

Возможности спутникового радиолокационного наблюдения плюмов речных и лагунных вод в юго-восточной части Балтийского моря

М. И. Митягина, О. Ю. Лаврова

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: mityag@iki.rssi.ru

Рассмотрены особенности проявления на спутниковых радиолокационных изображениях (РЛИ) морской поверхности распреснённых плюмов, образованных вытоком р. Вислы и выносами вод Калининградского и Куршского заливов в юго-восточной части Балтийского моря. Экспериментальной основой исследования послужил массив спутниковых данных, полученных для этих трёх районов за двухлетний период с 1 мая 2022 г. по 30 апреля 2024 г. при помощи радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) C-SAR спутника Sentinel-1. Для повышения достоверности полученных результатов к исследованию привлекались данные многоспектральных сенсоров оптического диапазона — MSI (*англ.* Multispectral Instrument) спутников Sentinel-2A, -2B и сканирующего радиометра OLI (*англ.* Operational Land Imager) спутников Landsat-8, -9, накопленные за тот же период времени. На спутниковых изображениях проанализированы проявления плюмов распреснённых вод, отличающиеся разнообразием морфологических форм. На основе обобщения результатов проведённого анализа выявлены и описаны четыре основных механизма визуализации плюмов на РЛИ поверхности Балтийского моря: плюмы с выраженной границей, видимой как линия резкого усиления обратно-рассеянного сигнала; плюмы, граница которых очерчена сликами; области плавного усиления/ослабления радиолокационного сигнала в плюме без формирования выраженного фронта; проявление плюма за счёт трассеров, таких как лёд/скопление биогенных плёнок. Получены оценки относительного вклада этих механизмов в формирование радиолокационных сигнатур плюмов в каждом из трёх тестовых районов. Обсуждается вопрос о точности определения площади плюма на основе данных различных спутниковых сенсоров. Подчёркивается важность привлечения данных спутниковых РСА для получения детальных сведений о пространственной изменчивости распространения речных и лагунных вод в тестовых акваториях.

Ключевые слова: спутниковое дистанционное зондирование, морская поверхность, спутниковая радиолокация, РСА, спутниковые данные оптического диапазона, выносы рек, плюм распреснённых вод, поверхностные плёнки, Балтийское море

Одобрена к печати: 06.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-288-305

Введение

Важным фактором, оказывающим зачастую определяющее влияние на физические, биологические и геохимические процессы в прибрежных и шельфовых морских зонах, является речной сток. Распреснённые речные воды и воды внутренних водоёмов, соединённых с морем проливами и каналами, перемешиваются с более солёной морской водой, формируя при этом динамическую структуру — плюм (*англ.* plume). Как правило, смешивающиеся водные массы, будь то морская вода, речная вода или воды заливов, существенно отличаются друг от друга по многим физическим и химическим характеристикам, включая солёность, температуру, плотность, концентрацию взвешенных и растворённых веществ и т. д. Плюмы обычно занимают широкий, но неглубокий поверхностный слой моря, ограниченный резким градиентом плотности. Площади речных плюмов, образованных крупнейшими мировыми реками, составляют около 100–1000 км², небольшие реки с расходом до 10 м³/с образуют речные плюмы с горизонтальной пространственной протяжённостью порядка 10–100 м. Несмотря на относительно небольшой объём общего пресноводного стока в Мировой океан, речные плюмы занимают до 1/5 площади его шельфа и существенно влияют на глобальные потоки плавучести, тепла, терригенных осадков, питательных веществ и антропогенных загряз-

няющих веществ, которые сбрасываются в прибрежное море с континентальным стоком (Osadchiev, Yankovsky, 2022).

Плюмы по сути своей являются многомасштабными динамическими структурами, которые проявляются в различных размерах и формах. Они характеризуются сильной пространственной неоднородностью и высокой временной изменчивостью, вызванной внешними процессами адвекции и перемешивания (Завьялов и др., 2014). На морфологию и эволюцию плюмов оказывает влияние совокупность большого количества факторов: региональные особенности (дельта/эстуарий, закрытый залив/открытое море, береговая линия, батиметрия и т.д.), прибрежные течения, сила Кориолиса, интенсивность и объём речного стока, ветровое воздействие, приливные колебания и другие процессы (Horner-Devine et al., 2015). Динамика и изменчивость распределённых плюмов являются ключевыми факторами для понимания механизмов распространения, трансформации и перераспределения речных выносов и континентального стока в прибрежной зоне, поэтому они постоянно привлекают внимание исследователей.

Для экспериментального изучения прибрежных плюмов долгое время использовались традиционные контактные методы, и это приводило к определённой фрагментарности в представлениях о процессах, связанных с распространением речных вод в море. С появлением специализированных космических аппаратов и развитием методов дистанционного зондирования непрерывный спутниковый мониторинг занял важное место в исследованиях речных, лагунных и эстуарных плюмов наряду с натурными измерениями, математическим и лабораторным моделированием, поскольку он позволяет проводить регулярные наблюдения на больших территориях с высоким пространственным разрешением и предоставляет прекрасные возможности для изучения и картирования распространения пресноводных выносов в шельфовых зонах как внутренних морей, так и Мирового океана. Использование спутниковых данных позволяет выявлять как локальные особенности конкретных приустьевых районов, так и фундаментальные закономерности распространения и эволюции речных и лагунных плюмов (Лаврова и др., 2016).

Распределённые плюмы обладают отличной от морской воды температурой и солёностью, а также, как правило, повышенной концентрацией хлорофилла *a*, высоким содержанием взвеси и растворённой органики, вследствие чего их оптические свойства значительным образом отличаются от окружающих морских вод (Лаврова и др., 2016). Поэтому большинство работ, посвящённых спутниковым наблюдениям и изучению плюмов в различных районах Мирового океана, для своих целей используют данные спутниковых многоспектральных сенсоров оптического диапазона (Лаврова и др., 2016, 2022; Назирова, Краюшкин, 2021; Назирова и др., 2019, 2023; Осадчиев, 2021; Ayad et al., 2020; Constantin, Doxaran, 2016; Devlin et al., 2015; Doxaran et al., 2009; Gernez et al., 2015; Kostianoy et al., 2019; Lavrova et al., 2016; Miller, McKee, 2004; Osadchiev, Sedakov, 2019; Warrick et al., 2004). Для этих сенсоров развиваются и совершенствуются алгоритмы получения количественных оценок общего содержания и концентрации взвешенного вещества, концентрации хлорофилла *a*, исходящего из воды излучения и поля температуры морской поверхности. Следует заметить, что существуют естественные ограничения на использование спутниковых данных оптического диапазона: в общем случае их невозможно использовать для наблюдения за особенностями морской поверхности в плохих погодных условиях или ночью — облачность становится помехой для инфракрасных сенсоров; облачность и отсутствие дневного света (ночь, полярная ночь) являются помехами для оптических сенсоров.

Использование для наблюдения плюмов данных спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), работающих в коротком сантиметровом диапазоне, не имеет ограничений, связанных с подобными проблемами. Преимущество электромагнитных волн этого диапазона состоит в том, что они проникают через облачный покров, обеспечивая круглосуточное и всепогодное наблюдение океана. Отражённый от поверхности океана радиолокационный сигнал обусловлен рассеянием брэгговского типа на ряби — коротких гравитационно-капиллярных волнах на морской поверхности, возбуждаемых приповерхностным ветром (Басс, Фукс, 1972). Атмосферные и внутриокеанические процессы тем или иным спо-

собом модулируют эти гравитационно-капиллярные волны, что проявляется в модуляции интенсивности радиолокационного сигнала. Разнообразные структуры на поверхности океана становятся видимыми благодаря различным механизмам модуляции ряби, главным образом — течениям и поверхностно-активным веществам, влияющим на поверхностное натяжение жидкости (Булатов и др., 2003).

На данный момент существует целый ряд работ, посвящённых изучению речных и эстуарных плюмов на основе данных спутниковых и самолётных РСА (Cresswell, Tildesley, 2000; Hessner et al., 2001; Jay et al., 2009; Jiang et al., 2009; Klemas, 2012; Li et al., 2017; Sletten et al., 1999; Vogelzang et al., 1997; Zhang et al., 2004; Zheng et al., 2004). В большинстве из этих работ распреснённые плюмы в приливных зонах морей и океанов рассматриваются в контексте мезо- и мелкомасштабных фронтов, возникающих на их границах. Спутниковые радиолокационные наблюдения подтвердили существование некоторых общих особенностей структуры и эволюции плюма распреснённых вод в приливной зоне, ранее описанных в работах (Garvine, 1974; Garvine, Monk, 1974; Kao et al., 1977). На основе радиолокационных наблюдений доказано, что пространственные закономерности развития и эволюции плюмов, подвергающихся воздействию сильных приливных течений, главным образом связаны с фазой прилива и, следовательно, носят циклический характер. Вблизи устья взаимодействия речного выноса с преимущественно полусуточными приливами обуславливает периодическую генерацию пресноводных плюмов, границы которых обычно обозначены поверхностными фронтами, которые часто видны на РЛИ как узкие, вытянутые области усиления или ослабления обратно-рассеянного сигнала.

