Использование спутниковых данных для определения влияния приливов на вынос р. Мезени в Мезенский залив Белого моря

О. Ю. Лаврова[1], А. А. Зеленкова[2], Я. О. Алферьева[3], М. В. Врублевский[1], Т. Ю. Бочарова[1]

[1] *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: olavrova@cosmos.ru

[2] *Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» Москва, 123242, Россия*

[3] *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова Москва, 119991, Россия*
E-mail: yanaalf@bk.ru

Рассматривается вопрос о возможности использования спутниковых данных для определения влияния приливных движений на вынос р. Мезени в Мезенский зал. Белого моря. В исследуемом районе наблюдаются высокие приливы, величина которых может достигать 9 м. Были использованы данные оптического диапазона, получаемые сенсорами MSI (*англ.* Multispectral Instrument), установленными на спутниках серии Sentinel-2, и сенсорами OLI (*англ.* Operational Land Imager) спутников Landsat-8/-9 за апрель – октябрь 2020–2025 гг. В качестве радиолокационных данных применялись изображения C-SAR (*англ.* C-band Synthetic Aperture Radar) спутников серии Sentinel-1 за 2020, 2021 и 2025 гг. Комплексный анализ спутниковой информации совместно с данными о приливах, ветровой ситуации и расходе воды в реке показал, что карты мутности, построенные на основе оптических данных высокого пространственного разрешения, позволяют с большой вероятностью определять влияние приливов на вынос р. Мезени. При полном отливе мутные воды реки выносятся на несколько километров в залив, образуя плюм площадью более 50 км^2. При полном приливе вынос практически не наблюдается, морские воды могут проникать в русло реки на расстояние до 60 км и «блокировать» вынос. Рассмотрено проявление на спутниковых изображениях формирования выноса через 1, 3, 6 ч после полного прилива. Показано, что ветер не оказывает влияние на направление распространения выноса, тогда как повышение расхода воды в половодье существенно меняет поведение выноса даже во время полного прилива. Использование радиолокационных изображений для данной задачи носит ограниченных характер. Их применение полезно для определения районов осушек и обнажений дна во время отлива, а также в период становления ледяного покрова, когда молодой лёд можно считать трассером, позволяющим выявлять вынос во время отлива. Несмотря на то, что в данном районе неоднократно осуществлялись гидрологические изыскания в связи с планируемым строительством приливной электростанции, спутниковый мониторинг устья р. Мезени ранее никем не проводился.

Ключевые слова: спутниковое дистанционное зондирование, морская поверхность, спутниковая радиолокация, оптические данные, р. Мезень, выносы рек, плюм распреснённых вод, мутность воды, фазы прилива, Белое море

Одобрена к печати: 12.10.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-382-400

Введение

Загрязнение прибрежных вод — глобальная проблема, обусловленная рядом факторов (Beusen et al., 2022; Kroeze et al., 2013; Strokal et al., 2021). Одной из основных причин загрязнения считается речной сток, поступающий в море. Он играет важнейшую роль в физических, химических и биологических процессах в шельфовых зонах, являясь главным источником поступающих в море взвешенных и растворённых терригенных и биогенных веществ, а также антропогенных загрязнений. Реки переносят загрязняющие вещества в прибрежные воды, ухудшая их качество (Howarth et al., 2002). Примерами множественных загрязни-

телей оказываются питательные вещества (Li et al., 2022; Mayorga et al., 2010), пластик (Avio et al., 2017; Jambek et al., 2015; Mai et al., 2020; Meijer et al., 2021; van Emmerik, Schwarz, 2020), а также химические вещества (van Wijnen et al., 2018), попадающие в прибрежные воды.

Исследование процессов распространения речной воды в море привлекает большое внимание во всём мире. Основные теоретические результаты представлены в классических работах Р. У. Гарвина и Дж. Д. Монка (Garvine, Monk, 1974) и др. (McClimans, 1988; O'Donnell, 1993). По мере того как континентальные воды поступают из реки в море, они образуют мезомасштабные структуры, прилегающие к устью реки, которые характеризуются более низкой солёностью и температурой, отличающейся от температуры окружающей воды, а также, как правило, повышенной мутностью и высоким содержанием взвешенных частиц и растворенного органического вещества. Такие зоны смешивания речных и морских вод обычно называют речными плюмами (Garvine, Monk 1974). Для описания речных плюмов использовалось большое количество различных терминов, таких как «выносы», «вытоки», «речной сток», «факелы», «зоны распреснения», «линзы распреснённой воды», «речные плюмы» и т.д. (Завьялов и др., 2014; Milliman, Farnsworth, 2011).

Одна из важных проблем при изучении речных выносов — определение их пространственных границ. Как правило, эта граница устанавливается фиксированным значением солёности, если соответствующая изогалина расположена в области резкого градиента. Однако внешнее воздействие на шлейф (волны, ветер, прибрежные течения) приводит к размыванию границ и формированию сложной, пространственно-неоднородной внутренней структуры шлейфа. На эволюцию выноса влияет большое количество факторов, включая прибрежные течения, ветро-волновое воздействие, батиметрию дна, интенсивность и объём речного стока, приливные колебания и другие процессы (Baldoni et al., 2022; Lin et al., 2022). Настоящая статья рассматривает влияние в первую очередь приливных колебаний на выносы рек. В качестве объекта исследования выбрана р. Мезень.

Первые исследования гидрологического режима устья р. Мезени были выполнены ещё в 1914–1915 гг. при проведении портовых изысканий (Вихман, 1925). При советской власти портовые изыскания в устье Мезени были продолжены в 1928–1931 гг. Севпортизом (Протопопов, 1932). В связи с проектированием в устьях Мезени и Кулоя и в Мезенском зал. приливной электростанции (ПЭС) в 1958–1961 гг. значительные инженерные изыскания выполнило Ленинградское отделение Гидроэнергопроекта. Эти работы периодически производились Ленгидропроектом в 1977–1978 гг. и 1988 г. (Горелков и др., 1981). В 1960-е гг. Институт океанологии им. П. П. Ширшова АН СССР провёл исследования геологического и геоморфологического строения дна и берегов Мезенского зал. и эстуариев Мезени и Кулоя, а также мощности, состава и происхождения рыхлых отложений в створах расположения будущей Мезенской ПЭС (Медведев, 1971; Невесский и др., 1977).

Регулярные наблюдения за гидрологическим и ледовым режимом эстуария Мезени проводились усилиями гидрометеорологического поста в дер. Сёмжа с 1931 по 1944 г. и в 1962–1977 гг. В дальнейшем до начала 1990-х гг. в устьях р. Мезени и Кулой работали экспедиции Северного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Государственного океанографического института имени Н. Н. Зубова (ГОИН) и Института водных проблем АН СССР (Демиденко, 1991; Полонский и др., 1992; Седелков, 1970). В связи с возрождением интереса к проектированию Мезенской ПЭС в 2005–2009 гг. сотрудниками ГОИН и МГУ им. М. В. Ломоносова были проведены инженерно-гидрологические изыскания в устьях рек Мезенского зал. (Демиденко и др., 2008). В 2015 – 2020-х гг. изучались трансформация приливных уровней и расходов воды, пространственно-временной изменчивости концентрации взвешенного вещества, исследования подводного рельефа и донных наносов (Римский-Корсаков и др., 2018).

Наиболее полный и подробный отчёт о современном гидрологическом режиме устьевых областей р. Мезени и Кулой на основе сетевых наблюдений Гидрометеослужбы и экспедиционных исследований, которые были проведены в 2005–2019 гг., представлен в работе участника всех экспедиций Н. А. Демиденко (Демиденко, 2022). Спутниковый мониторинг данного района ранее никем не проводился. Поскольку район эстуария р. Мезени трудно-

доступен, выполнение регулярных работ сильно затруднено в силу экономических и прочих причин. Для получения регулярных данных о состоянии гидрологических процессов в районе выноса р. Мезени необходимо использовать результаты дистанционного зондирования из космоса. Настоящая статья посвящена изучению возможностей спутникового зондирования в разных диапазонах электромагнитного спектра для определения влияния различных факторов на вынос р. Мезени.

Район исследования

Район исследования представляет собой устьевую зону р. Мезени (*рис. 1*). Река берёт своё начало из болот на западных склонах Тиманского кряжа (Республика Коми). Она протекает по территории Республики Коми и Архангельской обл. и впадает в Мезенский зал. северо-восточной части Белого моря. Заливы Белого моря часто называют губами.

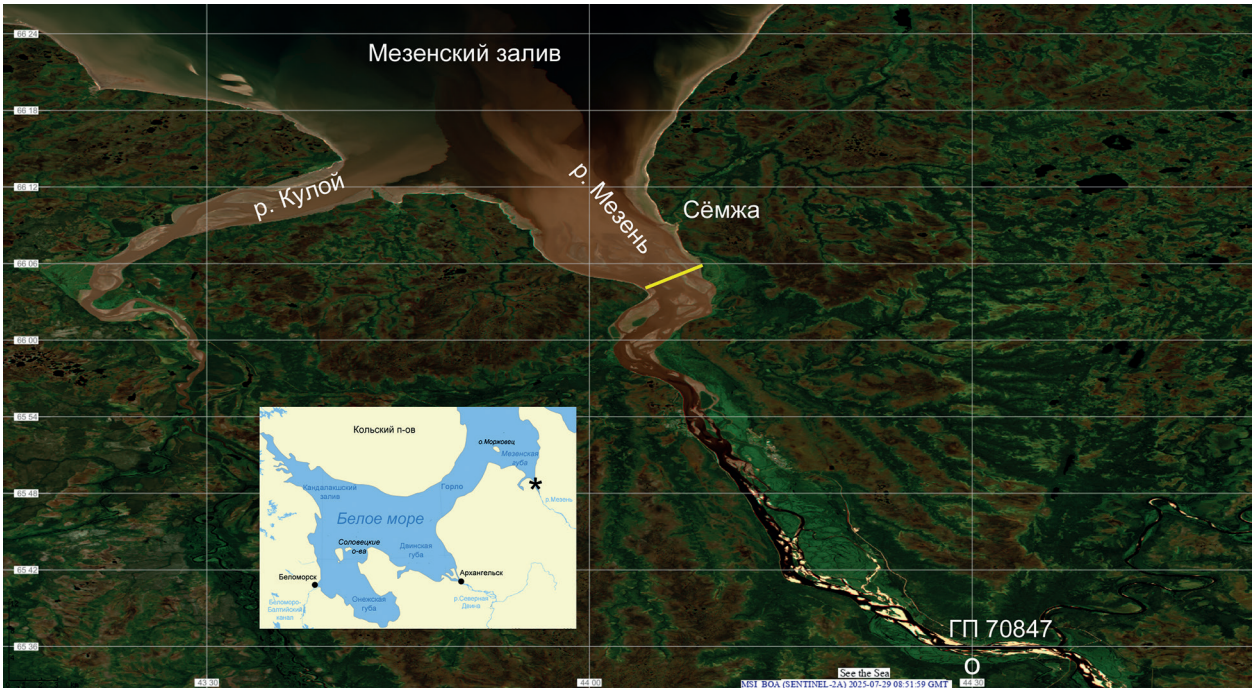


Рис. 1. Район исследования. Устьевые зоны р. Мезени и Кулой. Жёлтая линия — граница, от которой вниз по течению определялась площадь выноса. Символом «*» на вкладке обозначен район исследования

