

Использование данных спутниковой альтиметрии для оценки условий наблюдения на радиолокационных изображениях выносов из Калининградского и Куршского заливов

М. В. Врублевский, О. Ю. Лаврова, М. И. Митягина, А. Н. Якушева

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: vrublevsky@d902.iki.rssi.ru*

Выносы из заливов, таких как Калининградский и Куршский, оказывают существенное влияние на гидрохимические и гидробиологические процессы прибрежной зоны Балтийского моря. Они являются важными объектами наблюдения как с помощью традиционных гидрологических измерений, так и с помощью данных дистанционного зондирования Земли. Мониторинг выносов с помощью данных спутниковых оптических сенсоров нашёл широкое распространение, но они могут быть сильно разрежены по времени из-за облачности. Чтобы дополнить ряд наблюдений, можно применять радиолокационные изображения. Для этого необходимо понимать механизмы проявления выносов на них и условия, благоприятствующие их возникновению. Одно из таких условий — наличие течений в проливах, возникающих между заливом и морем в результате разницы уровня. Целью данной работы стала разработка метода оценки условий наблюдения выносов на радиолокационных изображениях на основе данных спутниковой радиолокационной альтиметрии исследуемых заливов и Балтийского моря. В работе приводятся результаты сопоставления наблюдений зарегистрированных выносов с соотношением уровня заливов и моря, а также даётся оценка применимости предложенной методики и анализ возможности её расширения с помощью использования данных о расходе рек, впадающих в исследуемые заливы.

Ключевые слова: спутниковая альтиметрия, вынос из залива, SAR-C Sentinel-1, SRAL Sentinel-3, Куршский залив, Калининградский залив, Балтийское море

Одобрена к печати: 12.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-306-320

Введение

Исследованию процессов распространения в море речных вод и вод из заливов уделяется большое внимание во всём мире, поскольку эти процессы играют существенную роль в формировании гидрологических, гидрохимических и гидробиологических условий прибрежных зон. Основные теоретические результаты изложены в работах (Лисицын, 1994; McClimans, 1988). Экспериментальные исследования распространения речных вод в море в основном проводятся традиционными океанографическими средствами, что обуславливает трудоёмкость и дороговизну эксперимента, причём измерения, как правило, проводятся в ограниченные промежутки времени. С началом использования данных спутникового дистанционного зондирования для исследования процессов в морях и океанах было показано, что на основе анализа этих данных можно получать информацию о пространственных характеристиках проявлений выносов распреснённых вод, восстанавливать информацию об их форме, площади, направлении распространения, наличии/отсутствии фронтальной границы и пр. (Devlin et al., 2015; Dzwonkowski, Yan, 2005; Hopkins et al., 2013; Johnson et al., 2001; Lavrova et al., 2016; Osadchiev, Sedakov, 2019). Список подобных работ может быть существенно продолжен. Общепринятый на сегодняшний день подход к наблюдению выносов распреснённых вод, основанный на использовании данных спутниковых сенсоров оптического диапазона, имеет существенные ограничения и явно недостаточен для решения этой задачи. Эти ограничения особенно ярко проявляются в условиях сплошной облачности и сильных осадков, приводящих к интенсификации речного стока и, соответственно, к интенсификации динамических процессов и распространения загрязнений в прибрежной зоне. Исследованиям,

рающимися на данные только оптических сенсоров, зачастую недостаёт наиболее актуальной и необходимой для построения прогнозов информации. Использование данных спутниковой радиолокации может существенно расширить экспериментальную базу для изучения распространения речных и лагунных выносов и позволит избавиться от фрагментарности и разрозненности получаемой информации. Но для этого необходимо понимание механизмов формирования радиолокационных сигнатур выносов и развитие методик использования и интерпретации радиолокационных данных применительно к изучению этих процессов. Методы спутниковой радиолокации применяются для исследования процессов распространения речных вод в море (Horner-Devine et al., 2009; Jay et al., 2010; Li et al., 2017; Zhang et al., 2004), но в первую очередь для морей с выраженными приливами. Сведения о радиолокационных наблюдениях распространения речных и лагунных вод в морях без приливов практически отсутствуют, отметим только следующие работы (Иванов и др., 2018; Митягина, Лаврова, 2024). В последней работе рассмотрены особенности проявления на спутниковых радиолокационных изображениях (РЛИ) морской поверхности распредельных плумов, образованных вытоком р. Вислы и выносами вод Калининградского и Куршского заливов в юго-восточной части Балтийского моря. На основе обобщения результатов проведённого анализа выявлены и описаны четыре основных механизма визуализации плумов на РЛИ поверхности Балтийского моря (Митягина, Лаврова, 2024).

