плотины вверх по течению и оставалось в створах зимних ледяных перемычек, где при замерзании происходили локальные динамические утолщения ледяного покрова.

За последние четыре года расположение ледяных перемычек было относительно постоянным.

На это указывает тот факт, что на 70% снимков 2017–2020 гг. кромка льда и зимой, и весной фиксировалась в трёх створах (рис. 2): на Мезени — 1) в районе пос. Морозилка (30–31 км от устья), 2) в створе впадения р. Большая Чеца (25–26 км от устья) и 3) выше деревни Окулово (22–23 км от устья); на р. Кулой — 1) в 3 км ниже с. Долгощелье (28–29 км от устья), 2) в створе впадения р. Оленица (24–25 км от устья) и 3) в створе впадения р. Поча (21–22 км от устья).

Условия формирования ледяных перемычек меняются по длине устьевых участков вслед за изменениями амплитуды колебаний уровня воды. По мере приближения к устьевому створу для устойчивого положения кромки требуется большая её прочность, которая обеспечивается и за счёт низких температур воздуха. На Мезени в среднем –200 градусо-дней мороза достаточно для продвижения кромки льда от створа «45 км от устья» на 7 км вниз по течению, а для створа «26 км от устья» — лишь на 3 км.

Для выявления неоднородности ледовых условий по длине рек использовали данные радиолокационных снимков. Для Мезени и Кулой выбран вариант зонирования устьевых участков, представленный в работе [8]. Как уже отмечалось, торосы, ропаки и трещины осложняют эксплуатацию ледовых переправ. Год от года положение и протяжённость зоны сплошных торосов меняются, а значит, другими становятся и условия эксплуатации ледовой переправы пос. Каменка — г. Мезень. Зонирование проводили по данным за январь–февраль, когда торосы уже сформированы, но ещё не перекрыты снежным покровом и термически не разрушены (рис. 3). Для ближайшей к устьевому створу зоны 1 при отсутствии дрейфующего льда характерны низкие значения коэффициента обратного рассеяния (чёрный цвет на снимке). Выше по течению расположена зона сплошных торосов (зона 2), здесь высокие значения сигнала (белый цвет на снимке) отмечают практически по всей ширине русла. В пределах зоны 3, вдоль линии наибольших глубин, ледяной покров преимущественно ровный, торосы и ропаки сохраняются на мелководьях и у берегов. На верхнем участке, в зоне 4, поверхность ледяного покрова становится относительно ровной по всей ширине русла.

На р. Кулой в 2017–2020 гг. верхняя граница зоны сплошных торосов проходила в 29–35 км от устья, на р. Мезень — в 32–44 км от устья. Про-