В нижнем течении русло изобилует мелями и перекатами. Устьевая область р. Мезени относится к эстуарному типу, т. е. имеет воронкообразное расширение в сторону моря. Исследовательский полигон охватывает всю акваторию, в пределах которой приливная волна, солёные морские воды, взвешенные наносы и ледовые образования оказывают системообразующее воздействие на гидрологический режим. В типичных эстуариях, имеющих эрозионное воронкообразное расширение в сторону моря и испытывающих сильное влияние реверсивных приливных течений (устья р. Мезени, Кулой, Онеги, Хатанги, Пенжины, Гижиги), основными гидрологическими факторами представляются сток речных вод, приливо-отливные колебания уровня, сгонно-нагонные явления, смешение пресных речных и солёных морских вод (Демиденко, 2022). Общая площадь водной поверхности р. Мезени в пределах устьевого створа, с учётом эстуария, составляет 195 км^2, а площадь поверхности эстуария в полную воду — около 162 км^2; ширина эстуария в устьевом створе достигает 9 км и уменьшается к вершине до 1,35 км (Демиденко, 2022). Эти параметры позволяют отнести

район к числу наиболее крупных и динамичных приливных устьевых систем европейского севера России. Наиболее ярко выражены в Мезенском зал. приливные полусуточные колебания уровня. Максимальная величина полусуточных приливов возрастает в Мезенском зал. с севера на юг в сторону эстуариев р. Мезени и Кулой с 6,8 до 9,8 м. По мере продвижения приливной волны к вершине мелководного залива она трансформируется. Время роста уровня быстро уменьшается по сравнению со временем падения уровней воды. В районе устья р. Сёмжи это различие составляет уже почти 2 ч (Демиденко, 2022).

Мелководность, значительная площадь осушки и стеснённые морфологические условия способствуют резкой трансформации приливной волны, развитию интенсивных реверсивных течений, формированию зон повышенной мутности и активному перераспределению осадочного материала. Средняя мутность воды в вершине устьевого участка Мезени составляет 30 г/м^3, а в половодье мутность увеличивается до 100 г/м^3. Сизигийный прилив в районе уровнемерной станции у дер. Сёмжи достигает 9 и 5 м в квадратуру. Продолжительность подъёма уровня воды равна 5 ч, падения уровня воды — 7,4 ч. Устье Мезени используется для морского и речного судоходства, а также для рыбного промысла местного значения (Демиденко, 2022).

Данные и методы

Основой исследования влияния приливных течений на вынос р. Мезени выступали данные спутникового дистанционного зондирования Земли, полученные в оптическом и радиодиапазонах. Оптические данные включали в себя данные сенсоров OLI/OLI-2 (*англ.* Operational Land Imager) Landsat-8/Landsat-9 и MSI (*англ.* Multispectral Instrument) Sentinel-2A, -2B, -2C. Для анализа использовались данные за апрель – ноябрь 2020–2025 гг. с облачным покрытием не более 30 %. Всего было проанализировано 697 изображений, из которых информативными и пригодными для дальнейшего применения оказались 144. Объём оптических спутниковых данных, полученных с разницей в 30–40 мин. по сравнению с временем полных и малых вод (согласно таблицам приливов), составил 29 изображений (*рис. 2*). На основе всех информативных оптических данных строились цветосинтезированные изображения в псевдоестественных цветах, а также карты мутности по алгоритму Dogliotti (Dogliotti et al., 2015).

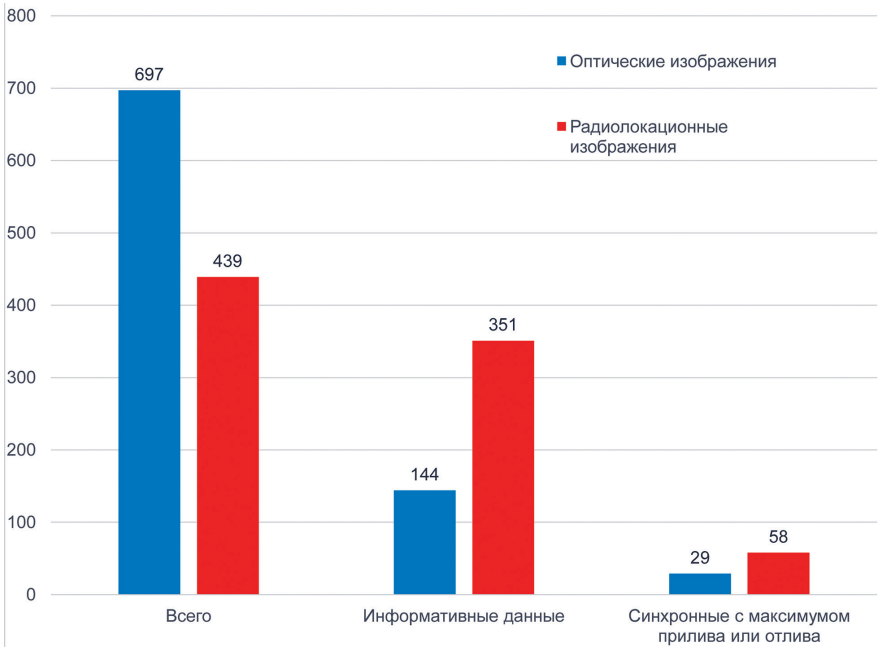


Рис. 2. Количество спутниковых изображений, используемых в исследовании влияния приливов на вынос р. Мезени

Поскольку воды р. Мезени имеют характерный коричневый цвет из-за повышенного содержания гумусовых соединений и окислов железа, они чётко проявляются на изображениях видимого диапазона. Повышенное содержание взвешенных наносов, которое отражается на картах мутности, даёт возможность определять зоны выноса в различные стадии приливно-отливных колебаний.

Для выявления закономерностей влияния приливных процессов использовался сравнительный метод, основанный на классификации наблюдений по фазам приливного цикла: полные и малые воды, фаза прилива (подъём уровня воды), фаза отлива (снижение уровня), т. е. был проведён анализ данных, полученных через 1, 3 и 6 ч после фактического времени прилива (полной воды). Дополнительно учитывалось направление ветра как фактор, способный модифицировать пространственную структуру выносов, особенно в условиях открытой акватории Мезенского зал. Поскольку зона повышенной мутности распространяется по всему эстуарию, то для определения площади выноса была отмечена граница, от которой вниз по течению определялась площадь выноса. Данная граница показана на *рис. 1* жёлтой линией.

Радиолокационные данные были получены сенсорами C-SAR (*англ.* C-band Synthetic Aperture Radar) со спутников Sentinel-1A, -1B, -1C. Радиолокационная съёмка этого района проводилась Европейским космическим агентством (*англ.* European Space Agency) в основном в режиме EW (*англ.* Extra-Wide Swath) с разрешением 20 м на соосной горизонтальной и перекрёстной горизонтальной/вертикальной поляризациях. Примерно седьмая часть всех радиолокационных данных была получена в режиме IW (*англ.* Interferometric Wide Swath) с разрешением 10 м на соосной вертикальной и перекрёстной вертикальной/горизонтальной поляризациях. Радиолокационная съёмка исследуемого района не проводилась в 2022–2024 гг.

Всего проанализировано 439 радиолокационных изображений (РЛИ) за 2000, 2021 и 2025 гг., из них информативных было 351. Наиболее подходящими для анализа оказались 60 РЛИ с вертикальной поляризацией. Для исследования возможности использования РЛИ с целью определения влияния приливных колебаний на вынос р. Мезени были отобраны данные, полученные в близкие моменты времени (с разницей в 30–40 мин.) с полными и малыми водами. Таких изображений за три года набралось только 58. Подбор и анализ спутниковых данных проводился в информационной системе STS (*англ.* See the Sea) (http://ocean.smislab.ru/), предназначенной для изучения процессов и явлений на поверхности океана (Лаврова и др., 2019).

Для анализа приливных условий в районе устья р. Мезени были использованы данные пункта наблюдений Сёмжа, который является ближайшим доступным пунктом наблюдений с минимальным удалением от устьевой области р. Мезени. Расчётные данные приливов для данного пункта представлены в виде таблиц времени (UTC+3 (*англ.* Coordinated Universal Time)) и высот полных и малых вод за период с 2020 по 2025 г. Эти данные были предоставлены для научных целей ГОИН. Положение пункта наблюдений Сёмжа представлено на *рис. 1.*

Архив среднесуточных уровней и расходов воды Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) (https://gmvo.skniivh.ru/) за период с 2008 по 2023 г. для гидропостов (ГП) № 70844 (р. Мезень, дер. Малонисогорская; 65,00° с. ш., 45,610° в. д.) и 70847 (р. Мезень, с. Дорогорское; 65,58° с. ш., 44,51° в. д.), а также их координаты получены из спутниковой информационной системы «Вега-Гидро» (http://hydro.geosmis.ru/). Система ориентирована на обеспечение работы с данными спутникового мониторинга, результатами их обработки и другими тематическими данными для решения научных задач в области исследования гидрологии суши (Врублевский и др., 2026). Одним из основных параметров, влияющих на распространение речных выносов в море, можно считать расход воды. Обычно в таких задачах расход воды определяется на ближайшем к устью ГП. Ближайший ГП к устью — ГП № 70847 — находится на расстоянии 80 км от устья. Гидропост № 70847 является уровенным (ведутся измерения только уровня воды). Следующий ГП — ГП № 70844 — с измерением расходов воды (ведутся измерения как уровня, так и расхода воды) достаточно удалён от устья (186 км от устья).