В то же время работ, посвящённых радиолокационным наблюдениям речных плюмов в морях без приливов, существенно меньше. Мы можем отметить только публикацию (Иванов и др., 2018), в которой рассматриваются особенности проявления на радиолокационных изображениях выносов горных рек восточного побережья Чёрного моря.

Цель исследования, результаты которого представлены в данной статье, состояла в изучении закономерностей и особенностей отображения плюмов, образованных стоком р. Вислы и выносами из Калининградского и Куршского заливов в прибрежной зоне практически бесприливного Балтийского моря, в данных спутниковой радиолокации и в определении механизмов, определяющих формирование их радиолокационных сигнатур.

Районы интереса

Исследование базируется на спутниковых данных, полученных в ходе непрерывных наблюдений юго-восточной части Балтийского моря, и продолжает серию работ, проведённых нами ранее в этом районе. Результаты, полученные нами в ходе ранее проведённых исследований, основывались на данных спутниковых мультиспектральных сенсоров в оптическом диапазоне электромагнитного спектра, подспутниковых экспериментах и модельных расчётах и представлены в ряде публикаций (Лаврова и др., 2014, 2016; Митягина и др., 2024; Krayushkin et al., 2019; Lavrova et al., 2016).

В фокусе настоящего исследования находились особенности проявления в спутниковых радиолокационных данных распреснённых плюмов, образованных вытоком р. Вислы и выносами вод Калининградского (Вислинского) и Куршского заливов (отмечены красными прямоугольниками на *рис. 1*, см. с. 291) на морской поверхности юго-восточной части Балтийского моря.

Каждый из трёх упомянутых выше водных объектов обладает своими отличительными особенностями.

Река Висла — самая длинная и вторая по водоносности (после Невы) река бассейна Балтийского моря. Длина р. Вислы составляет 1047 км, площадь водосбора около 198,5 тыс. км². Средний годовой расход воды в пределах устья составляет 1080 м³/с. С конца XIX в. Висла впадает в Гданьский залив через искусственный канал. Такое поступление речных вод без промежуточного эстуария способствует тому, что воды реки смешиваются с морскими водами прямо в заливе.



Рис. 1. Районы интереса

Калининградский залив представляется классическим примером прибрежной лагуны (мелководный залив или бухта, отделённая от моря полосой наносной суши или соединённая с ним узким проливом (Жуков, 1976)) в южной части Балтийского моря (см. рис. 1). Длина залива составляет 90,7 км, а ширина варьируется от почти 6 до 13 км, общая площадь лагуны равна 838 км². Государственная граница между Россией и Польшей делит залив на две части, при этом 56,2 % площади залива (472,5 км²) принадлежит России. Калининградский залив — очень мелководный бассейн со средней глубиной всего 2,75 м. От Гданьского залива его отделяет Вислинская коса длиной около 65 км. Сообщение между Калининградским заливом и Балтийским морем осуществляется через Балтийский пролив длиной 2 км, шириной 440 м и глубиной около 10–12 м (Szymkiewicz, 1992).

Форма залива способствует развитию значительных ветровых сгонно-нагонных колебаний уровня. Сила и направление господствующих ветров определяют и течения в заливе. При нагонных ветрах северного и северо-западного направления морская вода проникает в залив и движется вдоль берегов против часовой стрелки. Юго-восточные и южные ветра вызывают течение в противоположном направлении — водные массы движутся по часовой стрелке и вытекают из залива через Балтийский пролив. Среднестатистические данные о режиме входных течений (заток морских вод) и выходных течений (вынос вод из залива) представлены в работах (Лазаренко, Маевский, 1971; Chubarenko, Margonski, 2008).

Куршский залив, расположенный в юго-восточной части Балтийского моря (см. рис. 1), является крупнейшей прибрежной мелководной лагуной Европы. Его площадь составляет около 1584 км², из которых 1200 км² принадлежат России, остальное — Литве, длина залива 93 км, максимальная ширина в южной части 46 км (Žaromskis, 1996). Это относительно мелководный (средняя глубина 3,8 м) сильно эвтрофированный и преимущественно пресноводный бассейн, отделённый от открытого моря песчаной Куршской косой. В залив впадает множество ручьёв и рек, крупнейшая из которых — Неман, по которому проходит российско-литовская граница. С морем Куршский залив соединяется через узкий (0,4–1,1 км)

Клайпедский пролив в северной части залива. Динамика вод в Куршском заливе зависит от размера и колебания притока рек в течение года. В особенно засушливые годы приток достигал 14,3 км³, а во влажные годы — 35,6 км³. Более 90 % этого количество вносит Неман. Ежегодно реки переносят количество пресной воды, примерно в четыре раза превышающее объём самого залива. По этой причине уровень воды в нём на несколько сантиметров выше уровня воды в Балтийском море, а её солёность гораздо ниже: южная и центральная части лагуны пресноводные (годовая минерализация воды составляет в среднем 0,08 ‰), а в северной части среднегодовая солёность достигает 2,45 ‰). Приток рек образует постоянное направленное в море течение, имеющее среднюю скорость 30–40 см/с. Эта скорость значительно увеличивается во время весенних паводков и может достигать 1,0–2,0 м/с. (Jakimavičius et al., 2018; Umgiesser et al., 2016).

Данные и методы

Экспериментальной основой исследования послужил массив спутниковых данных, полученных для юго-восточной части Балтийского моря за двухлетний период с 1 мая 2022 г. по 30 апреля 2024 г. при помощи радиолокаторов с синтезированной апертурой C-SAR (*англ.* Synthetic Aperture Radar) спутников Sentinel-1A, -1B (длина волны зондирующего сигнала 5,6 см, C-диапазон). Использовались изображения, полученные на вертикальной поляризации с разрешением в пикселе 9 м. Для повышения достоверности выявления распредснённых плюмов мы привлекали к исследованию данные многоспектральных сенсоров оптического диапазона — MSI (*англ.* Multispectral Instrument) спутников Sentinel-2A, -2B и сканирующего радиометра OLI (*англ.* Operational Land Imager) спутников Landsat-8, -9 (*таблица*).

Используемые данные

Сенсор	Количество снимков по районам интереса		
	Устье Вислы	Калининградский залив	Куршский залив
C-SAR Sentinel-1A, -1B	197	239	236
OLI Landsat-8, -9	180	182	183
MSI Sentinel-2A, 2B	288	288	287

В общей сложности в рамках данного исследования было проанализировано 2080 спутниковых снимков юго-восточной части Балтийского моря.

Для специализированного анализа PCA-данных использовалась платформа приложений Sentinel SNAP (*англ.* Sentinel Application Platform), которая кратко может быть охарактеризована как набор рабочих инструментов и интерфейсов программирования приложений (<https://step.esa.int/main/doc/online-help/>).

Для цветового синтеза изображений по данным оптического диапазона и их дальнейшего совместного с РЛИ анализа применялся инструментарий спутникового информационного сервиса See the Sea (STS), разработанного в Институте космических исследований РАН (Лаврова и др., 2019). Для картографирования выявленных плюмов использовался интегрированный в систему STS картографический интерфейс, а с использованием подсистемы создания и ведения описаний явлений STS формировался массив описаний, содержащий их количественные характеристики.

Для получения метеорологической информации использовались как архивные данные о фактической погоде в районе интереса с сайта <https://weatherspark.com/>, так и данные реанализа NCEP/NCAR (*англ.* National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) из интегрированной в систему STS базы метеорологических данных (Уваров и др., 2013).

Результаты спутниковых наблюдений

Радиолокационные образы речных и лагунных плумов в юго-восточной части Балтийского моря

Радиолокационные образы плумов отличаются разнообразием морфологических форм. Обобщив результаты проведённого анализа, мы выделили четыре основных типа визуализации плумов, образованных вытоком р. Вислы и выносами из Калининградского и Куршского заливов в шельфовой зоне юго-восточной части Балтийского моря на изображениях, полученных при помощи спутниковых РСА. Ниже мы рассмотрим их более подробно и обсудим механизмы, ответственные за их формирование. Характерные примеры различных типов проявления плумов на спутниковых РСА-изображениях представлены на *рис. 2*.