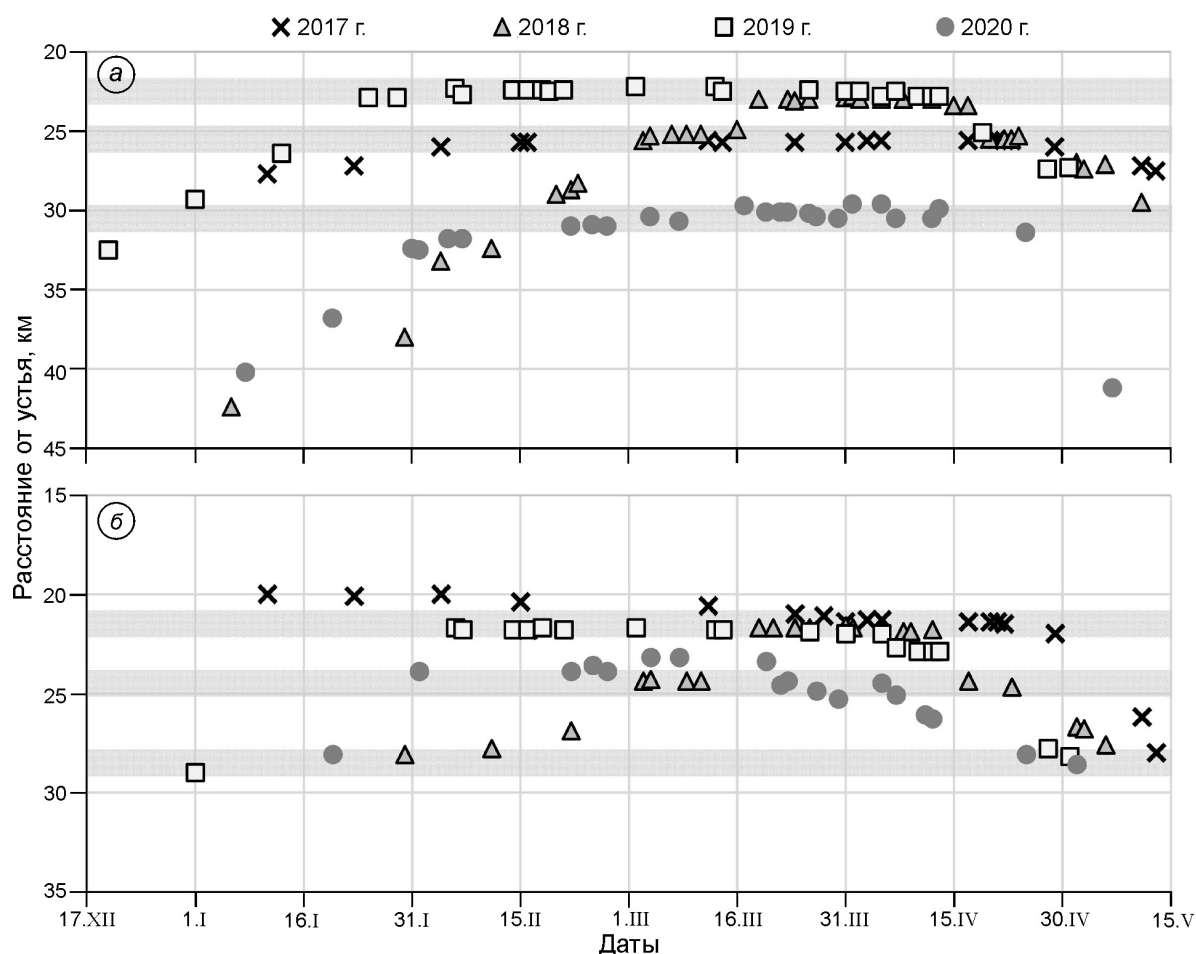


Рис. 2. Сезонное изменение положения кромки ледяного покрова на реках Мезень (а) и Кулой (б) в 2017–2020 гг. Движение кромки льда к устью происходит с остановками в сужениях и на поворотах русла. Участки ледяных перемычек за 2017–2020 гг. выделены серым цветом

Fig. 2. Seasonal change in the ice edge position on the Mezen River (a) and the Kuloy River (b) in 2017–2020. The movement of the ice edge occurs with stops in sections of narrowing and sharp turns of the riverbed. Sections of ice bridgings for 2017–2020 are highlighted in gray

тяжённость участка сильно затороженного ледяного покрова составляла от 5 до 13 км. В 2017 и 2020 гг. зона сплошных торосов включала в себя участок в районе пос. Каменка и г. Мезень, в том числе створ ледовой переправы. В отличие от границы зоны сплошных торосов, граница зоны преимущественно ровного льда слабо менялась год от года. Участок преимущественно ровного льда на р. Мезень располагался выше 48–49 км от устья, на р. Кулой – выше 40–42 км от устья.

Перечисленные особенности формирования ледяной плотины позволяют получить информацию о её положении за многолетний период, начиная с 1983 г., с помощью ограниченного числа оптических снимков только за февраль–март, а не за весь зимний сезон (рис. 4, табл. 2). За рас-

сматриваемый период на Мезени створ ледяной плотины в 72% случаев совпадал с участком, указанным ранее в литературных источниках [3, 10]. На Кулое в 56% случаев плотина зафиксирована выше указанного в литературе створа. С 1983 по 2020 г. на р. Мезень положение створа ледяной плотины менялось в диапазоне 21,0–30,5 км от устья, а на р. Кулой – 13,7–27,5 км от устья. На Мезени наиболее высокое положение створа плотины (в 29,5–30,5 км от устья) наблюдалось в 1983, 1995 и 2020 гг. Вероятно, в эти годы складывались сложные условия эксплуатации ледовой переправы. Наиболее близкое к устьевому створу положение ледяной плотины (см. табл. 2) на р. Кулой наблюдалось в 2014 г. (13,7 км от устья), на р. Мезень, если учитывать снимки вы-