С целью оценки возможности характеризовать влияние расхода воды, измеренного на ГП № 70844, на выносы из реки был проведён следующий анализ. Выявлена корреляционная связь уровня и расхода воды на ГП № 70844 для оценки того, насколько установленный на том же ГП уровень воды позволяет характеризовать расход. Чтобы оценить, насколько уровень воды, измеренный на ближайшем к устью ГП № 70847, может качественно характеризовать расход, была определена корреляционная связь уровней воды на ГП № 70844 и 70847, с учётом времени добегания, т. е. задержкой по времени между наступлением характерных фаз уровенного режима между створом реки, расположенным выше и ниже по течению. Время добегания определялось в сутках при максимизации коэффициента корреляции между временными рядами, смещёнными друг относительно друга на шаг по времени, равный целым суткам.

Для исследования влияния ветровой ситуации на распространение выноса р. Мезени использованы данные реанализа приземного ветра, разработанного Национальным центром экологического прогнозирования (*англ.* National Centers for Environmental Prediction — NCEP) в составе Национального управления океанических и атмосферных исследований США (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration — NOAA). В настоящей работе данные о ветре были использованы через программный комплекс See the Sea, в который интегрированы глобальные поля реанализа NCEP. Программа обеспечивает доступ к временным рядам метеорологических параметров и их пространственной визуализации.

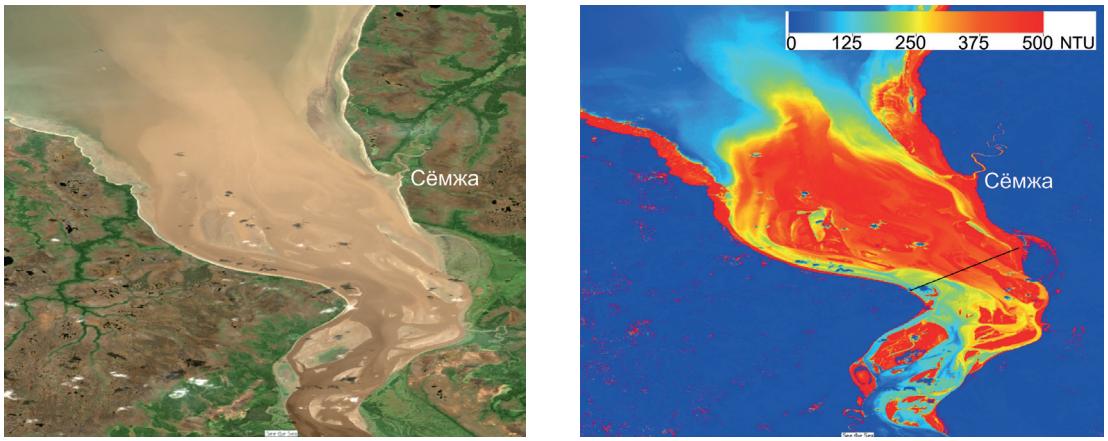
Результаты

Результат использования оптических данных для определения влияния фазы прилива на вынос р. Мезени

На основе анализа сформированной базы спутниковых оптических данных за период апрель – ноябрь 2020–2025 гг. были получены следующие результаты. Было установлено, что карты мутности воды позволяют с большой вероятностью определить фазы прилива, особенно в моменты близкие ко времени полных и малых вод, согласно таблицам приливов. В период отлива воды с повышенной мутностью распространяются по Мезенскому зал., образуя плюм размером более 100 км^2. Максимум площади пришёлся на 4 сентября 2023 г., она составила 150 км^2. За этот день было получено два изображения MSI Sentinel-2B в 09:02 UTC и OLI-2 Landsat-9 в 08:38. Малые воды (полный отлив) высотой 0,6 м были зафиксированы в 08:34 UTC. Максимальная мутность воды в этот день, согласно алгоритму Dogliotti (Dogliotti et al., 2015), внедрённому в STS, составила 771 NTU (*англ.* Nephelometric Turbidity Units, единица мутности).

Особенностью эстуария р. Мезени считается широкое развитие приливных осушек. Из-за значительной амплитуды приливов осушки могут занимать большие площади, периодически оголяясь и вновь затапливаясь. Обнажение дна во время отливов влияет на перераспределение вещества. При стекании воды с осушек в фазу отлива формируются мутьевые потоки, обогащённые взвешенными частицами и растворёнными компонентами (Мискевич, 2019). Примером проявления подобных осушек и мутных потоков может служить изображение MSI Sentinel-2A, полученное 27 августа 2021 г. во время малой воды, высота которой составляла 1,3 м (*рис. 3а*, *б*). Максимальное значение мутности в районе выноса, определённое по алгоритму Dogliotti, было равно 928 NTU, а площадь выноса, вычисленная от условной границы (отмечена чёрной линией на *рис. 3б*), — порядка 170 км^2.

В период полной воды (максимум прилива) морская вода распространяется вверх по течению реки вплоть до 65 км. Соответственно площадь выноса падает практически до 0 (при выбранной границе), и мутность в реке резко уменьшается. Примером такой ситуации может служить представленное на *рис. 4* изображение OLI Landsat-8, полученное 6 июля 2021 г. в момент максимального прилива (полных вод).



а *б*

Рис. 3. Пример проявлений осушек и мутных потоков во время полного отлива (малых вод). Фрагменты изображения MSI Sentinel-2A от 27 августа 2021 г.: *а* — цветосинтезированное изображение в псевдоестественных цветах; *б* — карта мутности, построенная с использованием алгоритма Dogliotti. Чёрная линия — граница, от которой вниз по течению определялась площадь выноса

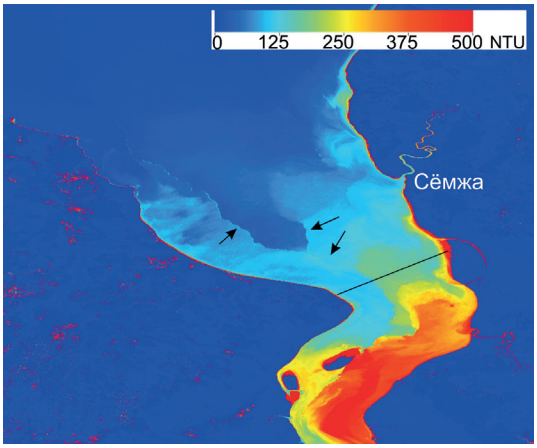
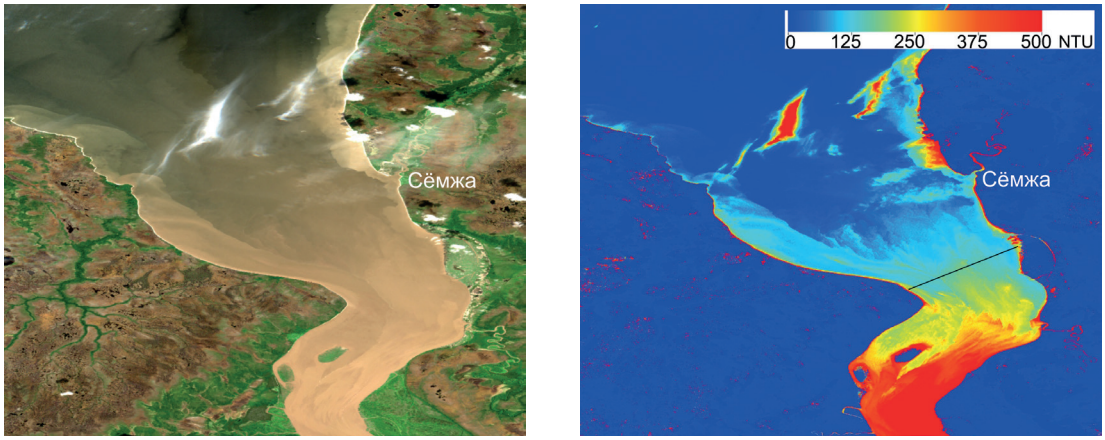
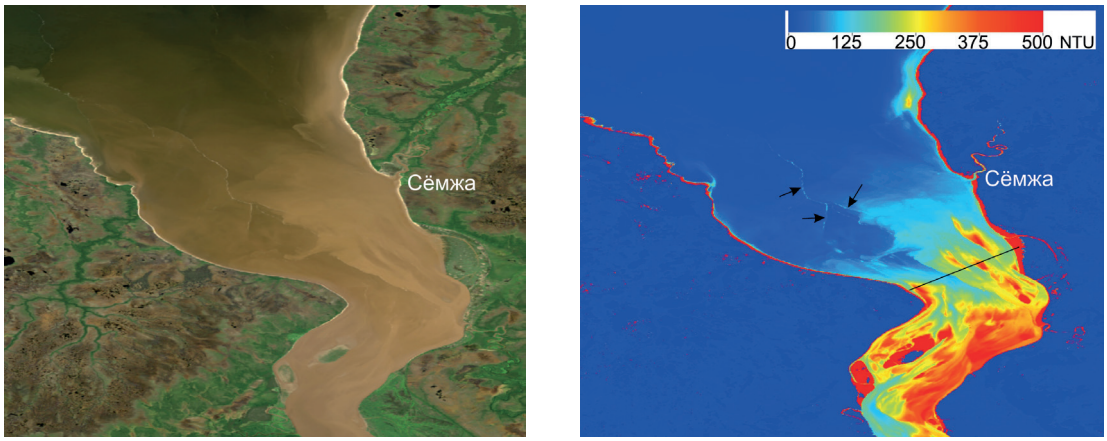


Рис. 4. Пример влияния полного прилива на вынос р. Мезени. Карта мутности воды, построенная на основе изображения OLI Landsat-8 от 6 июля 2021 г. с использованием алгоритма Dogliotti. Стрелки указывают на сулои, находящиеся на границах смешения морских и речных вод. Чёрная линия — граница, от которой вниз по течению определялась площадь выноса