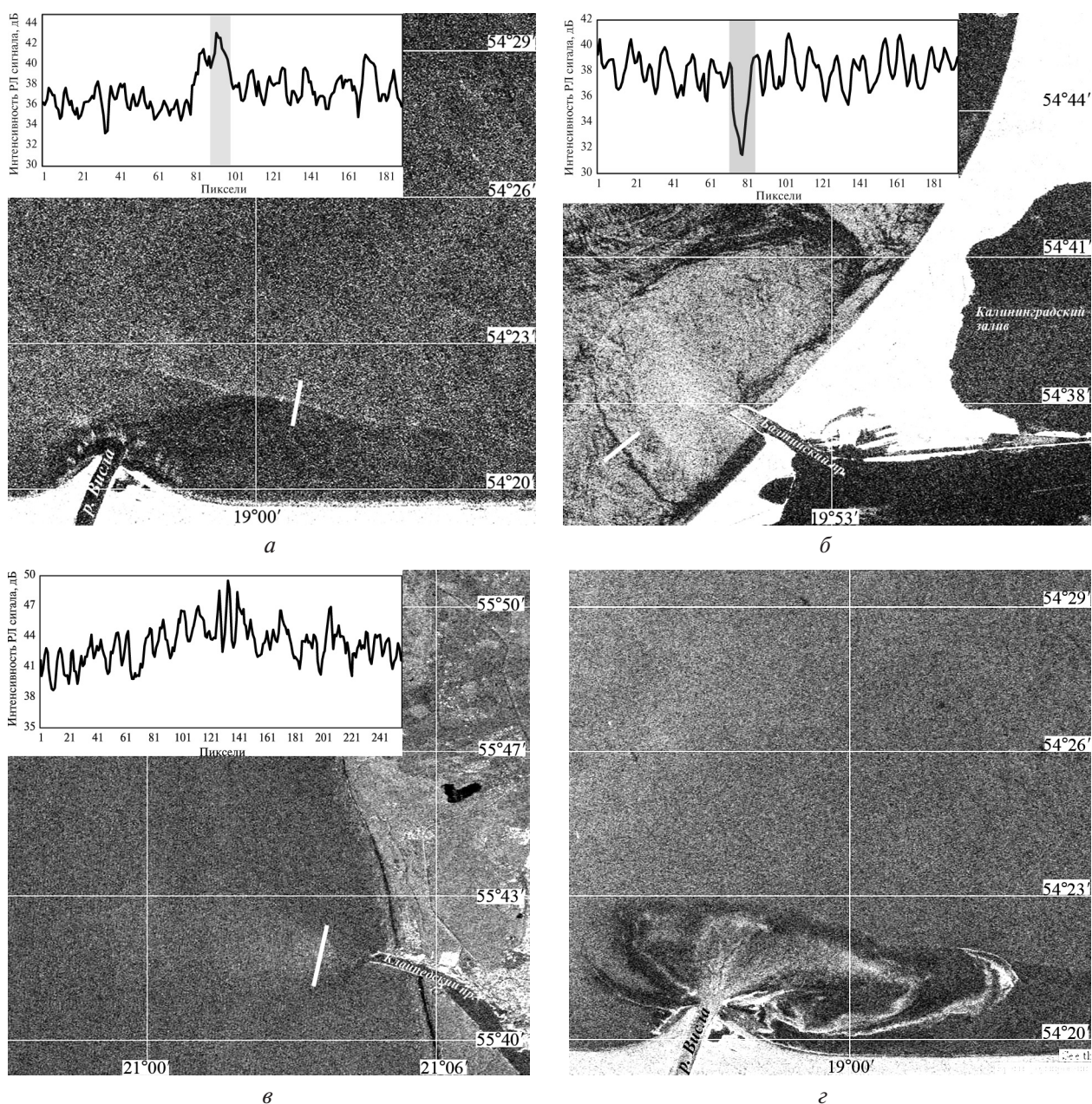


Рис. 2. Фрагменты РЛИ, полученных при помощи сенсора C-SAR Sentinel-1A: *а* — в районе устья р. Вислы 12 декабря 2023 г., 16:28 UTC; *б* — в районе Калининградского залива 26 августа 2022 г., 16:20 UTC; *в* — в районе Куршского залива 13 марта 2023, 05:00 UTC; *г* — в районе устья р. Вислы 17 декабря 2022 г., 16:28 UTC

На *рис. 2а* приведён фрагмент РЛИ, полученного над районом впадения р. Вислы в Гданьский залив Балтийского моря. На момент проведения спутниковой съёмки в районе интереса наблюдался умеренный северо-северо-западный ветер со скоростью 5–6 м/с. На РЛИ отчётливо видны проявления речного плюма, граница которого выделяется как яркая линия усиления радиолокационного сигнала. Фронтальный скачок наиболее ярко проявляется в северо-восточной части плюма на расстоянии около 4 км от береговой черты. Изменения интенсивности обратно-рассеянного радиолокационного сигнала вдоль поперечного сечения фронта (белая линия на РЛИ) показаны на врезке. Ширина фронта составляет 100–150 м, усиление интенсивности обратно-рассеянного сигнала на фронте (серый прямоугольник на графике) составляет около 5 дБ. В данном случае плюм визуализируется на РЛИ посредством механизма, основанного на взаимодействии поверхностных волн и течений. В зоне конвергенции течений на границе фронта увеличивается крутизна волн поверхностной ряби и, соответственно, возрастает шероховатость морской поверхности. С точки зрения берегового механизма рассеяния величина обратно-рассеянного сигнала пропорциональна пространственной спектральной плотности шероховатости морской поверхности (Рытов и др., 1978), поэтому величина обратно-рассеянного сигнала на границе плюма возрастает, что приводит к появлению сопутствующих ярких полос на РЛИ (Lyzenga, 1991).

На данном конкретном РЛИ (см. *рис. 2а*), полученном в холодное время года, интенсивность обратно-рассеянного сигнала в области плюма примерно на 2 дБ ниже, чем вне его, так как температура речных вод на момент получения изображения была ниже температуры морской поверхности в Гданьском заливе. Температура и солёность в зоне плюма отличались от характеристик окружающей морской воды, в результате изменилось поверхностное натяжение воды, а вместе с ним и спектр гравитационно-капиллярных волн, что привело к различию в интенсивности фонового обратного рассеяния по разные стороны фронта.

На *рис. 2б* приведён фрагмент РЛИ, полученного над районом Балтийского канала при слабом северо-восточном ветре со скоростью 2–3 м/с. Лагунный плюм, образованный выносом вод Калининградского залива в Балтийское море, выявляется на РЛИ как компактная округло-симметричная область с площадью около 35 км², ограниченная чётко очерченной сликовой полосой переменной ширины. На врезке показаны вариации радиолокационного сигнала вдоль поперечного сечения сликовой границы плюма (белая линия на РЛИ). Падение интенсивности обратно-рассеянного сигнала на фронте составляет около 6,5 дБ (серый прямоугольник на графике). В данном случае наблюдается ещё один тип визуализации мелкомасштабного фронта с помощью РСА, работающего в коротком сантиметровом диапазоне волн, — модуляция гравитационно-капиллярных волн, вызванная перераспределением поверхностных плёнок течениями на границе распространяющегося плюма. На поверхности моря в конвергентной зоне на границе плюма присутствуют узкие искривлённые области с повышенной концентрацией плёнок, что приводит к значительному затуханию ряби и появлению гладких участков (сликов), которые образуют тёмные области уменьшенного сигнала обратного рассеяния на радиолокационном изображении. Формирование этого типа РЛ-образа плюма возможно при наличии повышенного количества поверхностных плёнок биогенного происхождения и наблюдается при скорости ветра 3–5 м/с, когда возбуждаются короткие гравитационно-капиллярные волны, ответственные за береговое рассеяние радиолокационного сигнала, а ветер ещё не оказывает разрушительного воздействия на поверхностные плёнки (Dokken, Wahl, 1996; Espedal et al., 1998). Такой тип проявления плюмов на РЛИ часто встречается при выносах из Калининградского и Куршского заливов, отличающихся высокой степенью эвтрофикации, т.е. чрезмерно высоким содержанием биогенных элементов в поверхностных водах и, как следствие, наличием на поверхности большого количества биогенных плёнок.

Достаточно часто встречаются ситуации, когда фронт на границе плюма не сформировался или выражен достаточно слабо и область плюма определяется как зона повышенного или пониженного по сравнению с окружающей морской поверхностью рассеяния. Такой пример представлен на *рис. 2в*, где изображён фрагмент РЛИ, полученного для района Клайпедского пролива при умеренном юго-западном ветре со скоростью 3–4 м/с. Лагунный

плюм визуализируется на РЛИ как непосредственно примыкающая к выходу из пролива светлая каплевидная область с характерным расширением, соответствующая области повышенного рассеяния. Интенсивность обратно-рассеянного сигнала достигает максимума вдоль продольной оси плюма и плавно ослабевает к его краям (см. график вариации радиолокационного сигнала вдоль поперечного разреза). Примерная площадь плюма составляет 12 км^2 . В данном случае на РЛИ хорошо различимо направленное к берегу ветровое волнение, развившееся в прибрежной зоне юго-восточной части Балтийского моря под влиянием сильного ветра, наблюдавшегося в этом районе накануне, вечером 12 марта 2023 г. Течение в плюме направлено навстречу ветровому волнению, при этом средняя спектральная плотность коротких поверхностных волн сантиметрового диапазона увеличивается за счёт их взаимодействия с более длинными метровыми волнами по мере увеличения амплитуды или крутизны более длинных волн (Lyzenga, 1998).