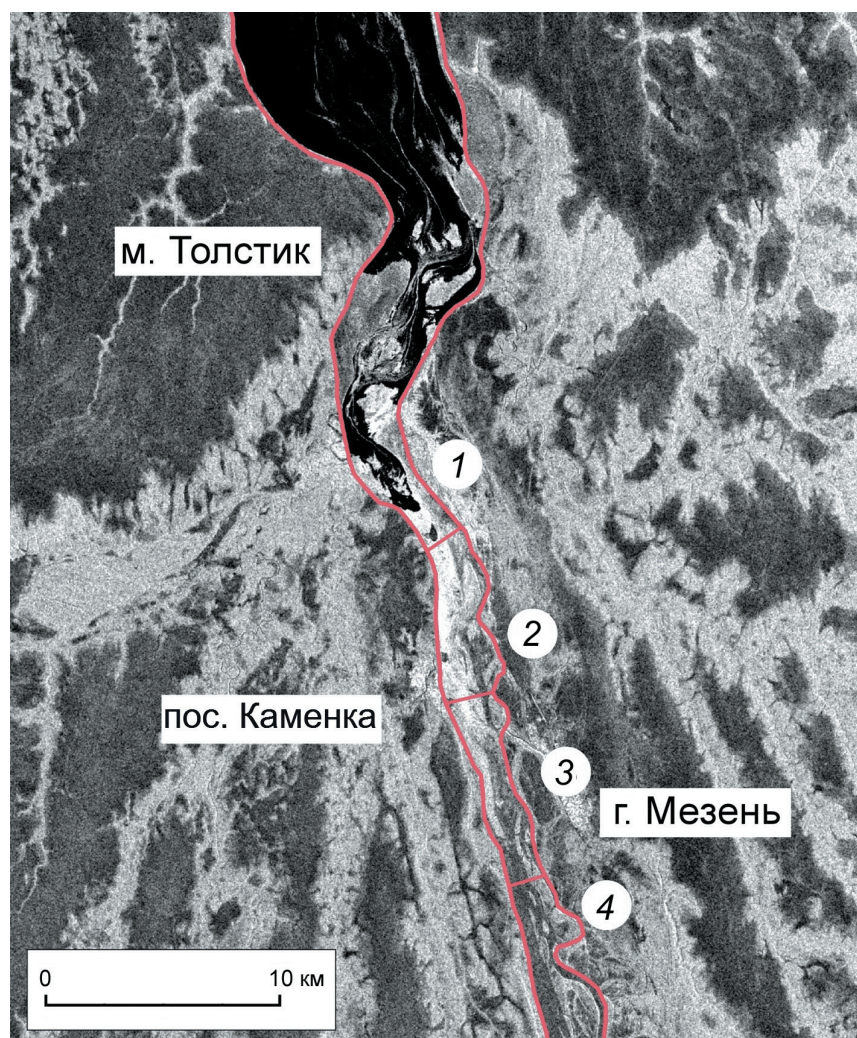


Рис. 3. Пример зонирования устьевого участка р. Мезень (Sentinel-1, 25.02.2020, VV-поляризация):

зона 1 – неустойчивый ледостав; зона 2 – сплошные торосы; зона 3 – ровный лёд на фарватере и торосы на мелководьях; зона 4 – преимущественно ровный лёд

Fig. 3. An example of zoning the estuary of the Mezen River (Sentinel-1, 25.02.2020, VV-polarization):

zone 1 – unstable ice cover; zone 2 – continuous hummocky ice cover; zone 3 – smooth ice cover on the fairway and hummocky ice in shallow water; zone 4 – smooth ice cover

сокого пространственного разрешения, – в 2013 г. (21,5 км от устья), а если учитывать также снимки MODIS, то в 2010 г. (21,0 км от устья). Полученные многолетние данные позволяют предположить, что образование кромки льда на Мезени ближе, чем в створе 21,0–21,5 км от устья, в современных климатических условиях маловероятно.