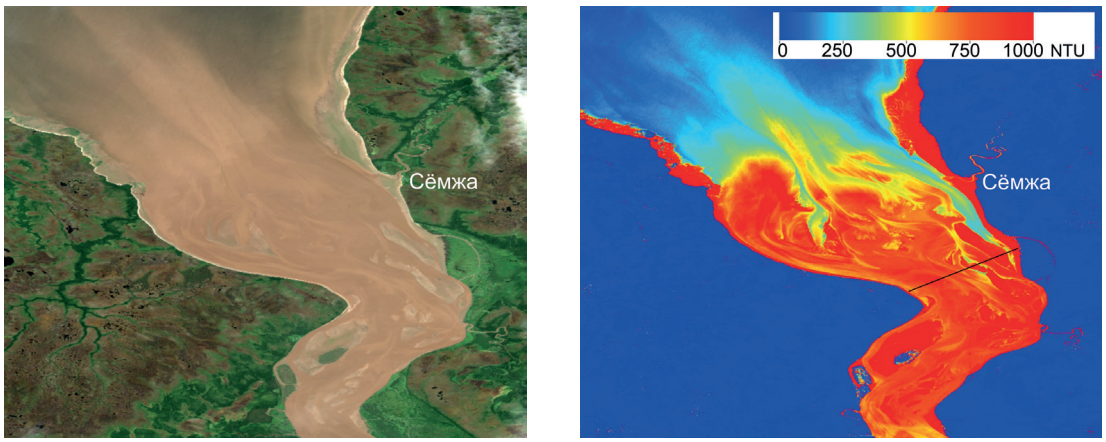
а *б*

Рис. 5. Пример выноса р. Мезени через 1 ч после полного прилива. Фрагменты изображений MSI Sentinel-2A от 1 июля 2023 г.: *а* — цветосинтезированное изображение в псевдоестественных цветах; *б* — карта мутности, построенная с использованием алгоритма Dogliotti. Чёрная линия — граница, от которой вниз по течению определялась площадь выноса



а *б*

Рис. 6. Пример выноса р. Мезени через 3 ч после полного прилива. Фрагменты изображений OLI Landsat-8 от 23 июня 2022 г.: *а* — цветосинтезированное изображение в псевдоестественных цветах; *б* — карта мутности, построенная с использованием алгоритма Dogliotti. Стрелки указывают на сулои, находящиеся на границах смешения морских и речных вод. Чёрная линия — граница, от которой вниз по течению определялась площадь выноса



а *б*

Рис. 7. Пример выноса р. Мезени через 6 ч после полного прилива. Фрагменты изображений MSI Sentinel-2B от 27 июля 2024 г.: *а* — цветосинтезированное изображение в псевдоестественных цветах; *б* — карта мутности, построенная с использованием алгоритма Dogliotti. Чёрная линия — граница, от которой вниз по течению определялась площадь выноса

Согласно таблицам приливов максимальная фаза прилива, который был высотой 7,9 м, наблюдался в 08:01 UTC, а время спутникового изображения 08:26 UTC. Исходя из карты мутности, построенной с помощью алгоритма Dogliotti, можно сделать вывод, что ниже по течению от условной границы, от которой считалась площадь выноса, вынос практически не наблюдается, мутность в нём не превышала 100 NTU, в то время как выше по течению она достигала 450 NTU. В то же время хорошо виден заток морских вод (синий цвет) и белые линии (сулои, отмеченные стрелками), находящиеся на границах смешения морских и речных вод.

На *рис. 5–7* приведены примеры проявлений выноса р. Мезени в разные фазы прилива, через 1, 3 и 6 ч после полного прилива, хотя деление на эти промежутки времени условное, поскольку спутниковые изображения могли быть получены и через 1–2 или 5–7 ч.

На *рис. 5а*, *б* представлено спутниковое изображение MSI Sentinel-2A от 1 июля 2023 г., 09:02 UTC, полученное примерно через 1 ч после полного прилива, который был в 08:16 UTC, и высота его составила 8,2 м. Хорошо видно, что область повышенной мутности находится ещё выше по течению от условной линии, от которой считалась площадь выноса, но мутные потоки уже устремляются к устью. Площадь выноса можно оценить в 30 км^2.

Для описания выноса через 3 ч после фактического времени прилива в качестве примера выбрано изображение OLI Landsat-8 от 23 июня 2022 г. (*рис. 6а*, *б*). Изображение получено в 08:26 UTC, а прилив с высотой 7,9 м был в 05:44 UTC. При данных условиях площадь выноса составила уже 50 км^2. Максимальная мутность в границах определённого выноса не превышала 400 NTU.

Примером проявления выноса через 6 ч после полного прилива может служить изображение, полученное MSI Sentinel-2B 27 июля 2024 г. (*рис. 7а*, *б*). Время съёмки 08:52 UTC, а время полного прилива высотой 8,9 м 02:33 UTC. Фактически наблюдается уже отлив, который наступил через час после получения спутникового изображения в 09:53 UTC, и его высота составляла 1,1 м. Поэтому не удивительно, что площадь выноса резко возросла до 300 км^2, а максимальная мутность до 900 NTU.

Анализ оптических спутниковых изображений показал, что в устьевой области р. Мезени наблюдается чётко выраженная зависимость площади выноса от фазы приливного цикла. В условиях, близких к моменту максимального прилива, площадь выноса минимальна. В этот период происходит накопление взвешенного материала в пределах эстуарной зоны, сопровождающееся относительно низкими значениями мутности.

Через 2–3 ч после прохождения приливного максимума, при переходе к фазе отлива, фиксируется существенное увеличение площади выноса. Максимальные значения площади выноса приурочены к середине фазы отлива или к переходным состояниям, когда происходит смена направления движения воды. В этих условиях формируются протяжённые и сложно структурированные выносы мутных вод, распространяющиеся в акваторию Мезенского зал. Высокие значения мутности, достигающие значительных величин, указывают на интенсивное перемешивание водных масс и вовлечение в поток как речного, так и морского осадочного материала.

Через 5–7 ч после прилива, при минимальном уровне воды, площадь выноса может как сохраняться на высоком уровне, так и снижаться в зависимости от конкретных гидрометеорологических условий. В ряде случаев наблюдается частичная стабилизация системы и снижение мутности, что связано с осаждением взвешенных частиц и ослаблением течений.

Влияние ветровой ситуации на направление распространения выноса

Для определения влияния ветровой ситуации на распространение выноса р. Мезени были выбраны спутниковые изображения при разных направлениях приводного ветра, полученные в условиях полного отлива, т. е., как было показано выше, когда вынос максимальный. В исследуемом районе в период с апреля по ноябрь в основном наблюдается юго-восточный и северо-восточный ветер (см. розу ветров, представленную на *рис. 8*). Как показал анализ изображений (*рис. 9*) зависимости направления распространения выноса от направления ветра не наблюдается.

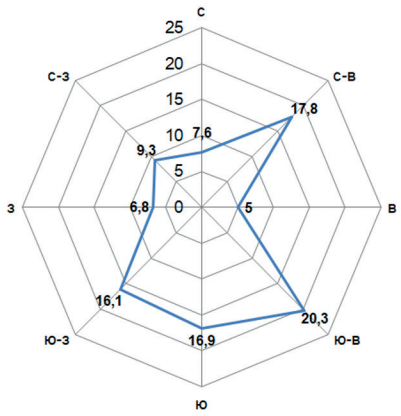


Рис. 8. Роза ветров в апреле – ноябре в 2020–2025 гг. над эстуарием р. Мезени

Это можно объяснить двумя причинами: узостью приустьевой зоны в Мезенском зал. и, главное, доминирующей ролью в формировании выносов приливной динамики.

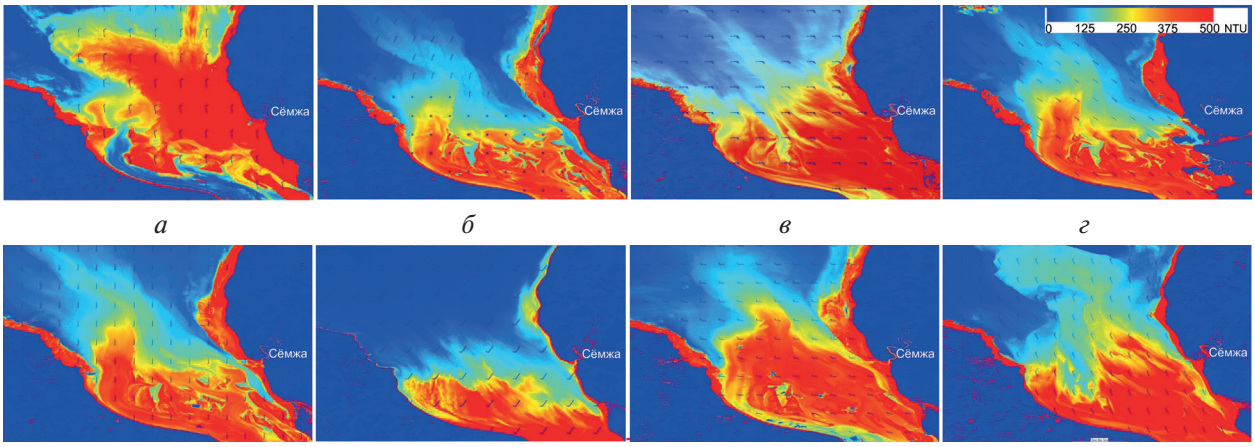


Рис. 9. Карты мутности выноса р. Мезени, полученные на основе спутниковых изображений оптического диапазона в период полного отлива при разных направлениях приводного ветра: *а* — северный; *б* — северо-восточный; *в* — восточный; *г* — юго-восточный; *д* — южный; *е* — юго-западный; *ж* — западный; *и* — северо-западный. Направление ветра показано синими стрелками

Влияние расхода воды в реке на характер выноса

Не менее важным фактором, влияющим на распространение пресных речных вод в морских акваториях, является расход воды. На *рис. 10* показано изменение уровня и расхода воды, измеренных на ГП № 70844, за апрель – октябрь 2020–2023 гг. (безлёдный период), а также их связь (коэффициент корреляции Пирсона составил 0,88).