Между Балтийским морем и Куршским и Калининградским заливами происходит активный водообмен, вызываемый разными причинами, в первую очередь разницей в уровне в заливах и в море, которая обусловлена, например, активным стоком рек или ветровыми сгонами и нагонами (Килесо, Стонт, 2020; Чуринов и др., 2019; Jakimavičius et al., 2018). Цель представляемой в статье работы заключается в нахождении связи проявляемости выносов из Куршского и Калининградского заливов в Балтийское море с разницей в аномалиях уровня в заливах и в море на основе спутниковых альтиметрических и радиолокационных данных.

Районы интереса

Калининградский (Вислинский) и Куршский заливы находятся в юго-восточной части Балтийского моря. На спутниковых изображениях, полученных на эти районы, регулярно наблюдаются характерные структуры, связанные с выносами из этих заливов (Закиров и др., 2022; Лаврова и др., 2014; Митягина, Лаврова, 2024; Назирова, Краюшкин, 2021; Lavrova et al., 2016).

Куршский залив — это мелководная полузамкнутая пресноводная лагуна, отделённая от Балтийского моря песчаной Куршской косой (рис. 1а, см с. 308). Залив является крупнейшей прибрежной мелководной лагуной Европы. Его площадь около 1584 км², средняя глубина — 3,8 м. В северной части Куршский залив соединяется с Балтийским морем через узкий Клайпедский пролив, который характеризуется большой техногенной и антропогенной нагрузкой. В залив впадают реки Неман (Нямунас), Скирвит, Амата, Матросовка, Гилия, Дейма. Многочисленные ручьи и реки, впадающие в залив, обеспечивают ежегодный приток воды, который в 3,5 раза превышает его текущий объём. 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; Umgieser et al., 2016). Основное влияние на циркуляцию воды в Куршском заливе оказывают сток реки Неман и направление ветра (Gasiūnaitė et al., 2008). Движение воды с юга на север происходит из-за стока реки Неман и разницы в уровне воды между лагуной и морем, и это течение простирается от дельты реки до Клайпедского пролива. Ежегодно в лагуну поступает около 22 км³ пресной воды в виде речного стока (Jakimavičius et al., 2018). Куршский залив сильно эвтрофирован, что является серьёзной экологической проблемой, наравне с нефтяным загрязнением в крупном порту Клайпеда.

Калининградский (Вислинский) залив расположен на юго-востоке Балтийского моря и отделён от Гданьского залива Вислинской косой (рис. 1б, см. с. 308). Он представляет

собой почти замкнутый водоём, в который впадает ряд рек, таких как Нogat (правый рукав дельты Вислы), Преголя, Прохладная и другие. Основной приток пресной воды обеспечивают река Преголя и два рукава Вислы. В устьевой части Преголя имеет дельту, образованную двумя рукавами: левый длиной 56 км — это сама река Преголя, а правый — река Дейма длиной 37 км. Река Дейма принимает около 40 % речного стока и несёт свои воды не в Калининградский, а в Куршский залив Балтийского моря. Балтийский пролив — единственное соединение лагуны с Гданьским заливом Балтийского моря в северной части, через которое морская вода может попадать в лагуну, а лагунные воды — в открытое море. Ширина пролива достигает 400 м, длина — 2 км, средняя глубина — 8,8 м.