Для выделения роли метеорологических факторов формирования ледяной плотины использованы данные о температуре и осадках на МС Мезень. Рассчитаны коэффициенты корреляции предельного за сезон положения ледяной плотины и следующих метеорологических характеристик: суммы положительных температур воздуха; суммы температур воздуха ниже 0, –5, –10, –15 и –20 °С; суммы осадков при температурах воздуха ниже 0, –5, –10, –15 и –20 °С за каждый месяц с ноября по март (табл. 3). Графическая зависимость положения плотины от сумм отрицатель-

ных температур воздуха имеет криволинейный характер; для её линеаризации в качестве предикторов использовался квадратный корень от сумм отрицательных температур воздуха. Из-за удалённости МС коэффициенты корреляции положения ледяной плотины и метеопараметров для Кулоя ниже, чем для Мезени, и в настоящей статье не приводятся. Влияние температур воздуха на предельное за сезон положение створа ледяной плотины неоднозначно. И для Мезени, и для Кулоя наибольший разброс точек в зависимостях положения ледяной плотины от температур воздуха отмечается в средние по суровости зимы. При сумме отрицательных температур воздуха за весь зимний сезон от 1500 до 1700 градусо-дней мороза плотина на р. Мезень располагалась на участке от 23,9 до 27,7 км от устья, на р. Кулой – от 21,8 до 25,4 км от устья. На Мезени в тёплые зимы ледяная плотина может формироваться как в 10 км

Таблица 2. Положение ледяной плотины на реках Мезень и Кулой

Реки	Положение ледяной плотины от устья, км			Среднее квадратическое отклонение
	наименее близкое (год)	наиболее близкое (год) (*без учета снимков MODIS)	среднее значение	
Мезень	30,5 (1983 г.)	21,0 (2010 г.) 21,5 (2013 г.)*	24,8	2,6
Кулой	27,5 (1995 г.)	13,7 (2014 г.)	22,4	2,6

выше от деревни Окулово (1995 и 2020 гг.), так и в створе впадения р. Большая Чеца (2008 г.).

Согласно результатам корреляционного анализа, в начале зимы (в ноябре и декабре) ключевую роль в установлении створа ледяной плотины играют суммы твёрдых осадков (см. табл. 3). Снег, выпадающий на участки, свободные от устойчивого ледяного покрова, задерживает продвижение кромки льда. В годы, когда морозная погода в ноябре и декабре не сопровождается осадками, кромка льда к началу января достигает положения ближе к устью, чем в годы со снегопадами. Этот вывод можно проиллюстрировать различием динамики кромки за последние четыре года (см. рис. 2). В начале января 2020 г. кромка ледяного покрова располагалась на расстоянии 40,2 км от устьевового створа, что в 10 км выше по течению, чем в январе 2019 г. Сумма предьянварских осад-

ков при температуре воздуха ниже -5°C в 2020 г. почти в 5 раз превысила показатели 2019 г. (48 и 10 мм соответственно), а температуры воздуха за ноябрь–декабрь практически не отличались. Этот крайне важный вывод может быть полезен в случае использования снегогенерирующих насадок для сокращения длины полыньи и ускорения продвижения кромки льда в створе ледовой переправы. В практике регулирования ледового режима в нижних бьефах ГЭС [23] известно, что подача искусственного снега не всегда приводит к сокращению длины полыньи; результат в значительной степени зависит от расположения створа генератора снега. В период с января по март коэффициенты корреляции положения ледяной плотины и сумм осадков незначимы, продвижение кромки ледяного покрова к устьевому створу в этот период определяется температурами воздуха.