Три рассмотренных выше механизма визуализации на спутниковых РЛИ плюмов, образованных вытоком Вислы и выносами из Калининградского и Куршского заливов, присущи практически исключительно радиолокационным методам наблюдения морской поверхности. Однако если на поверхности воды находятся какие-либо трассеры, например лёд или скопления поверхностных плёнок, то на РЛИ плюмы могут проявляться так же, как на изображениях, цветосинтезированных по данным видимого диапазона. На *рис. 2г* приведён фрагмент РЛИ, полученного над устьем р. Вислы, на котором плюм площадью 33 км^2 визуализируется за счёт выноса из реки ещё не сплочённого, подвижного льда. Возможны также ситуации, когда плюм образован выносом «ледяного сала» и проявляется как обширная сликовая область. Обширные сликовые пятна могут также быть индикатором выноса из заливов биогенных плёнок. Эти две ситуации достаточно просто разделяются с учётом времени года и наличия/отсутствия в заливах льда или большого количества биогенных плёнок, которые (как лёд, так и скопления плёнок) отчётливо выявляются на РЛИ. Ограничивающим фактором для действия данного механизма становится требование к наличию трассеров.

Статистический анализ частоты визуализации плюмов на радиолокационных изображениях в юго-восточной части Балтийского моря

Нами был проведён статистический анализ, направленный на выявление частоты визуализации плюмов за счёт четырёх описанных выше механизмов. Полученные результаты иллюстрирует диаграмма, на которой представлен относительный вклад различных механизмов в визуализацию плюмов для каждого из трёх районов интереса (*рис. 3*).

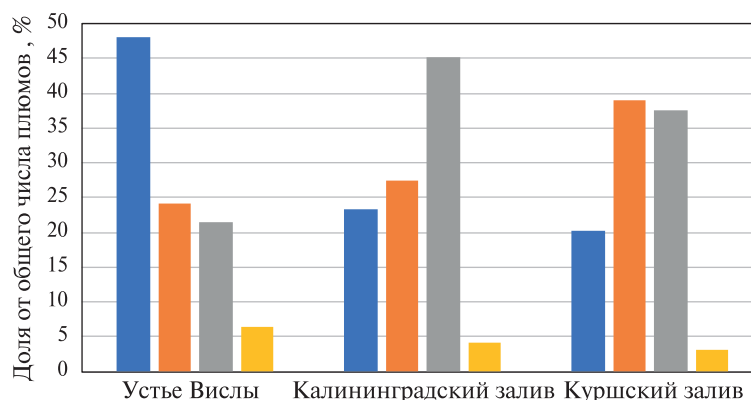


Рис. 3. Относительный вклад различных механизмов в визуализацию плюмов, выявленных на РЛИ трёх районов интереса. Синие столбцы — фронт на границе плюма, визуализируемый за счёт усиления обратно-рассеянного сигнала, оранжевые столбцы — граница плюма, очерченная сликами, серые столбцы — усиление/ослабление радиолокационного сигнала в области плюма без формирования выраженного фронта, жёлтые столбцы — плюм, проявляемый за счёт трассеров (лёд/скопление плёнок)

Установлено, что проявления на РЛИ плюмов с выраженной границей, видимой как линия усиления обратно-рассеянного сигнала, более характерны для выноса р. Вислы (около половины всех случаев). При выносах из Куршского залива распреснённые плюмы наиболее часто визуализируются на РЛИ благодаря сликовым границам (почти 40 % всех случаев), хотя и доля проявления плюмов без отчётливой границы тоже достаточно высока. Радиолокационные образы плюмов, образованных при выносах из Калининградского залива в большинстве случаев (около 45 %) не имеют отчётливой границы, но высока и доля плюмов, окружённых сликовой границей (около 37 %). При выносах из Калининградского и Куршского заливов выявляются и плюмы с выраженными яркими границами (23 и 20 % соответственно). Плюмы, визуализированные на РЛИ с помощью ледовых и сликовых трасеров, выявлены во всех трёх районах, однако вклад этого механизма невелик.

Сравнительный анализ проявления плюмов в прибрежной зоне юго-восточной Балтики в данных спутниковой радиолокации и данных многоспектральных сенсоров оптического диапазона

Для получения более полной информации о формировании и эволюции плюмов, образованных выносами р. Вислы и из Калининградского и Куршского заливов, мы проанализировали данные многоспектральных сенсоров оптического диапазона — MSI Sentinel-2A, -2B и сканирующего радиометра OLI Landsat-8, -9, используя изображения видимого диапазона, цветосинтезированные в естественных цветах по 4-му, 3-му и 2-му спектральным каналам для обоих сенсоров. На таких изображениях область распространения речных и лагунных вод в море выделяется за счёт цветового контраста между водами в области плюма, как правило, желтовато-коричневыми или зеленоватыми за счёт повышенного содержания взвешенного вещества или фитопланктона, и морскими водами, в большинстве случаев имеющими синеголубой оттенок. Пример отображения плюма, образованного выносом из Клайпедского пролива вод Куршского залива, на изображении, цветосинтезированном по данным спутникового сенсора MSI Sentinel-2A, приведён на *рис. 4а*. На *рис. 4б* приведено РЛИ, полученное для того же района в близкий момент времени — за пять часов до получения данных сенсором оптического диапазона.

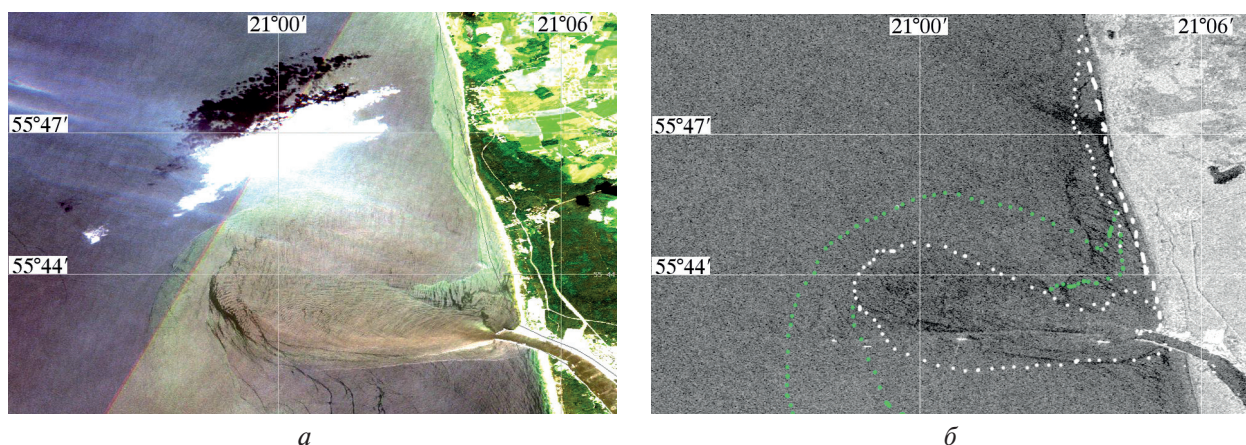


Рис. 4. Пример совместного анализа РЛИ и изображения видимого диапазона: *а* — фрагмент изображения, цветосинтезированного по данным MSI Sentinel-2A (канал R — 650–680 нм, G — 542–577 нм, B — 456–523 нм) от 4 июля 2022 г., 10:05 UTC; *б* — фрагмент РЛИ SAR-C Sentinel-1A от 4 июля 2022 г., 05:00 UTC

Плюм вод Куршского залива отчётливо выделяется на обоих изображениях. На РЛИ (см. *рис. 4б*) он визуализируется как вытянутая каплевидная структура с отчётливыми сликовыми границами, к которой примыкает шлейф распреснённых вод, распространяющийся

вдоль берега на север. Площадь центральной части плюма (факела выноса) составляет 18 км^2 , а площадь шлейфа — примерно 10 км^2 . На цветосинтезированном изображении (см. *рис. 4а*) плюм визуализируется за счёт цветового контраста между водами Куршского залива, желтовато-коричневыми из-за повышенного содержания взвешенного вещества, и синими морскими. Здесь так же чётко проявляется факел выноса с выраженным передним фронтом, очерченными скоплениями плёнок, и распространяющийся вдоль берега шлейф. Контуры центральной части плюма и шлейфа нанесены на РЛИ (белые точки на *рис. 4б*). За пять часов, прошедших с момента получения РЛИ, площадь центральной части плюма изменилась незначительно. Под влиянием юго-западного ветра, наблюдавшегося в районе интереса на момент проведения съёмки сенсором MSI, шлейф сузился и его площадь уменьшилась до 6 км^2 . Наибольший интерес представляет область шириной $1\text{--}2 \text{ км}$, окружающая центральный факел выноса, видимая на цветосинтезированном изображении в зеленоватых оттенках и имеющая отчётливую границу, но никак не проявляющаяся на РЛИ. Контуры этой области показаны на *рис. 4б* зелёными точками.