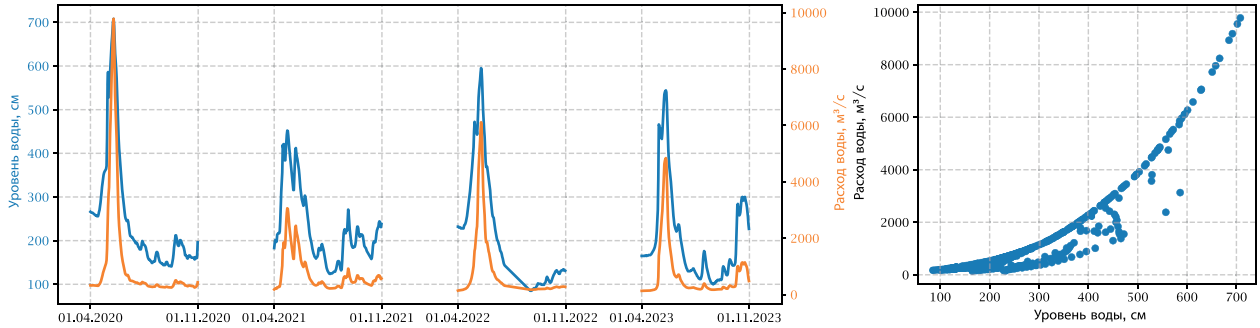


Рис. 10. Уровень и расход воды на ГП № 70844:
а — за апрель – ноябрь 2020–2023 гг., *б* — связь уровня и расхода воды

На *рис. 11* показаны уровни воды на ГП № 70844 и 70847. Время добегания между ними составляет 1 сут. С учётом времени добегания коэффициент корреляции Пирсона для рядов уровней воды, измеренных на этих ГП, равен 0,97, что указывает на наличие высокой связи уровня воды для соответствующих створов.

Коэффициент корреляции Пирсона рядов уровня воды на ГП № 78047 и расхода воды на ГП № 78044 с учётом времени добегания составил 0,91. На основе проведённого анализа можно предположить, что существующая высокая корреляционная связь рядов уровня воды на ближайшем к устью ГП № 78047 и расхода воды на ГП № 78044 позволяет качественно характеризовать расход р. Мезени по изменению уровня воды на ГП № 78047. Как показывает анализ данных гидропостов, максимальный расход в р. Мезени наблюдается в период весеннего половодья со второй декады мая до конца первой декады июня. Для определения влияния величины расхода воды на характер выноса были подобраны пары спутниковых изображений, полученные в период высокого прилива с разными значениями расхода воды.

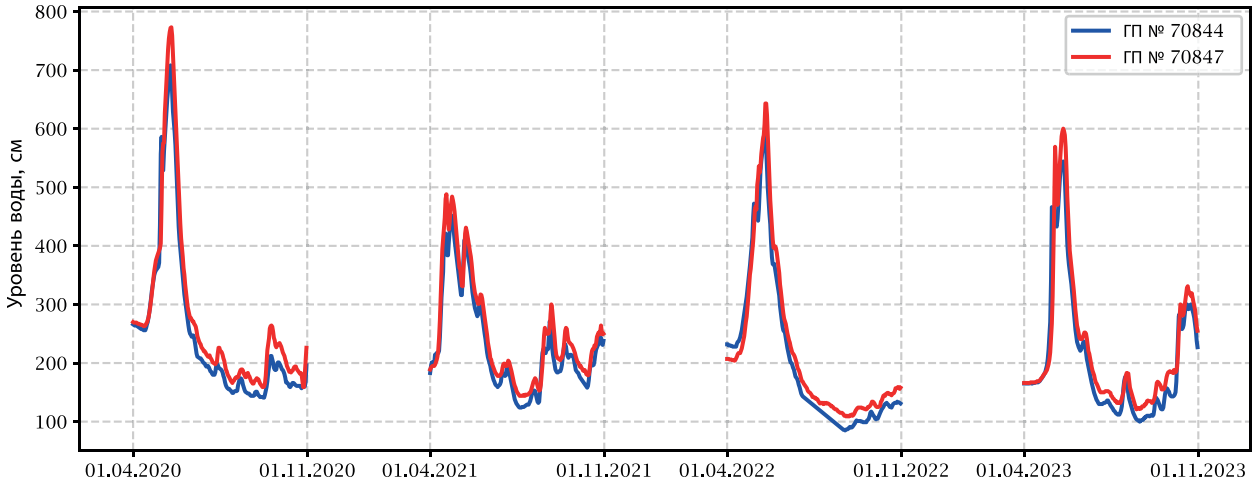


Рис. 11. Значения уровней воды на ГП № 70844 и 70847, приведённые к Балтийской системе высот

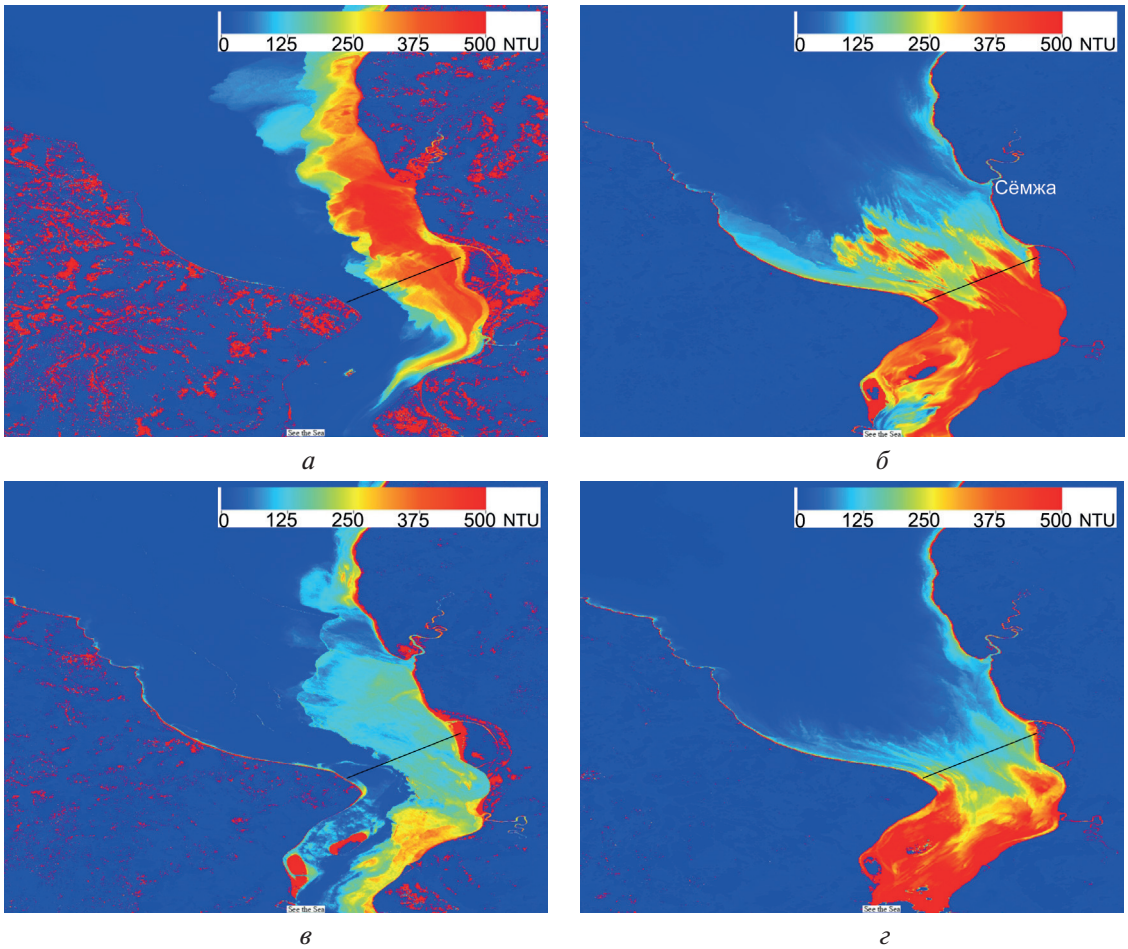


Рис. 12. Примеры влияния величины расхода воды в реке на вынос Мезени в период полного прилива: *а*, *в* — большая величина расхода в период половодья; *б*, *г* — в межень

К сожалению, на момент полного прилива в период максимального расхода воды (в мае) спутниковых изображений не оказалось, поэтому были рассмотрены случаи, когда расход воды ещё достаточно большой (первая половина июня), а для сравнения выбраны изображения, полученные в межень (июль, август). Влияние величины расхода воды чётко прослеживается. В период высоких значений расхода воды вынос р. Мезени во время полного прилива сосредоточен вдоль восточного (правого) берега и распространяется на расстояние более

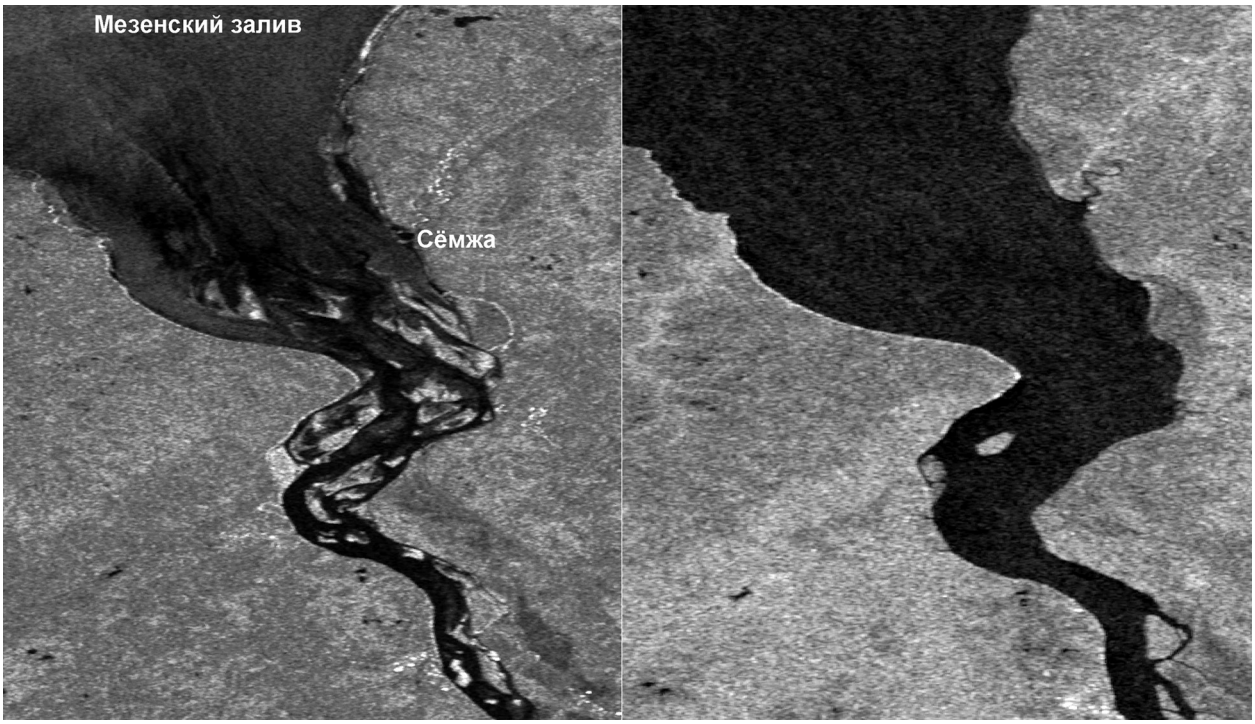
20 км от условной границы, от которой предложено считать вынос. В то время как в период межени также во время полного прилива вынос за границу практически не распространяется. Отметим, что все выводы сделаны на основе карт мутности, которые построены на основе оптических спутниковых данных. На *рис. 12* приведены примеры проявлений выноса в период полного прилива в половодье и в межень. На *рис. 12а* представлен фрагмент карты мутности, построенной по данным MSI Sentinel-2A от 3 июня 2020 г. в момент полного прилива высотой 8,7 м. По данным ГП расход воды составил в этот день 1280 м^3/с. Хорошо виден вынос мутных вод, распространяющийся вдоль правого берега. На изображении, представленном на *рис. 12б*, которое получено сенсором OLI спутника Landsat-8 19 июля 2020 г. также в период полного прилива высотой 8,3 м, но при расходе воды 401 м^3/с, вынос практически не выходит за условную границу.