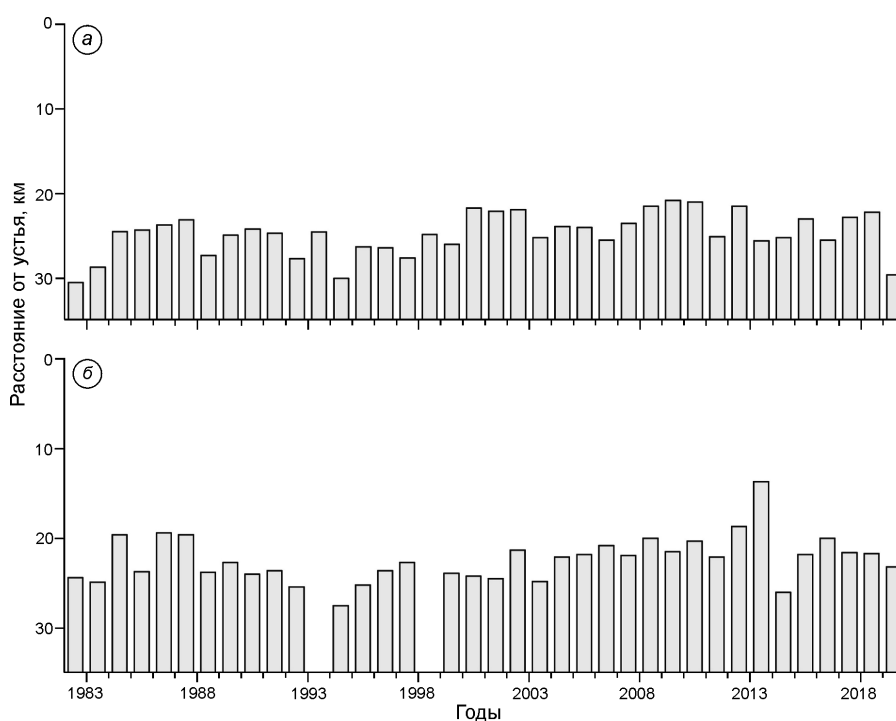


Рис. 4. Положение ледяной плотины на реках Мезень (а) и Кулой (б) в 1983–2020 гг.

Fig. 4. The location of the ice dam on the Mezen River (a) and the Kuloy River (b) over the 1983 to 2020

Таблица 3. Коэффициенты корреляции зависимостей положения ледяной плотины на р. Мезень (от устья, км) от метеорологических характеристик*

Характеристики	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март
Сумма положительных температур, °С	–0,21	0,18	0,30	0,41	0,11
Квадратный корень из суммы температур (°С) ниже:					
0	0,23	–0,24	–0,34	–0,21	–0,40
–5	0,23	–0,23	–0,37	–0,21	–0,42
–10	0,13	–0,22	–0,32	–0,13	–0,39
–15	0,03	–0,25	–0,29	–0,19	–0,21
–20	–0,10	–0,20	–0,30	–0,22	–0,21
Сумма осадков при температуре воздуха (°С) ниже:					
0	0,18	0,63	0,12	–0,07	0,23
–5	0,49	0,47	–0,11	–0,26	0,15
–10	0,38	0,14	0,09	0,08	0,20
–15	0,26	–0,10	0,07	0,05	–
–20	0,18	–0,22	0,05	0,26	–

*Статистически значимые коэффициенты корреляции выделены жирным шрифтом. Прочерки – коэффициенты корреляции не определялись ввиду недостаточного объёма данных.

При отрицательных температурах воздуха и отсутствии оттепелей кромка ледяного покрова может продвигаться ближе к устьевому створу и в марте. Так, в 2018 г. за первую половину марта кромка продвинулась на 2,6 км, а в марте 2020 г. положение кромки практически не менялось.

Нами рассмотрены различные сочетания предикторов, имеющих значимые коэффициенты корреляции с предельным за сезон положением ледяной плотины. Среди этих сочетаний выбран вариант, характеризующийся наибольшим значением множественного коэффициента корреляции $R = 0,8$:

$$L = 27,96 + 0,06A - 0,24B + 0,32C,$$

где L – расстояние от предельного за сезон створа ледяной плотины до устья, км; A – сумма осадков при температуре воздуха ниже -5°C за ноябрь и декабрь; B – квадратный корень суммы температур воздуха ниже -5°C за январь и март; C – сумма положительных температур воздуха за февраль.

Предложенная зависимость в явной форме не учитывает температурный режим в начале зимы, но за рассматриваемый период добавление новых предикторов значимо не меняет множественный коэффициент корреляции. Короткий ряд наблюдений за положением створа ледяной плотины не

позволяет проверить предложенный вариант на независимом материале, поэтому для оценки его качества использовался метод выбрасываемой точки. Определённое таким образом отношение s/σ составило 0,7, что даёт возможность признать качество предложенной зависимости удовлетворительным. На основе полученной зависимости восстановлено положение ледяной плотины в 1994 и 1999 гг. (см. рис. 4).

Проверка рядов предельного за сезон положения ледяной плотины с 1983 по 2020 г. с помощью критерия ранговой корреляции Спирмена показала отсутствие статистически значимого тренда. Для рядов метеорологических характеристик отмечается значимый тренд (по критерию ранговой корреляции Спирмена) при значениях сумм отрицательных температур воздуха и сумм осадков при температурах ниже -5°C в ноябре и декабре. Для тех же рядов наблюдается нарушение стационарности по критерию Стьюдента. Нарушение стационарности рядов по дисперсии F -test статистически значимо для сумм отрицательных температур за октябрь и для сумм осадков при температурах ниже -5°C в октябре и ноябре. При этом сокращение числа дней с отрицательными температурами и рост значений сумм положительных температур в холодные месяцы года (с ноября по март) статистически не значимо.