Несмотря на то, что распреснённые плюмы выделяются на спутниковых изображениях видимого диапазона, цветосинтезированных в псевдоестественных цветах (*англ.* true color image), где они хорошо выражены за счёт контрастных оптических различий распреснённых и морских вод (Лаврова и др., 2016), задача определения их пространственных размеров и границ является далеко не тривиальной. В океанологии граница плюма задаётся обычно некоторым фиксированным значением солёности, если соответствующая ему изохалина расположена в области резкого градиента. Кроме того, наличие внешнего воздействия на плюм (волнового, ветрового, прибрежных течений), как правило, приводит к размыванию границ и формированию сложной пространственно неоднородной внутренней структуры плюма. (Завьялов и др., 2014; Tavora et al., 2023). Возникает вопрос — какое использовать пороговое значение для «очерчивания» границ основного плюма, исключив шлейфы. В настоящий момент восстановление точной границы плюма по непосредственному измерению вариаций солёности с помощью спутниковых данных не представляется возможным, поскольку функционирующие на орбите специализированные микроволновые сенсоры на борту спутника SMAP (*англ.* Soil Moisture Active Passive) и прибор MIRAS (*англ.* Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis) на борту спутника SMOS (*англ.* Soil Moisture and Ocean Salinity) не обладают достаточным для решения этой задачи пространственным разрешением.

В летний период лагунные плюмы в юго-восточной части Балтийского моря часто визуализируются на изображениях видимого диапазона за счёт повышенного содержания фитопланктона (в частности цианобактерий) в водах Калининградского и Куршского заливов. Однако на картах пространственного распределения концентрации хлорофилла *a*, построенных на основе спутниковых данных оптического диапазона, трудно отследить чёткую границу плюма, поскольку интенсивное развитие водорослей происходит в этот период во всей прибрежной зоне моря. В остальное время года выносы выделяются как воды с повышенной мутностью (что особенно характерно для вод р. Вислы). На картах мутности или концентрации полного взвешенного вещества структура плюма выглядит сложнее, область с максимальными значениями более локализована. Однако здесь также возникает проблема пороговых значений, как и в случае солёности.

В наших предыдущих работах показано, что эта проблема может быть решена посредством совместного использования спутниковых данных и результатов синхронных подспутниковых измерений *in situ*. На основе результатов многолетних натурных измерений в районе выноса из Калининградского залива нами был предложен алгоритм для «кластеризации» области, находящейся под влиянием лагунных вод в конкретный момент съёмки. Как правило, наиболее ярко фронтальная граница выражена на подветренной стороне плюма. Вне плюма, даже в нескольких метрах от его границы, значение мутности морской воды практически нулевое. Получив пороговое значение по измерениям на двух ближайших станциях по обе стороны яркого фронтального раздела, можно очертить границу плюма (Назирова и др., 2019). В общем же случае определение границы по спутниковым данным оптического диапазона носит субъективный характер и заведомо завышает площадь плюма.

Площади плюмов, определяемые по данным спутниковой радиолокации с учётом перечисленных выше основных механизмов визуализации плюмов на РЛИ, в среднем оказываются ниже, чем площади плюмов, восстановленные по изображениям видимого диапазона. Наличие существенного радиолокационного контраста на границе плюма делает возможным более точное определение их площади.

Выявляемость плюмов распреснённых вод на морской поверхности на спутниковых изображениях, полученных различными сенсорами

Был определён также коэффициент выявляемости плюмов распреснённых вод на морской поверхности на спутниковых изображениях, полученных различными сенсорами. Под коэффициентом выявляемости будем понимать количество изображений, несущих отчётливые сигнатуры плюмов, в процентах от общего числа изображений, полученных для района интереса. На *рис. 5* представлены коэффициенты выявляемости плюмов на спутниковых РЛИ и на изображениях, цветосинтезированных по данным многоспектральных сенсоров, для трёх районов интереса.

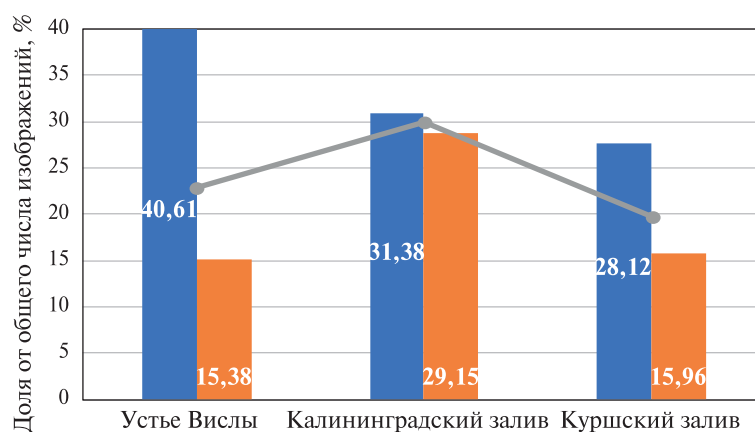


Рис. 5. Коэффициенты выявляемости плюмов на морской поверхности в трёх районах интереса на спутниковых РЛИ (синие столбцы) и изображениях видимого диапазона (оранжевые столбцы). Серые линии показывают общий коэффициент выявляемости плюмов в спутниковых данных как РСА, так и многоспектральных сенсоров

Мы установили, что во всех трёх районах интереса процент выявляемости плюмов на спутниковых РЛИ выше, чем на цветосинтезированных изображениях видимого диапазона. Максимально высоким коэффициентом выявляемости (чуть более 40 %) отличаются РЛИ, полученные в районе устья Вислы. Спутниковые РЛИ участков акватории вблизи Калининградского и Куршского заливов имеют близкие коэффициенты выявляемости (31 и 28 % соответственно). Максимально высокий коэффициент выявляемости плюмов на цветосинтезированных изображениях (чуть больше 29 %) наблюдается в районе Калининградского залива, в то время как выявляемость плюмов, образованных вытоком Вислы и выносами из Куршского залива, примерно одинакова — около 15%. Кроме того, коэффициенты выявляемости плюмов, образованных выносами из Калининградского залива, на РЛИ и цветосинтезированных изображениях близки (примерно 31 и 29 %), что существенно отличается от ситуации для устья Вислы и Куршского залива, где эти коэффициенты отличаются в разы.

Можно утверждать, что совместное использование данных спутниковых РСА и многоспектральных сенсоров оптического диапазона может значительно повысить эффективность дистанционного наблюдения речных и лагунных плюмов на морской поверхности в юго-восточной части Балтийского моря.

Заключение

Проанализированы большие массивы спутниковых изображений морской поверхности трёх тестовых районов юго-восточной части Балтийского моря, полученные с помощью РСА и многоспектральных сенсоров оптического диапазона.

Рассмотрены закономерности и особенности отображения плюмов, образованных стоком р. Вислы, а также выносами из Калининградского и Куршского заливов на РЛИ. Несмотря на то, что радиолокационные сигнатуры плюмов отличаются разнообразием морфологических форм, на основе обобщения результатов проведённого анализа были выделены четыре основных типа их визуализации на РЛИ морской поверхности районов интереса. К ним относятся: 1) плюмы с выраженной границей, видимой как яркая белая линия усиления обратно-рассеянного сигнала; 2) граница плюма очерчена сликами, т. е. тёмными линиями ослабления радиолокационного сигнала; 3) яркие тёмные или светлые области усиления/ослабления радиолокационного сигнала в плюме без формирования выраженного фронта; 4) проявление плюма за счёт трассеров, таких как лёд/скопление биогенных плёнок и т. п.

Рассмотрены типичные примеры радиолокационных сигнатур выносов речных и лагунных вод в море, визуализирующихся на спутниковых РЛИ различных районов интереса за счёт разных механизмов. Для каждого из них установлено, как меняется интенсивность обратно рассеянного сигнала в плюме, на его границе и в области вне плюма.