Подобная ситуация наблюдалась и в последующие годы. На *рис. 12в* представлена такая же ситуация. На изображении MSI Sentinel-2B от 11 июня 2022 г. во время полного прилива высотой 7,9 м и при расходе воды 798 м^3/с вынос р. Мезени, как и в предыдущем случае, распространяется вдоль правого берега примерно на 20 км. А на изображении MSI Sentinel-2B от 24 августа 2022 г. в условиях полного прилива высотой 7,6 м и величине расхода воды всего 172 м^3/с вынос практически не наблюдается (см. *рис. 12г*). Анализ спутниковых изображений показывает, что значительное увеличение расхода воды в половодье, по сравнению с периодом межени, влияет на характер выноса реки. Даже в период полного прилива, когда обычно, как было показано выше, вынос практически не проявляется ниже по течению от условной границы во время межени, в период половодья наблюдается распространение мощной мутной струи выноса, который переносится на большое расстояние. Почему он приурочен к правому берегу, а не распространяется вдоль всей акватории устья, — не решённый в рамках данного исследования вопрос. Возможно, мощная приливная волна прижимает вынос к берегу. Но для ответа на это вопрос необходимо иметь больший набор данных.

Использование спутниковой радиолокации для выявления приливных процессов в эстуарии р. Мезени

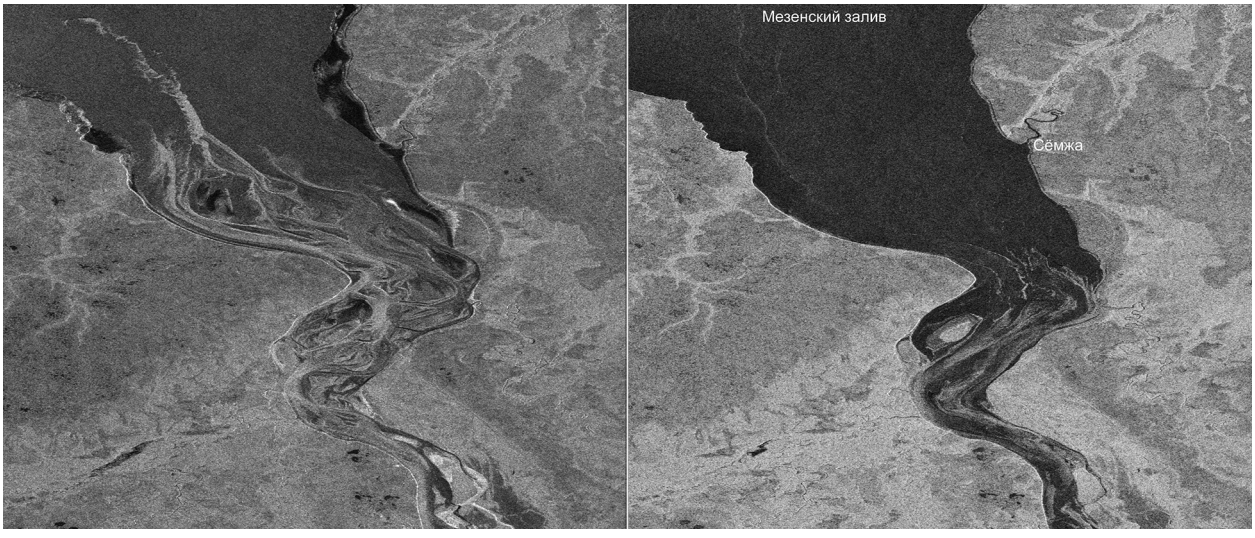
Несмотря на то, что информативных радиолокационных данных с точки зрения проявления самого эстуария р. Мезени существенно больше, чем оптических изображений (см. *рис. 2*), они не дают однозначную информацию о влиянии приливных движений на вынос реки. В отличие от оптических спутниковых данных, где трассерами считаются мутные воды, для радиолокационных данных в тёплый период года подходящих трассеров нет, кроме отдельных областей сулоя. Для многих рек, впадающих в моря с высокими приливами, на границах смешения речных и морских вод образуются фронтальные зоны конвергенции, которые на РЛИ проявляются в виде узких светлых искривлённых полос, соответствующих усилению интенсивности обратнорассеянного радиолокационного сигнала (Митягина, 2026). Подобная картина на РЛИ выноса р. Мезени в апреле – октябре не наблюдается. Какие же процессы можно выявить на РЛИ в этом районе, связанные с влиянием приливов? В первую очередь это области осушки и обнажения дна во время отлива. На *рис. 13а* представлено РЛИ, полученное с помощью C-SAR Sentinel-1A 6 сентября 2025 г. во время полного отлива. Многочисленные светлые пятна в русле реки соответствуют областям обнажения дна. Во время прилива РЛИ более-менее однородно, не считая интенсивного спекл-шума, присущего РЛИ, получаемым на горизонтальной поляризации (см. *рис. 13б*).

Другая возможность определить влияние стадии прилива на вынос реки появляется во время становления ледяного покрова. Лёд в данном случае представляется хорошим трассером, как это довольно часто наблюдается и для других рек (Князев, 2025; Лаврова и др., 2016). В период полного отлива молодой лёд выносится в Мезенский зал., аналогично тому, как выносятся мутные воды, наблюдаемые на оптических изображениях (*рис. 14а*). Во время полного прилива молодой лёд не выносится, а остаётся в примерно том же районе, где наблюдался вынос по данным оптической съёмки (см. *рис. 14б*).



а *б*

Рис. 13. Проявления эстуария р. Мезени на радиолокационных изображениях C-SAR Sentinel-1A (горизонтальная поляризация, разрешение 20 м) при разных стадиях прилива: *а* — фрагмент РЛИ от 6 сентября 2025 г., полученного во время полного отлива. Многочисленные белые пятна в русле реки — осушки или обнажения дна; *б* — фрагмент РЛИ от 17 июля 2025 г., полученного во время полного прилива высотой 8,5 м. Белые пятна — острова



а *б*

Рис. 14. Примеры влияния стадии прилива на ледяной покров: *а* — вынос льда в Мезенский залив во время отлива. Изображение C-SAR Sentinel-1B от 27 ноября 2020 г.; *б* — положение ледяного покрова во время полного прилива. Изображение C-SAR Sentinel-1C от 13 ноября 2025 г. Оба изображения получены на вертикальной поляризации с разрешением 10 м

Выводы

В силу того, что Мезенский зал. Белого моря представляет собой потенциальное место размещения ПЭС начиная с 50-х гг. прошлого столетия, всесторонняя оценка гидрометеорологических условий в данном районе остаётся важной практической задачей. Существенное влияние на гидрологические условия оказывает пресная мутная вода р. Мезени, впадающей в залив. Помимо стока пресной воды, речные воды несут взвешенное вещество, с одной стороны, формирующее гидрохимические условия, с другой — выступающее в роли трассеров речного выноса на спутниковых данных, что позволяет расширить объём наблюдений за этим регионом с помощью спутниковой информации относительно редких и дорогостоящих экспедиционных работ. Настоящее исследование, направленное на первое известное авторам привлечение спутниковых данных для изучения речных выносов р. Мезени в сложных гидродинамических условиях приливов, выявило ряд особенностей этого процесса. При том, что физика процесса речных выносов хорошо изучена, в различных регионах превалируют разные факторы, определяющие зоны влияния пресных речных вод в морях. Так, привлечённый ряд оптических и радиолокационных изображений позволил установить доминирующую роль приливо-отливных процессов, формирующих речной вынос р. Мезени. Сильный прилив, достигающий 9 м, в районе проведения исследований оказывается основным фактором: в фазу прилива морская вода распространяется вверх по течению реки, блокирует вынос пресных вод, что отчётливо проявляется в оптических данных. В фазу отлива наблюдаются речные плюмы большой площади, свыше 100 км^2. В силу выявленной закономерности наблюдения выносов в отлив и ненаблюдения в прилив результаты детектирования речных выносов из р. Мезени можно использовать как индикатор фазы прилива в сложных гидродинамических условиях Мезенского зал. Вклад ветра в определение зон распространения выноса р. Мезени минимальный, что проиллюстрировано анализом широкого набора квазиодновременных данных метеорологического реанализа и полей мутности по данным оптических сенсоров спутникового базирования. Также исходя из проанализированного набора данных, сильно ограниченного метеорологическими условиями и условиями облачности, выявлено, что при соответствующих фазах и одинаковых амплитудах прилива при разных условиях расхода воды формируются разные зоны речного плюма, выявленные по картам мутности на основе данных оптической съёмки. При ограниченном наборе данных можно предварительно заключить, что речной сток также выступает одним из факторов, определяющих зону влияния речного стока в исследуемой системе «эстуарий – залив».