Заключение

Для макроприливных устьевых участков рек Мезень и Кулой получены данные о положении створа ледяной плотины с 1983 по 2020 г. Основным источником информации стали космические снимки оптического и радиолокационного диапазонов. За указанный период на Мезени ледяная плотина устанавливалась на участке от 21,0 до 30,5 км от устья, а на Кулое – от 13,7 до 27,5 км от устья. На Мезени наиболее высокое положение створа плотины (в 29,5–30,5 км от устья) наблюдалось в 1983, 1995 и 2020 гг., на Кулое (в 26,0–27,5 км от устья) – в 1995 и 2015 гг. Статистический анализ показал отсутствие значимых трендов для рядов предельного за сезон положения створа ледяной плотины на Мезени и Кулое.

Согласно данным космических снимков, с 2017 по 2020 г. формирование ледяной плотины и её разрушение происходили с остановками

в створах, приуроченных к сужениям и крутым поворотам русла. Положение зоны относительно ровного льда оставалось стабильным выше 48–49 км от устья на Мезени и выше 40–42 км от устья на Кулое. Зона сплошных торосов меняла своё положение год от года вслед за створом ледяной плотины, её протяжённость составила от 5 до 13 км. В 2017 и 2020 гг. зона сплошных торосов включала в себя участок в районе пос. Каменка и г. Мезень, в том числе створ ледовой переправы.

Для исследуемого участка Мезени снегопады в ноябре и декабре замедляют продвижение кромки ледяного покрова к устьевому створу и к началу января кромка может располагаться выше пос. Каменка. Это следует учитывать при планировании сроков эксплуатации ледовой переправы на Мезени.

В период с января по март движение кромки к устью определяется температурами воздуха. Для Мезени получена зависимость положения ледяной плотины от трёх предикторов: суммы осадков за ноябрь и декабрь при температуре воздуха ниже -5°C ; суммы температур воздуха ниже -5°C за январь и март; суммы положительных температур воздуха за февраль.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта РФФИ № 18-05-60021–Арктика.

Acknowledgments. The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (№ 18-05-60021–Arctic).