Проведён статистический анализ, направленный на выявление частоты визуализации плюмов за счёт четырёх описанных выше механизмов, и показано, что в различных тестовых районах определяющую роль в формировании радиолокационных сигнатур плюмов могут играть различные механизмы.

Показано, что для РЛИ наиболее высок коэффициент выявляемости плюмов, образованных вытоком Вислы, а для цветосинтезированных изображений этот коэффициент максимален для плюмов, образованных вытоком из Калининградского залива.

Установлено, что использование данных спутниковой радиолокации может существенно расширить экспериментальную базу исследования распространения речных и лагунных вод в бесприливном море и позволит избавиться от определённой фрагментарности и разрозненности получаемой информации.

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.

Литература

1. *Басс Ф. Г., Фукс И. М.* Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972, 424 с.
2. *Булатов М. Г., Кравцов Ю. А., Лаврова О. Ю. и др.* Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // Успехи физ. наук. 2003. Т. 173. С. 69–87. DOI: 10.3367/UFNr.0173.200301d.0069.
3. *Жуков Л. А.* Общая океанология. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 376 с.
4. *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.
5. *Иванов А. Ю., Хлебников Д. В., Коновалов Б. В. и др.* Особенности отображения выносов рек в Чёрном море в данных дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 191–202. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-191-202.
6. *Лаврова О. Ю., Краюшкин Е. В., Соловьев Д. М., Голенко М. Н., Голенко Н. Н., Калашникова Н. А., Демидов А. Н.* Влияние ветрового воздействия и гидродинамических процессов на распространение вод Калининградского залива в акватории Балтийского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 76–99.
7. *Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г.* Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 334 с.

8. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Уваров И. А. и др. 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.
9. Лаврова О. Ю., Назирова К. Р., Алферьева Я. О. и др. Сопоставление параметров плюмов рек Сулак и Терек на основе спутниковых данных и измерений *in situ* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 264–283. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-264-283.
10. Лазаренко Н. Н., Маевский А. В. Гидрометеорологический режим Вислинского залива. Л.: Гидрометеоиздат. 1971. 279 с.
11. Митягина М. И., Лаврова О. Ю., Жаданова П. Д. Влияние гидродинамических процессов на распространение вод Вислы в Гданьском заливе по данным дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 4. С. 237–250. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-237-250.
12. Назирова К. Р., Краюшкин Е. В. Мониторинг распространения вод Калининградского залива в акватории Гданьского залива (Юго-Восточная Балтика) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2021. Т. 18. № 2. С. 271–284. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-271-284.
13. Назирова К. Р., Лаврова О. Ю., Краюшкин Е. В. и др. Особенности выявления параметров речного плюма контактными и дистанционными методами // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 227–243. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-227-243.
14. Назирова К. Р., Лаврова О. Ю., Алферьева Я. О. и др. Пространственно-временная изменчивость плюмов рек Терек и Сулак по спутниковым данным и синхронным натурным измерениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 285–303. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-285-303.
15. Осадчиев А. А. Речные плюмы. М.: Научный мир, 2021. 285 с.
16. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2: Случайные поля. М.: Наука, 1978. 463 с.
17. Уваров И. А., Халикова О. А., Балашов И. В., Бурцев М. А., Лупян Е. А., Матвеев А. А., Платонов А. Е., Прошин А. А., Толпин В. А., Крашенинникова Ю. С. Организация работы с метеорологической информацией в информационных системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 30–45.
18. Ayad M., Li J., Holt B. et al. Analysis and classification of stormwater and wastewater runoff from the Tijuana River using remote sensing imagery // *Frontiers in Environmental Science*. 2020. V. 8. Article 599030. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.599030>.
19. Chubarenko B., Margonski P. The Vistula Lagoon // *Ecology of Baltic Coastal Waters*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. P. 167–195. DOI: 10.1007/978-3-540-73524-3_8.
20. Constantin S., Doxaran D., Constantinescu S. Estimation of water turbidity and analysis of its spatio-temporal variability in the Danube River plume (Black Sea) using MODIS satellite data // *Continental Shelf Research*. 2016. V. 112. P. 14–30. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.11.009>.
21. Cresswell G. R., Tildesley P. C. Detecting tropical river plumes and island wakes with Radarsat // *Canadian J. Remote Sensing*. 2000. V. 26. No. 4. P. 267–272. DOI: 10.1080/07038992.2000.10874777.
22. Devlin M. J., Petus C., da Silva E. et al. Water quality and river plume monitoring in the great barrier reef: An overview of methods based on ocean colour satellite data // *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7. P. 12909–12941. <https://doi.org/10.3390/rs71012909>.
23. Dokken S. T., Wahl T. Observations of spiral eddies along the Norwegian Coast in ERS SAR images. FFI Report 96/01463. 1996. <http://hdl.handle.net/20.500.12242/1449>.
24. Doxaran D., Froidefond J.-M., Castaing P. et al. Dynamics of the turbidity maximum zone in a macrotidal estuary (the Gironde, France): Observations from field and MODIS satellite data // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2009. V. 81. P. 321–332. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.11.013>.
25. Espedal H. A., Johannessen O. M., Johannessen J. A. et al., COASTWATCH'95: A tandem ERS-1/2 SAR detection experiment of natural film on the ocean surface // *J. Geophysical Research*. 1998. V. 103. P. 24969–24982. DOI: 10.1029/98JC01660.
26. Garvine R. W. Physical features of the Connecticut River outflow during high discharge // *J. Geophysical Research*. 1974. V. 79. P. 831–846. <https://doi.org/10.1029/JC079i006p00831>.
27. Garvine R. W., Monk J. D. Frontal structure of a river plume // *J. Geophysical Research*. 1974. V. 79. P. 2251–2259. <https://doi.org/10.1029/JC079i015p02251>.
28. Gernez P., Lafon V., Lerouxel A. et al. Toward Sentinel-2 high resolution remote sensing of suspended particulate matter in very turbid waters: SPOT4 (Take5) Experiment in the Loire and Gironde Estuaries // *Remote Sensing*. 2015. V. 7. P. 9507–9528. DOI: 10.3390/rs70809507.

29. Hessner K., Rubino A., Brandt P., Alpers W. The Rhine outflow plume studied by the analysis of synthetic aperture RADAR data and numerical simulations // *J. Physical Oceanography*. 2001. V. 31. No. 10. P. 3030–3044. DOI: 10.1175/1520-0485(2001)031<3030:TROPSB>2.0.CO;2.
30. Horner-Devine A. R., Hetland R. D., MacDonald D. G. Mixing and transport in coastal river plumes // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2015. V. 47. P. 569–594. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010313-141408>.
31. Jakimavičius D., Kriaučiūnienė J., Šarauskienė D. Assessment of wave climate and energy resources in the Baltic Sea nearshore (Lithuanian territorial water) // *Oceanologia*. 2018. V. 60. No. 2. P. 207–218. DOI: 10.1016/j.oceano.2017.10.004.
32. Jay D. A., Pan J., Orton P. M. et al. Asymmetry of Columbia River tidal plume fronts // *J. Marine Systems*. 2009. V. 78. No. 3. P. 442–459. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.11.015>.
33. Jiang L., Yan X-H., Klemas V. Remote sensing for the identification of coastal plumes: case studies of Delaware Bay // *Intern. J. Remote Sensing*. 2009. V. 30. P. 2033–2048. <https://doi.org/10.1080/01431160802549211>.
34. Kao T. W., Park C., Pao H. P. Buoyant surface discharge and small-scale oceanic fronts: a numerical study // *J. Geophysical Research*. 1977. V. 82. P. 1747–1752. <https://doi.org/10.1029/JC082i012p01747>.
35. Klemas V. Remote sensing of coastal plumes and ocean fronts: Overview and case study // *J. Coastal Research*. 2012. V. 28. No. 1A. P. 1–7. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00025.1>.
36. Kostianoy A. G., Lebedev A., Solovyov D. M. et al. On river plumes along the Turkish coast of the Black Sea // *Ecologica Montenegrina*. 2019. V. 25. P. 63–78. DOI: 10.37828/em.2019.25.7.
37. Krayushkin E. V., Lavrova O. Yu., Nazirova K. R. Distinctive features of the Vistula Lagoon outflow by remote sensing and oceanographic experiments data // *Proc. Conf. “Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2019”*. 2019. V. 11150. Article 111500W. <https://doi.org/10.1117/12.2533024>.
38. Lavrova O., Krayushkin E., Golenko M. et al. Effect of wind and hydrographic conditions on the transport of Vistula Lagoon waters into the Baltic Sea: Results of a combined experiment // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2016. V. 9. No. 9. P. 5193–5201. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2580602.
39. Li C., Li X., Zhang G. et al. Estuarine plume: A case study by satellite SAR observations and in situ measurements // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2017. V. 55. P. 2276–2287. DOI: 10.1109/TGRS.2016.2641161.
40. Lyzenga D. R. Interaction of short surface and electromagnetic waves with ocean fronts // *J. Geophysical Research*. 1991. V. 96. P. 10765–10772. <https://doi.org/10.1029/91JC00900>.
41. Lyzenga D. R. Effects of intermediate-scale waves on radar signatures of ocean fronts and internal waves // *J. Geophysical Research*. 1998. V. 103. P. 18759–18768. <https://doi.org/10.1029/98JC01189>.
42. Miller R. L., McKee B. A. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters // *Remote Sensing Environment*. 2004. V. 93. P. 259–266. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.07.012>.
43. Osadchiv A. A., Sedakov R. O. Spreading dynamics of small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea observed by Landsat-8 and Sentinel-2 // *Remote Sensing of Environment*. 2019. V. 221. P. 522–533. DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.043.
44. Osadchiv A., Yankovsky A. Editorial: River plumes and estuaries // *Frontiers in Marine Science*. 2022. V. 9. DOI: 10.3389/fmars.2022.986114.
45. Sletten M., Marmorino G. O., Donato T. F. An airborne, real aperture radar study of the Chesapeake Bay outflow plume // *J. Geophysical Research*. 1999. V. 104. No. C1. P. 1211–1222. <https://doi.org/10.1029/1998JC900034>.
46. Szymkiewicz R. Hydrodynamics of Vistula Lagoon. Warsaw: Polish Academy of Sciences, 1992. 332 p. (in Polish).
47. Tavora J., Gonçalves G. A., Fernandes E. H. et al. Detecting turbid plumes from satellite remote sensing: State-of-art thresholds and the novel PLUMES algorithm // *Frontiers in Marine Science*. 2023. V. 10. DOI: 10.3389/fmars.2023.1215327.
48. Umgiesser G., Zemlys P., Erturk A. et al. Seasonal renewal time variability in the Curonian Lagoon caused by atmospheric and hydrographical forcing // *Ocean Science*. 2016. V. 12. P. 391–402. <https://doi.org/10.5194/os-12-391-2016>.
49. Vogelzang J., Ruddick K. G., Moens J. B. On the signatures of river outflow fronts in radar imagery // *Intern. J. Remote Sensing*. 1997. V. 18. P. 3479–3505.
50. Warrick J. A., Mertes L. A. K., Siegel D. A. et al. Estimating suspended sediment concentrations in turbid coastal waters of the Santa Barbara Channel with SeaWiFS // *Intern. J. Remote Sensing*. 2004. V. 25. P. 1995–2002. <https://doi.org/10.1080/01431160310001619535>.
51. Žaromskis R. Okeanai, jūros, estuarijos (Oceans, seas, estuaries). Vilnius: Debesija, 1996, 278 p. (in Lithuanian).