а



б

Рис. 1. Исследуемый район: а — Куршский залив; б — Калининградский залив. Подложка — фрагменты цветосинтезированных изображений в естественных цветах сенсора MSI (англ. Multispectral Instrument) спутника Sentinel-2B 16.05.2024 в 09:55:09 GMT (англ. Greenwich Mean Time)

На гидрологический режим Вислинского залива влияют колебания уровня Балтийского моря и речные стоки (Chubarenko, Margonski, 2008). Уровень воды в Вислинском заливе всего на 5–8 см выше, чем средний уровень воды в Балтийском море. Относительный уровень лагуны оценивается в $1,0 \pm 0,3$ м (по сравнению с минимальным уровнем воды) с колебаниями от 0,7 до 1,3 м (Есюкова, 2013). Таким образом, морская вода может легко поступать в лагуну. Форма лагуны позволяет развивать значительные колебания уровня воды под действием ветра, а сила и направление преобладающих ветров определяют характер течений в лагуне. Северные и северо-западные ветры нагоняют воду в лагуну и вызывают прибрежное течение против часовой стрелки. Напротив, южные и юго-восточные ветры вызывают циркуляцию воды по часовой стрелке, в результате чего водные массы вытекают из лагуны через Балтийский пролив (Chubarenko, Margonski, 2008). Статистический анализ количества притока морской воды и оттока воды из лагуны показывает, что однонаправленные притоки и оттоки составляют 74,9 %, 11,7 % приходится на двухслойные обменные потоки (приток в придонном слое и отток в приповерхностном слое) и 13,4 % — на двунаправленные потоки туда и обратно (Chubarenko, Margonski, 2008).

Основной экологической проблемой Вислинского залива становится сильное эвтрофирование (Kahru, Elmgren, 2014), обусловленное большой площадью водосбора и ограниченным водообменом с Балтийским морем. Скопления цианобактерий хорошо различимы на спутниковых снимках видимого диапазона (Rud, Gade, 1999). Это позволяет отслеживать распространение вод лагун, богатых цианобактериями, в открытое Балтийское море (Лаврова и др., 2016). Как показали наши исследования (Митягина, Лаврова, 2024), вынос из Калининградского (Вислинского) залива проявляется и на спутниковых радиолокационных изображениях (РЛИ).

Материалы и методы

Спутниковая альтиметрия

Метод спутниковой альтиметрии активно используется для изучения высоты морской поверхности уже несколько десятков лет. Высота поверхности определяется на основе измерения времени распространения сигнала от альтиметра до поверхности и обратно. Измерения обычно корректируются поправками, чтобы учесть инструментальные ошибки, возмущения окружающей среды (рассеяние и поглощение сигнала в атмосфере), влияние состояния океана, приливов (включая океанический, земной и полюсный приливы), атмосферное давление (Лебедев, Костяной, 2005).

Зная высоту орбиты спутника, состояние окружающей среды и измеренное расстояние от спутника до поверхности, можно определить высоту морской поверхности SSH (*англ.* Sea Surface Height) относительно референц-эллипсоида по следующей формуле:

$$\text{SSH} = \text{alt} - (\text{range} + \text{corr}),$$

где alt — высота орбиты спутника над опорным эллипсоидом; range — измеренное альтиметром расстояние от спутника до поверхности; corr — поправки, вводимые для учёта влияния окружающей среды, определяемые на основе измерений спутника и по различным моделям (<https://ggos.org/item/sea-surface-heights/>).

На основе SSH определяется ещё одна важная переменная — аномалия уровня моря SLA (*англ.* Sea Level Anomalies). Она описывает разницу между фактической и средней высотой морской поверхности MSSH (*англ.* Mean Sea Surface Height) (<https://openadb.dgfi.tum.de/en/products/sea-level-anomalies/>). Средняя высота поверхности моря определяется как среднее за 20 лет значение высоты морской поверхности относительно опорного эллипсоида, вычисленное на регулярной сетке на основе данных всех альтиметрических миссий. Таким образом, аномалии уровня моря вычисляются по формуле:

$$\text{SLA} = \text{SSH} - \text{MSSH}.$$

Подготовка и распространение продукта, содержащего данные аномалий уровня на основе измерений спутниковой альтиметрии, осуществляется французским Центром архивных данных спутниковых миссий альтиметрии AVISO (*англ.* Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data, <https://www.aviso.altimetry.fr>).