Литература

References

1. Duguay C., Bernier M., Gauthier Y., Kouraev A. Remote sensing of lake and river ice // Remote Sensing of the Cryosphere. 2015. P. 273–306. doi: 10.1002/9781118368909.ch12.
2. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
3. Полонский В.Ф., Лупачев Ю.В., Скриптунов Н.А. Гидролого-морфологические процессы в устьях рек и методы их расчета (прогноза). СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 383 с.
4. Morse B., Burrrell B., Hilaire A., Bergeron N., Messier D., Quach T. River ice processes in tidal rivers: research needs // Proc. 10th Workshop on river ice. 1999. CGU-HS CRIPE. P. 388–399.
5. Desplanque C., Bray D.I. Winter ice regime in the tidal estuaries of the northeastern portion of the Bay of Fundy, New Brunswick // Canadian Journ. of Civil Engineering. 1986. V. 13. Is. 2. P. 130–139. doi: 10.1139/186-021.
6. River ice formation / Ed. Beltaos S. Edmonton: CRIPE-CGU, 2013. 553 p.
7. Донченко Р.В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 247 с.
8. Горин С.Л., Романенко Ф.А., Ковал М.В. Первые сведения о зимнем гидрологическом режиме и ледяном покрове в гиперприливном устье реки Пенжина // Тр. V Всерос. конф. «Ледовые и термические процессы на водных объектах России». М.: РГАУ–МСХА, 2016. С. 88–95.
9. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. II. Белое море. Вып. 1 Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 240 с.
10. Демиденко Н.А. Гидрологический режим Мезенского залива и эстуариев Мезени и Кулоя // Система Белого моря. Т. 2. Водная толща и взаимодействие
1. Duguay C., Bernier M., Gauthier Y., Kouraev A. Remote sensing of lake and river ice. Remote Sensing of the Cryosphere. 2015: 273–306. doi: 10.1002/9781118368909.ch12
2. Mihajlov V.N. Ust'ja rek Rossii i sopredel'nykh stran: proshloe, nastoyashchee i budushchee. Estuaries of rivers in Russia and neighboring countries: past, present and future. Moscow: GEOS, 1997: 413 p. [In Russian].
3. Polonskij V.F., Lupachev Ju.V., Skriptunov N.A. Gidrologo-morfologicheskie processy v ust'jah rek i metody ikh rascheta (prognoza). Hydrological and morphological processes in river mouths and methods of their calculation (forecast). St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1992: 383 p. [In Russian].
4. Morse B., Burrrell B., Hilaire A., Bergeron N., Messier D., Quach T. River ice processes in tidal rivers: research needs. Proc. 10th Workshop on river Ice. 1999. CGU-HS CRIPE: 388–399.
5. Desplanque C., Bray D.I. Winter ice regime in the tidal estuaries of the northeastern portion of the Bay of Fundy, New Brunswick. Canadian Journ. of Civil Engineering. 1986, 13 (2): 130–139. doi: 10.1139/186-021.
6. River ice formation. Ed. Beltaos S. Edmonton: CRIPE-CGU, 2013: 553 p.
7. Donchenko R.V. Ledovyj rezhim rek SSSR. Ice regime of the rivers of the USSR. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1987: 247 p. [In Russian].
8. Gorin S.L., Romanenko F.A., Koval' M.V. First information about the winter hydrological regime and ice cover in the Hyper tidal mouth of the Penzhina river. Trudy V Sserossijskoj konferencii «Ledovye i termicheskie processy na vodnyh ob'ektah Rossii». Proc. of the V all-Russian conf. «Ice and thermal processes on water bodies of Russia». Moscow, 2016: 88–95. [In Russian].
9. Gidrometeorologija i gidrohimija morej SSSR. T. II. Beloe more. Vyp. 1. Gidrometeorologicheskie uslovija. Hydro-meteorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Is. 1. Hydrometeorological conditions. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1991: 240 p. [In Russian].
10. Demidenko N.A. The hydrological regime of the Mezen Bay and the Mezen and Kuloiestuaries. Sistema Belogo morja. T. 2. Vodnaja tolshcha i vzaimodejstvujushchie s nej atmosfera, kriosfera, rechnoj stok i biosfera. White sea System. V. 2.