52. Zhang X., Twarog E. M., McLaughlin D. J. et al. Radar scattering behavior of estuarine outflow plumes // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2004. V. 42. No. 2. P. 367–379. DOI: 10.1109/TGRS.2003.821056.
53. Zheng Q., Clemente-Colon P., Yan X.-H. et al. Satellite synthetic aperture radar detection of Delaware Bay plumes: Jet-like feature analysis // J. Geophysical Research. 2004. V. 109. No. C3. P. C03031.1–C03031.11. DOI: 10.1029/2003JC002100.

Feasibility of satellite radar observation of river and lagoon plumes in the southeastern Baltic Sea

M. I. Mityagina, O. Yu. Lavrova

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: mityag@iki.rssi.ru

The article considers the features of manifestation of coastal plumes formed by the Vistula outflow and the outflow of waters from the Kaliningrad and Curonian Lagoons in the coastal zone of the southeastern Baltic Sea in satellite radar images of the sea surface. The experimental basis for the study was satellite data obtained for the three areas of interest from May 1, 2022, to April 30, 2024, using synthetic aperture radars C-SAR of the Sentinel-1A, -1B satellites. The study also involved the data from multi-spectral sensors in the visible range — MSI (Multispectral Instrument) of the Sentinel-2A, -2B satellites and the scanning radiometer OLI (Operational Land Image) of the Landsat-8, -9 satellites accumulated over the same period. We analyzed coastal plumes' SAR signatures distinguished by various morphological forms. Summarizing the results of the analysis, we identified and described four primary mechanisms of plume visualization in radar images of the Baltic Sea surface: plumes with a pronounced boundary visible as a line of sharp increase of the backscattered signal; plumes with a boundary outlined by slicks; areas of amplification/weakening of the radar signal in a plume without formation of a pronounced front; plume manifestation due to tracers, such as ice/accumulation of biogenic films. In the paper, we provide estimates of relative contribution of these mechanisms to the formation of radar signatures of plumes in each of the three test areas. We also discuss plume area determination accuracy based on various satellite data. The paper emphasizes the importance of using satellite SAR data to obtain detailed information on the spatial variability of river and lagoon water distribution in the test areas.

Keywords: satellite remote sensing, sea surface, satellite radar, SAR, satellite optical data, river outflows, plume of fresh water, surface films, Baltic Sea

Accepted: 06.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-288-305

References

1. Bass F. G., Fuks M., *Wave Scattering from Statistically Rough Surfaces*, New York: Pergamon Press, 1979, 527 p.
2. Bulatov M. G., Kravtsov Yu. A., Lavrova O. Yu. et al., Physical mechanisms of aerospace radar imaging of the ocean, *Physics Uspekhi*, 2003, Vol. 46, No. 1, pp. 63–79, <https://doi.org/10.1070/pu2003v046n01abeh001114/>.
3. Zhukov L. A., *Obshchaya okeanologiya* (General oceanology), L.: Gidrometeoizdat, 1976, 376 p. (in Russian).
4. 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, Vol. 54, No. 3, pp. 265–280, DOI: 10.1134/S0001437014030151.
5. Ivanov A. Yu., Khlebnikov D. V., Konovalov B. V. et al., Manifestations of river outflows in the Black Sea in remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 5, pp. 191–202 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-191-202.

6. Lavrova O. Yu., Krayushkin E. V., Soloviev D. M., Golenko M. N., Golenko N. N., Kalashnikova N. A., Demidov A. N., Influence of wind and hydrodynamic processes on propagation of the Vistula lagoon waters into the Baltic Sea, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 76–99 (in Russian).
7. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., *Sputnikovye metody vyyavleniya i monitoringa zon ekologicheskogo riska morskikh akvatorii* (Satellite methods for detecting and monitoring marine zones of ecological risk), Moscow: IKI RAS, 2016, 334 p. (in Russian).
8. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Uvarov I. A. et al., Current capabilities and experience of using the Sea information system for studying and monitoring phenomena and processes on the sea surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 266–287 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
9. Lavrova O. Yu., Nazirova K. R., Alferyeva Ya. O. et al., Comparison of plume parameters of the Sulak and Terek rivers based on satellite data and in situ measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 5, pp. 264–283 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-264-283.
10. Lazarenko N. N., Majewski A. V., *Gidrometeorologicheskij rezhim Vislinskogo zaliva* (Hydrometeorological System of the Vistula Lagoon), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1971, 279 p. (in Russian).
11. Mityagina M. I., Lavrova O. Yu., Zhadanova P. D., The influence of hydrodynamic processes on the distribution of Vistula River waters in the Gulf of Gdansk as seen in remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, Vol. 21, No. 4, pp. 237–250 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-237-250.
12. Nazirova K. R., Krayushkin E. V., Monitoring the spread of the Kaliningrad Bay waters in the Gulf of Gdansk (South-East Baltic), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 2, pp. 271–284 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-271-284.
13. Nazirova K. R., Lavrova O. Yu., Krayushkin E. V. et al., Features of river plume parameter determination by in situ and remote sensing methods, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 227–243 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-227-243.
14. Nazirova K. R., Lavrova O. Yu., Alferyeva Ya. O. et al., Spatiotemporal plume variability of Terek and Sulak rivers from satellite data and concurrent in situ measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 5, pp. 285–303 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-285-303.
15. Osadchiev A. A., *Rechnye plyумы* (River plumes), Moscow: Nauchnyi mir, 2021, 285 p. (in Russian).
16. Rytov S. M., Kravtsov Yu. A., Tatarskii V. I., *Principles of statistical radiophysics: wave propagation through random media*, Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1989, 365 p.
17. Uvarov I. A., Khalikova O. A., Balashov I. V., Burtsev M. A., Loupian E. A., Matveev A. M., Platonov A. E., Proshin A. A., Tolpin V. A., Krashenninnikova Yu. S., Meteorological data management in framework of the satellite monitoring information systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 2, pp. 30–45 (in Russian).
18. Ayad M., Li J., Holt B. et al., Analysis and classification of stormwater and wastewater runoff from the Tijuana River using remote sensing imagery, *Frontiers in Environmental Science*, 2020, Vol. 8, Article 599030, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.599030>.
19. Chubarenko B., Margonski P., The Vistula Lagoon, In: *Ecology of Baltic Coastal Waters*, Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, pp. 167–195, DOI: 10.1007/978-3-540-73524-3_8.
20. Constantin S., Doxaran D., Constantinescu S., Estimation of water turbidity and analysis of its spatio-temporal variability in the Danube River plume (Black Sea) using MODIS satellite data, *Continental Shelf Research*, 2016, Vol. 112, pp. 14–30, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.11.009>.
21. Cresswell G. R., Tildesley P. C., Detecting tropical river plumes and island wakes with Radarsat, *Canadian J. Remote Sensing*, 2000, Vol. 26, No. 4, pp. 267–272, DOI: 10.1080/07038992.2000.10874777.
22. Devlin M. J., Petus C., da Silva E. et al., Water quality and river plume monitoring in the great barrier reef: An overview of methods based on ocean colour satellite data, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, pp. 12909–12941, <https://doi.org/10.3390/rs71012909>.
23. Dokken S. T., Wahl T., *Observations of spiral eddies along the Norwegian Coast in ERS SAR images, FFI Report 96/01463*, 1996, <http://hdl.handle.net/20.500.12242/1449>.
24. Doxaran D., Froidefond J.-M., Castaing P. et al., Dynamics of the turbidity maximum zone in a macrotidal estuary (the Gironde, France): Observations from field and MODIS satellite data, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, Vol. 81, pp. 321–332, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.11.013>.
25. Espedal H. A., Johannessen O. M., Johannessen J. A. et al., COASTWATCH'95: A tandem ERS-1/2 SAR detection experiment of natural film on the ocean surface, *J. Geophysical Research*, 1998, Vol. 103, pp. 24969–24982, DOI: 10.1029/98JC01660.
26. Garvine R. W., Physical features of the Connecticut River outflow during high discharge, *J. Geophysical Research*, 1974, Vol. 79, pp. 831–846, <https://doi.org/10.1029/JC079i006p00831>.