Как иллюстрируют спутниковые изображения оптических сенсоров, в фазу прилива в заливе существенно снижается концентрация мутных вод, что может указывать на активное оседание взвешенного вещества. Этот регулярный динамичный процесс изменяет батиметрию и общую морфологию эстуария р. Мезени — важные факторы для хозяйственной деятельности человека. Как показал анализ, представленный в настоящей работе, важным инструментом мониторинга динамического процесса морфологических изменений эстуария р. Мезени оказываются данные не только оптических, но и радиолокационных сенсоров. Радиолокационные изображения с большой точностью позволяют определять районы осушки и обнажения дна, что важно для судоходства. Применение РЛИ полезно также в период становления ледяного покрова, когда молодой лёд можно считать трассером, позволяющим выявлять вынос во время отлива и его блокировку во время полного прилива.

Расширение набора данных оперативной и архивной спутниковой информации будет способствовать уточнению предположений, выдвинутых в настоящей работе.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-17-00182 «Развитие методов дистанционной диагностики распространения речных вод в прибрежной зоне морей» (https://rscf.ru/project/24-17-00182/) в Институте космических исследований РАН с использованием возможностей и инструментария информационной системы See the Sea.

Литература

1. *Вихман А. М.* Несколько данных о скорости течения и количестве влекомых наносов в устье реки Мезени // Изв. ЦГМБ. 1925. Вып. 5. С. 101–106.
2. *Врублевский М. В.*, *Бурцев М. А.*, *Захарова Е. А. и др.* «Вега-Гидро» — специализированная спутниковая информационная система для решения задач гидрологии суши // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2026. Т. 23. № 5. С. 211-230. DOI:
3. *Горелков В. М.*, *Григорьева Л. Н.*, *Моносов М. Л.* Трансформация полусуточного прилива в северной части Белого моря при условии строительства Мезенской ПЭС // Тр. Ленгидропроекта. 1981. № 77. С. 74–80.
4. *Демиденко Н. А.* Типы движения наносов в приливных устьях рек // Тр. ГОИН. 1991. Вып. 198. С. 130–140.
5. *Демиденко Н. А.* Динамика взвешенного вещества и процессы седиментации в макроприливных эстуариях Мезени и Кулоя // Изв. РАН. Сер. геогр. 2022. Т. 86. № 6. С. 1002–1022. DOI: 10.31857/S2587556622060048.
6. *Демиденко Н. А.*, *Землянов И. В.*, *Горелиц О. В.*, *Михайлов В. Н.* Исследование гидролого-морфологических процессов в устьевой области р. Мезени для целей проектирования Мезенской приливной электростанции // Тр. ГОИН. 2008. Вып. 211. С. 273–288.
7. *Завьялов П. О.*, *Маккавеев П. Н.*, *Коновалов Б. В. и др.* Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря // Океанология. 2014. Т. 54. № 3. С. 293–308. DOI: 10.7868/s0030157414030150.
8. *Князев Н. А.* Оценка применимости спутниковых радиолокационных данных для выявления речных выносов в южной части Рижского залива // Океанолог. исслед. 2025. Т. 53. № 3. С. 5–21. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(3).1.
9. *Лаврова О. Ю.*, *Митягина М. И.*, *Костяной А. Г.* Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 336 с.
10. *Лаврова О. Ю.*, *Митягина М. И.*, *Уваров И. А.*, *Лупян Е. А.* Текущие возможности и опыт использования информационной системы See the Sea для изучения и мониторинга явлений и процессов на морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 266–287. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
11. *Медведев В. С.* Вопросы динамики прибрежной зоны Мезенского залива Белого моря в связи с проектированием приливных электростанций // Геоморфология и литология береговой зоны и других крупных водоемов: сб. ст. М.: Наука, 1971. С. 23–29.
12. *Мискевич И. В.* Специфика природных процессов в приливных устьях малых рек Белого моря // Проблемы регион. экологии. 2019. № 4. С. 37–41. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14037.
13. *Митягина М. И.* Наблюдение плюмов, образованных при впадении реки Рейн в Северное море, при помощи спутниковой радиолокации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2026. Т. 23. № 4. С. 314–330. DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-314-330.
14. *Невесский Е. Н.*, *Медведев В. С.*, *Калиненко В. В.* Белое море. Седиментогенез и история развития в голоцене. М.: Наука, 1977. 236 с.
15. *Полонский В. Ф.*, *Лупачев Ю. В.*, *Скриптунов Н. А.* Гидролого-морфологические процессы в устьях рек и методы их расчета. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 383 с.
16. *Протопопов И. Д.* Несколько данных о гидрологическом режиме р. Мезени // Исслед. морей СССР. 1932. Вып. 16. С. 87–102.
17. *Римский-Корсаков Н. А.*, *Коротаев В. Н.*, *Иванов В. В. и др.* Гидрологический режим и литологические процессы в эстуарии Мезени // Океанология. 2018. Т. 58. № 4. С. 640–648. DOI: 10.1134/S003015741804007X.
18. *Седелков В. А.* К вопросу об уровнях и приливах в устьевой области р. Мезени // Сб. работ Архангельской ГМО. 1970. Вып. 7. С. 72–81.
19. *Avio C. G.*, *Gorbi S.*, *Regoli F.* Plastics and microplastics in the oceans: From emerging pollutants to emerged threat // Marine Environmental Research. 2017. V. 128. P. 2–11. https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.05.012.
20. *Baldoni A.*, *Perugini E.*, *Penna P. et al.* A comprehensive study of the river plume in a microtidal setting // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2022. V. 275. Article 107995. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.107995.
21. *Beusen A. H. W.*, *Doelman J. C.*, *Van Beek L. P. H. et al.* Exploring river nitrogen and phosphorus loading and export to global coastal waters in the shared socio-economic pathways // Global Environmental Change. 2022. V. 72. Article 102426. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102426.
22. *Dogliotti A. I.*, *Ruddick K. G.*, *Nechad B. et al.* A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 156. P. 157–168. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020.

23. *Garvine R. W.*, *Monk J. D.* Frontal structure of a river plume // J. Geophysical Research. 1974. V. 79. P. 2251–2259. DOI: 10.1029/JC079i015p02251.
24. *Howarth R. W.*, *Sharpley A.*, *Walker D.* Sources of nutrient pollution to coastal waters in the United States: Implications for achieving coastal water quality goals // Estuaries. 2002. V. 25. Iss. 4. P. 656–676. https://doi.org/10.1007/bf02804898.
25. *Jambeck J. R.*, *Geyer R.*, *Wilcox C. et al.* Plastic waste inputs from land into the ocean // Science. 2015. V. 347. Iss. 6223. P. 768–771. https://doi.org/10.1126/science.1260352.
26. *Kroeze C.*, *Hofstra N.*, *Ivens W. et al.* The links between global carbon, water and nutrient cycles in an urbanizing world — the case of coastal eutrophication // Current Opinion in Environmental Sustainability. 2013. V. 5. Iss. 6. P. 566–572. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.004.
27. *Li Y.*, *Wang M.*, *Chen X. et al.* Multi-pollutant assessment of river pollution from livestock production worldwide // Water Research. 2022. V. 209. Article 117906. https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117906.
28. *Lin L.*, *Liu D.*, *Fu Q. et al.* Seasonal variability of water residence time in the Subei Coastal Water, Yellow Sea: The joint role of tide and wind // Ocean Modelling. 2022. V. 180. Article 102137. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2022.102137.
29. *Mai L.*, *Sun X.-F.*, *Xia L.-L. et al.* Global riverine plastic outflows // Environmental Science and Technology. 2020. V. 54 (16). P. 10049–10056. https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02273.
30. *Mayorga E.*, *Seitzinger S. P.*, *Harrison J. A. et al.* Global Nutrient Export from WaterSheds 2 (NEWS 2): Model development and implementation // Environmental Modelling and Software. 2010. V. 25 (7). P. 837–853. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.01.007.
31. *McClimans T. A.*, Estuarine fronts and river plumes // Physical processes in estuaries / eds. Dronkers J., van Leussen W. Berlin, Heidelberg: Springer, 1988. P. 55–69. https://doi.org/10.1007/978-3-642-73691-9_4.
32. *Meijer L. J. J.*, *van Emmerik T.*, *van der Ent R. et al.* More than 1000 rivers account for 80 % of global riverine plastic emissions into the ocean // Science Advances. 2021. V. 7 (18). Article eaaz5803. DOI: 10.1126/sciadv.aaz5803.
33. *Milliman J. D.*, *Farnsworth K. L.* River discharge to the coastal ocean: A global synthesis. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011. 384 p. https://doi.org/10.1017/CBO9780511781247.
34. *O'Donnell J.* Surface fronts in estuaries: A review // Estuaries. 1993. V. 16. Iss. 1. P. 12–39. https://doi.org/10.2307/1352761.
35. *Strokal M.*, *Bai Z.*, *Franssen W. et al.* Urbanization: an increasing source of multiple pollutants to rivers in the 21st century // npj Urban Sustainability. 2021. V. 1. Article 24. https://doi.org/10.1038/s42949-021-00026-w.
36. *van Emmerik T.*, *Schwarz A.* Plastic debris in rivers // WIREs Water. 2020. V. 7. Iss. 1. Article e1398. https://doi.org/10.1002/wat2.1398.
37. *van Wijnen J.*, *Ragas A. M. J.*, *Kroeze C.* River export of triclosan from land to sea: A global modelling approach // Science of the Total Environment. 2018. V. 621. P. 1280–1288. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.100.