- ющие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. М.: Научный мир, 2012. С. 411–432.
11. Электронный ресурс: <https://adormezen.ru>. АО «Мезенское дорожное управление».
12. Демиденко Н.А. Современные особенности гидрологического режима устьевых областей рек бассейна Белого моря // Меняющийся климат и социально-экономический потенциал Российской Арктики. 2016. Т. 2. С. 95–145.
13. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. М.: изд. Росгидромета, 2020. 97 с.
14. Римский-Корсаков Н.А., Коротаев В.Н., Иванов В.В., Пронин А.А., Демиденко Н.А. Гидрологический режим и литодинамические процессы в эстуарии Мезени // Океанология. 2018. Т. 58. № 4. С. 640–648.
15. Демиденко Н.А., Землянов И.В., Горелиц О.В., Михайлов В.Н. Исследование гидролого-морфологических процессов в устьевой области реки Мезень для целей проектирования Мезенской приливной электростанции // Тр. ГОИН. 2008. Вып. 211. С. 273–288.
16. Mermoz St., Allain-Bailhance S., Bernier M., Pottier E., Van Der Sanden J., Chokmani K. Retrieval of river ice thickness from C-band PolSAR Data // IEEE Transaction on geoscience and remote sensing. 2014. V. 52. № 6. P. 3052–3062.
17. Lindenschmidt K., Li Zh. Radar scatter decomposition to differentiate between running ice accumulations and intact ice covers long rivers // Remote Sensing. 2019. V. 11. P. 307–321.
18. Chu T., Lindenschmidt K. Integration of space-borne and air-borne data in monitoring river ice processes in the Slave River, Canada // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 181. P. 65–81.
19. Los H., Osinska-Skotak K., Pluto-Kossakowska J., Bernier M., Gauthier Y., Jasek M., Roth A. Comparison of C-band and X-band polarimetric SAR data for river ice classification on the Peace river // The Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. Prague. 2016. V. XLI-B7. P. 543–548.
20. Шелутко В.А. Численные методы в гидрологии. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 238 с.
21. Агафонова С.А., Михайлюкова П.Г., Фролова Н.Л., Демиденко Н.А. Зимний режим устьевых участков Мезени и Кулоя по данным космических снимков // Тр. III Всерос. конф. «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». СПб.: Химиздат, 2019. С. 47–50.
22. Колий В.М., Агафонова С.А. Ледовый режим устьевых участков рр. Онега, Мезень и Кулой по данным космических снимков // Четвертые виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению. СПб.: ВВМ, 2020. С. 1086–1091.
23. Шаталина И.Н., Трегуб Г.А. Ледовые проблемы строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений. СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2013. 452 с.
- Water column and interacting atmosphere, cryosphere, river flow and biosphere. Moscow: Naychni mir, 2012: 411–432. [In Russian].
11. <https://adormezen.ru>. Mezen road administration JSC. [In Russian].
12. Demidenko N.A. Modern features of the hydrological regime of estuaries of rivers in the White sea basin. *Menjajushchij klimat i social'no-ekonomicheskij potencial Rossijskoj Arktiki*. Changing climate and socio-economic potential of the Russian Arctic. 2016, 2: 95–145. [In Russian].
13. *Doklad ob osobennostjah klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2019 god*. Report on the peculiarities of the climate on the territory of the Russian Federation for 2019. Moscow: Roshydromet, 2020: 97 p. [In Russian].
14. Rimskij-Korsakov N.A., Korotaev V.N., Ivanov V.V., Pronin A.A., Demidenko N.A. Hydrological and lithodynamic processes in the estuaries of the Mezen. *Okeanologija*. Oceanology. 2018, 58 (4): 640–648. [In Russian].
15. Demidenko N.A., Zemljanov I.V., Gorelic O.V., Mihajlov V.N. Study of hydrological and morphological processes in the estuary area of the Mezenriver for the design of the Mezen tidal power station. *Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta*. Proc. of the State Oceanographic Institute. 2008, 211: 273–288. [In Russian].
16. Mermoz St., Allain-Bailhance S., Bernier M., Pottier E., Van Der Sanden J., Chokmani K. Retrieval of river ice thickness from C-band PolSAR Data. *IEEE Transaction on geoscience and remote sensing*. 2014, 52 (6): 3052–3062. doi: 10.1109/IGARSS.2012.6350734.
17. Lindenschmidt K., Li Zh. Radar scatter decomposition to differentiate between running ice accumulations and intact ice covers long rivers. *Remote Sensing*. 2019, 11: 307–321. doi: 10.3390/rs11030307.
18. Chu T., Lindenschmidt K. Integration of space-borne and air-borne data in monitoring river ice processes in the Slave River, Canada. *Remote Sensing of Environment*. 2016, 181: 65–81. doi: 10.1016/j.rse.2016.03.041.
19. Los H., Osinska-Skotak K., Pluto-Kossakowska J., Bernier M., Gauthier Y., Jasek M., Roth A. Comparison of C-band and X-band polarimetric SAR data for river ice classification on the Peace river. *The Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*. 2016, XLI-B7: 543–548. doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B7-543-2016.
20. Shelutko V.A. *Chislennyye metody v gidrologii*. Numerical methods in hydrology. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1991: 238 p. [In Russian].
21. Agafonova S.A., Mihajlukova P.G., Frolova N.L., Demidenko N.A. Winter regime of the estuaries of the Mezen and the Kuloy according to satellite images. *Trudy III Vserossijskoj konf. Gidrometeorologija i jekologija: dostizhenija i perspektivy razvitija*. Proc. of the III All-Russian Conf. Hydrometeorology and Ecology: achievements and prospects of development. St. Petersburg: Khimizdat, 2019: 47–50. [In Russian].
22. Kolij V.M., Agafonova S.A. The ice regime of the estuaries the Onega, the Mezen and the Kuloy rivers according to satellite images. *Chetvertye vinogradovskie chtenija. Gidrologija ot poznanija k mirovozzreniju*. Fourth Vinogradov readings. Hydrology from the knowledge to the world. St. Petersburg: VVM, 2020: 1086–1091. [In Russian].
23. Shatalina I.N., Tregub G.A. *Ledovye problemy stroitel'stva i jekspluatacii gidrotehnicheskikh sooruzhenij*. Ice problems of construction and operation of hydraulic structures. St. Petersburg: JSC «Vedeneev VNIIG», 2013: 452 p. [In Russian].