27. Garvine R. W., Monk J. D., Frontal structure of a river plume, *J. Geophysical Research*, 1974, Vol. 79, pp. 2251–2259, <https://doi.org/10.1029/JC079i015p02251>.
28. Gernez P., Lafon V., Lerouxel A. et al., Toward Sentinel-2 high resolution remote sensing of suspended particulate matter in very turbid waters: SPOT4 (Take5) Experiment in the Loire and Gironde Estuaries, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, pp. 9507–9528, DOI: 10.3390/rs70809507.
29. Hessner K., Rubino A., Brandt P., Alpers W., The Rhine outflow plume studied by the analysis of synthetic aperture RADAR data and numerical simulations, *J. Physical Oceanography*, 2001, Vol. 31, No. 10, pp. 3030–3044, DOI: 10.1175/1520-0485(2001)031<3030:TROPSB>2.0.CO;2.
30. Horner-Devine A. R., Hetland R. D., MacDonald D. G., Mixing and transport in coastal river plumes, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2015, Vol. 47, pp. 569–594, <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010313-141408>.
31. Jakimavičius D., Kriaučiūnienė J., Šarauskiene D., Assessment of wave climate and energy resources in the Baltic Sea nearshore (Lithuanian territorial water), *Oceanologia*, 2018, Vol. 60, No. 2, pp. 207–218, DOI: 10.1016/j.oceano.2017.10.004.
32. Jay D. A., Pan J., Orton P. M. et al., Asymmetry of Columbia River tidal plume fronts, *J. Marine Systems*, 2009, Vol. 78, No. 3, pp. 442–459, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.11.015>.
33. Jiang L., Yan X.-H., Klemas V., Remote sensing for the identification of coastal plumes: case studies of Delaware Bay, *Intern. J. Remote Sensing*, 2009, Vol. 30, pp. 2033–2048, <https://doi.org/10.1080/01431160802549211>.
34. Kao T. W., Park C., Pao H. P., Buoyant surface discharge and small-scale oceanic fronts: a numerical study, *J. Geophysical Research*, 1977, Vol. 82, pp. 1747–1752, <https://doi.org/10.1029/JC082i012p01747>.
35. Klemas V., Remote sensing of coastal plumes and ocean fronts: Overview and case study, *J. Coastal Research*, 2012, Vol. 28, No. 1A, pp. 1–7, <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00025.1>.
36. Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Solovyov D. M. et al., On river plumes along the Turkish coast of the Black Sea, *Ecologica Montenegrina*, 2019, Vol. 25, pp. 63–78, DOI: 10.37828/em.2019.25.7.
37. Krayushkin E. V., Lavrova O. Yu., Nazirova K. R., Distinctive features of the Vistula Lagoon outflow by remote sensing and oceanographic experiments data, *Proc. Conf. "Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2019"*, 2019, Vol. 11150, Article 111500W, <https://doi.org/10.1117/12.2533024>.
38. Lavrova O., Krayushkin E., Golenko M. et al., Effect of wind and hydrographic conditions on the transport of Vistula Lagoon waters into the Baltic Sea: Results of a combined experiment, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, Vol. 9, Issue 9, pp. 5193–5201, DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2580602.
39. Li C., Li X., Zhang G. et al., Estuarine plume: A case study by satellite SAR Observations and in situ measurements, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2017, Vol. 55, pp. 2276–2287, DOI: 10.1109/TGRS.2016.2641161.
40. Lyzenga D. R., Interaction of short surface and electromagnetic waves with ocean fronts, *J. Geophysical Research*, 1991, Vol. 96, pp. 10765–10772, <https://doi.org/10.1029/91JC00900>.
41. Lyzenga D. R., Effects of intermediate-scale waves on radar signatures of ocean fronts and internal waves, *J. Geophysical Research*, 1998, Vol. 103, pp. 18759–18768, <https://doi.org/10.1029/98JC01189>.
42. Miller R. L., McKee B. A., Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters, *Remote Sensing Environment*, 2004, Vol. 93, pp. 259–266, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.07.012>.
43. Osadchiv A. A., Sedakov R. O., Spreading dynamics of small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea observed by Landsat-8 and Sentinel-2, *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 221, pp. 522–533, DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.043.
44. Osadchiv A., Yankovsky A., Editorial: River plumes and estuaries, *Frontiers in Marine Science*, 2022, Vol. 9, DOI: 10.3389/fmars.2022.986114.
45. Sletten M., Marmorino G. O., Donato T. F., An airborne, real aperture radar study of the Chesapeake Bay outflow plume, *J. Geophysical Research*, 1999, Vol. 104, No. C1, pp. 1211–1222, <https://doi.org/10.1029/1998JC900034>.
46. Szymkiewicz R., *Hydrodynamics of Vistula Lagoon*, Warsaw: Polish Academy of Sciences, 1992, 332 p. (in Polish).
47. Tavora J., Gonçalves G. A., Fernandes E. H. et al., Detecting turbid plumes from satellite remote sensing: State-of-art thresholds and the novel PLUMES algorithm, *Frontiers in Marine Science*, 2023, Vol. 10, DOI: 10.3389/fmars.2023.1215327.
48. Umgiesser G., Zemlys P., Erturk A. et al., Seasonal renewal time variability in the Curonian Lagoon caused by atmospheric and hydrographical forcing, *Ocean Science*, 2016, Vol. 12, pp. 391–402, <https://doi.org/10.5194/os-12-391-2016>.
49. Vogelzang J., Ruddick K. G., Moens J. B., On the signatures of river outflow fronts in radar imagery, *Intern. J. Remote Sensing*, 1997, Vol. 18, pp. 3479–3505.

50. Warrick J.A., Mertes L.A.K., Siegel D.A. et al., Estimating suspended sediment concentrations in turbid coastal waters of the Santa Barbara Channel with SeaWiFS, *Intern. J. Remote Sensing*, 2004, Vol. 25, pp. 1995–2002, <https://doi.org/10.1080/01431160310001619535>.
51. Žaromskis R., *Okeanai, jūros, estuarijos* (Oceans, seas, estuaries). Vilnius: Debesija, 1996, 278 p. (in Lithuanian).
52. Zhang X., Twarog E.M., McLaughlin D.J. et al., Radar scattering behavior of estuarine outflow plumes, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2004, Vol. 42, No. 2, pp. 367–379, DOI: 10.1109/TGRS.2003.821056.
53. Zheng Q., Clemente-Colon P., Yan X.-H. et al., Satellite synthetic aperture radar detection of Delaware Bay plumes: Jet-like feature analysis, *J. Geophysical Research*, 2004, Vol. 109, No. C3, pp. C03031.1–C03031.11, DOI: 10.1029/2003JC002100.