Using satellite data to study the impact of tides on the Mezen River outflow into the Mezen Bay of the White Sea

O. Yu. Lavrova[1], A. A. Zelenkova[2], Ya. O. Alferyeva[3], M. V. Vrublevsky[1], T. Yu. Bocharova[1]

[1] *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: olavrova@cosmos.ru
[2] *State Research Center for Space Hydrometeorology "Planeta", Moscow 123242, Russia*
[3] *Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*
E-mail: yanaalf@bk.ru

The article examines the possibility of using satellite data to determine the impact of tidal movements on the outflow of the Mezen River into the Mezen Bay of the White Sea. High tides, reaching 9 m, are observed in the study area. Optical data from MSI (Multispectral Instrument) sensors of Sentinel-2

satellites and OLI (Operational Land Imager) sensors of Landsat-8, -9 satellites for April–October 2020–2025 were used. C-SAR (C-band Synthetic Aperture Radar) images from Sentinel-1 satellites for 2020, 2021 and 2025 were used as radar data. A comprehensive analysis of satellite data, combined with data on tides, wind conditions, and river discharge, shows that turbidity maps compiled from high-spatial-resolution optical data allow determining the impact of tides on the outflow of the Mezen River with high probability. At low tide, the river's turbid waters are carried several kilometers into the bay, forming a plume with an area of more than 50 km^2. At high tide, the outflow is practically non-existent; seawater can push 60 km upstream the river and "block" it. The study examines formation of the outflow as observed in the satellite images 1, 3 and 6 hours after high tide. It is shown that wind has no effect on the direction of outflow propagation, whereas an increase in water discharge during high water significantly changes the behavior of the outflow even at high tide. The use of radar images for this task is limited. They are useful for identifying areas of emersions and exposed seabed at low tide, as well as during formation of the ice cover, when young ice acts as a tracer of river outflow at low tide. Although hydrological surveys have been conducted repeatedly in this area in connection with the planned construction of a tidal power plant, so far no satellite monitoring of the Mezen River estuary has ever been undertaken.

Keywords: satellite remote sensing, sea surface, satellite radar, optical data, Mezen River, river outflow, freshened water plume, water turbidity, tidal phases, White Sea

Accepted: 12.10.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-382-400

References

1. Vikhman A. M., Some data on current velocity and amount of sediment load at the mouth of the Mezen River, *Izvestiya TsGMB*, 1925, Iss. 5, pp. 101–106 (in Russian).
2. Vrublevsky M. V., Burtsev M. A., Zakharova E. A. et al., Vega-Hydro: A specialized satellite information system for hydrological applications, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2026, V. 23, No. 5, pp. 211-230 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-211-230.
3. Gorelkov V. M., Grigorieva L. N., Monosov M. L., Transformation of the semi-diurnal tide in the northern part of the White Sea in the case of Mezen TPP construction, *Trudy Lengidroproekta*, 1981, No. 77, pp. 74–80 (in Russian).
4. Demidenko N. A., Types of sediment movement in tidal river mouths, *Proc. N. N. Zubov State Oceanographic Institute*, 1991, Iss. 198, pp. 130–140 (in Russian).
5. Demidenko N. A., Dynamics of suspended matter and sedimentation processes in the macrotidal estuaries of the Mezen and Kuloy, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2022, V. 86, No. 6, pp. 1002–1022 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556622060048.
6. Demidenko N. A., Zemlyanov I. V., Gorelits O. V., Mikhailov V. N., Study of hydrological and morphological processes in the mouth area of the Mezen River for the design of the Mezen Tidal Power Plant, *Proc. N. N. Zubov State Oceanographic Institute*, 2008, Iss. 211, pp. 273–288 (in Russian).
7. Zavyalov P. O., Makkaveev P. N., Konovalov B. V. et al., Hydrophysical and hydrochemical characteristics of the sea areas adjacent to the estuaries of small rivers of the Russian coast of the Black Sea, *Oceanology*, 2014, V. 54, No. 3, pp. 265–280, DOI: 10.1134/S0001437014030151.
8. Knyazev N. A., Assessing the applicability of satellite radar data for detecting river plumes in the southern part of the Gulf of Riga, *J. Oceanological Research*, 2025, V. 53, No. 3, pp. 5–21 (in Russian), DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(3).1.
9. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., *Sputnikovye metody vyyavleniya i monitoringa zon ehkologicheskogo riska morskikh akvatorii* (Satellite methods for detecting and monitoring marine zones of ecological risk), Moscow: IKI RAS, 2016, 336 p. (in Russian).
10. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Uvarov I. A., Loupian E. A., Current capabilities and experience of using the See the Sea information system for studying and monitoring phenomena and processes on the sea surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 3, pp. 266–287 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
11. Medvedev V. S., Dynamics of the coastal zone of the Mezen Bay of the White Sea in connection with the design of tidal power plants, In: *Geomorfologiya i litologiya beregovoi zony i drugikh krupnykh vodoemov: sbornik statei* (Geomorphology and lithology of the coastal zone and other large water bodies: collection of articles), Moscow: Nauka, 1971, pp. 23–29 (in Russian).
12. Miskevich I. V., Specifics of natural processes in the tidal mouths of small rivers of the White Sea, *Regional Environmental Issues*, 2019, No. 4, pp. 37–41 (in Russian), DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14037.

13. Mityagina M. I., Rhine River plume patterns in the coastal zone of the North Sea observed by satellite radars, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2026, V. 23, No. 4, pp. 314–330 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-314-330.
14. Nevesskiy E. N., Medvedev V. S., Kalinenko V. V., *Beloe more. Sedimentogenez i istoriya razvitiya v golotsene* (White Sea. Sedimentogenesis and history of development in the Holocene), Moscow: Nauka, 1977, 236 p. (in Russian).
15. Polonskiy V. F., Lupachev Yu. V., Skriptunov N. A., *Gidrologo-morfologicheskie protsessy v ust'yakh rek i metody ikh rascheta* (Hydrological and morphological processes in river mouths and methods for their calculation), Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992, 383 p. (in Russian).
16. Protopopov I. D., Some data on the hydrological regime of the Mezen River, In: *Issledovaniya morei SSSR* (Studies of the seas of the USSR), 1932, Iss. 16, pp. 87–102 (in Russian).
17. Rimskiy-Korsakov N. A., Korotaev V. N., Ivanov V. V. et al., Hydrological regime and lithodynamic processes in the Mezen River estuary, *Oceanology*, 2018, V. 58, No. 4, pp. 593–600, DOI: 10.1134/S0001437018040070.
18. Sedelkov V. A., On the issue of levels and tides in the estuary area of the Mezen River, *Sbornik rabot Arkhangel'skoi GMO*, 1970, Iss. 7, pp. 72–81 (in Russian).
19. Avio C. G., Gorbi S., Regoli F., Plastics and microplastics in the oceans: From emerging pollutants to emerged threat, *Marine Environmental Research*, 2017, V. 128, pp. 2–11, https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.05.012.
20. Baldoni A., Perugini E., Penna P. et al., A comprehensive study of the river plume in a microtidal setting, *Estuarine*, *Coastal and Shelf Science*, 2022, V. 275, Article 107995, https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.107995.
21. Beusen A. H. W., Doelman J. C., Van Beek L. P. H. et al., Exploring river nitrogen and phosphorus loading and export to global coastal waters in the shared socio-economic pathways, *Global Environmental Change*, 2022, V. 72, Article 102426, https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102426.
22. Dogliotti A. I., Ruddick K. G., Nechad B. et al., A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters, *Remote Sensing of Environment*, 2015, V. 156, pp. 157–168, https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020.
23. Garvine R. W., Monk J. D., Frontal structure of a river plume, *J. Geophysical Research*, 1974, V. 79, pp. 2251–2259, DOI: 10.1029/JC079i015p02251.
24. Howarth R. W., Sharpley A., Walker D., Sources of nutrient pollution to coastal waters in the United States: Implications for achieving coastal water quality goals, *Estuaries*, 2002, V. 25, Iss. 4, pp. 656–676, https://doi.org/10.1007/bf02804898.
25. Jambeck J. R., Geyer R., Wilcox C. et al., Plastic waste inputs from land into the ocean, *Science*, 2015, V. 347, Iss. 6223, pp. 768–771, https://doi.org/10.1126/science.1260352.
26. Kroeze C., Hofstra N., Ivens W. et al., The links between global carbon, water and nutrient cycles in an urbanizing world — the case of coastal eutrophication, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, V. 5, Iss. 6, pp. 566–572, https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.004.
27. Li Y., Wang M., Chen X. et al., Multi-pollutant assessment of river pollution from livestock production worldwide, *Water Research*, 2022, V. 209, Article 117906, https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117906.
28. Lin L., Liu D., Fu Q. et al., Seasonal variability of water residence time in the Subei Coastal Water, Yellow Sea: The joint role of tide and wind, *Ocean Modelling*, 2022, V. 180, Article 102137, https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2022.102137.
29. Mai L., Sun X.-F., Xia L.-L. et al., Global riverine plastic outflows, *Environmental Science and Technology*, 2020, V. 54 (16), pp. 10049–10056, https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02273.
30. Mayorga E., Seitzinger S. P., Harrison J. A. et al., Global Nutrient Export from WaterSheds 2 (NEWS 2): Model development and implementation, *Environmental Modelling and Software*, 2010, V. 25 (7), pp. 837–853, https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.01.007.
31. McClimans T. A., Estuarine fronts and river plumes, In: *Physical processes in estuaries*, Dronkers J., van Leussen W. (eds.), Berlin, Heidelberg: Springer, 1988, pp. 55–69, https://doi.org/10.1007/978-3-642-73691-9_4.
32. Meijer L. J. J., van Emmerik T., van der Ent R. et al., More than 1000 rivers account for 80 % of global riverine plastic emissions into the ocean, *Science Advances*, 2021, V. 7 (18), Article eaaz5803, DOI: 10.1126/sciadv.aaz5803.
33. Milliman J. D., Farnsworth K. L., *River discharge to the coastal ocean: A global synthesis*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011, 384 p., https://doi.org/10.1017/CBO9780511781247.
34. O'Donnell J., Surface fronts in estuaries: A review, *Estuaries*, 1993, V. 16, Iss. 1, pp. 12–39, https://doi.org/10.2307/1352761.
35. Strokal M., Bai Z., Franssen W. et al., Urbanization: an increasing source of multiple pollutants to rivers in the 21st century, *npj Urban Sustainability*, 2021, V. 1, Article 24, https://doi.org/10.1038/s42949-021-00026-w.

36. van Emmerik T., Schwarz A., Plastic debris in rivers, *WIREs Water*, 2020, V. 7, Iss. 1, Article e1398, https://doi.org/10.1002/wat2.1398.
37. van Wijnen J., Ragas A. M. J., Kroeze C., River export of triclosan from land to sea: A global modelling approach, *Science of the Total Environment*, 2018, V. 621, pp. 1280–1288, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.100.