Центр предоставляет данные SLA двух типов: интерполированные в узлы регулярной сетки и вдольтрековые измерения. В данной работе решено использовать вторые. Это связано с тем, что пространственное разрешение регулярной сетки недостаточно для изучения исследуемых заливов, при этом для этих водоёмов вдольтрековые продукты содержат сразу несколько измерений за один пролёт, что повышает точность вычислений.

В качестве такого набора данных использован продукт Along-track Sea Level Anomalies Level-2+ (L2P) (<https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/sea-surface-height-products/global/along-track-sea-level-anomalies-l2p.html>). Файлы L2P содержат результаты измерения вдоль трека и включают время измерений, аномалии уровня моря, информацию о достоверности данных, а также переменные, которые были необходимы для вычисления аномалий уровня моря (расстояние от спутника до поверхности, высота орбиты, поправки). Измерения в таких продуктах ведутся только для морских поверхностей. Также такие данные не являются кросс-калиброванными в точках пересечения треков различных альтиметрических миссий, что требует дальнейшей обработки (https://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/data/tools/hdbk_L2P_S3_S6.pdf).

Архив AVISO предоставляет данные от почти всех текущих современных миссий. Но как показал анализ соответствующих исследуемому району продуктов, только продукты миссии Sentinel-3 — европейской спутниковой миссии по изучению океана, суши, атмосферы и чрезвычайных ситуаций (<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/copernicus/sentinel-3>) — содержат измерения над рассматриваемыми заливами.

На основе данных Sentinel-3 AVISO предоставляет данные SLA не только для морей, но и для исследуемых заливов (по данным других спутников, например Sentinel-6, Jason-2/3, вычисления SLA для этих заливов не ведутся). Поэтому в работе использованы данные миссии Sentinel-3, два спутника которой находятся на орбите с 2016 и 2018 г. соответственно и имеют период повторного наблюдения 27 дней.

На спутниках Sentinel-3 установлены альтиметры SRAL (*англ.* Synthetic aperture Radar Altimeter), характеристики которых представлены в *табл. 1*. Информация взята с сайта <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s3-altimetry-instruments#S3AltimetryInstruments-SRALInstrumentDescriptionS3-Altimetry-Instrument-SRAL-Description>.

Таблица 1. Основные характеристики альтиметра SRAL

Полное название	Synthetic aperture radar altimeter, радиолокационный альтиметр с синтезированной апертурой
Частота (диапазон)	13,575 ГГц (Ku), 5,41 ГГц (C)
Частота повторения импульсов	78,5 Гц
Длительность импульса	48,95 мкс
Разрешение	~0,33 км

Пользователям предоставляются три различных орбитальных продукта, отличающихся по оперативности и точности. В качестве оценки точности приведём целевую остаточную сумму квадратов высоты морской поверхности SSH для каждого типа продукта (https://esamultimedia.esa.int/docs/GMES/GMES_Sentinel3_MRD_V2.0_update.pdf):

- NRT (*англ.* Near Real Time) — почти в реальном времени, RSS (*англ.* Secure Shell, безопасная оболочка) SSH — 10 см;
- STC (*англ.* Short Time Critical) — промежуточный, 4,6 см;
- NTC (*англ.* Non-Time Critical) — уточнённый, 3,5 см.

Учитывая, что в работе мы рассматриваем период с 01.01.2023 по 15.05.2024, был выбран продукт NTC как содержащий наиболее точные измерения.

Продукты L2P вдольтрековые, т. е. они содержат измерения в надир в подспутниковой точке за один трек. Треком или пролётом называется часть одного оборота спутника вокруг Земли, заключённая между максимальной и минимальной широтой. Для изомаршрутных программ, какой является Sentinel-3, треки с одинаковым номером проходят по одним и тем же участкам подстилающей поверхности. Треки Sentinel-3, пересекающие район исследования, содержащие измерения SLA, приведены в табл. 2, а также на рис. 2.

Таблица 2. Треки Sentinel-3, используемые для изучения исследуемого района

Залив	Спутник	Треки
Куршский	Sentinel-3A	72, 597
	Sentinel-3B	711
Калининградский	Sentinel-3A	483
	Sentinel-3B	72, 483

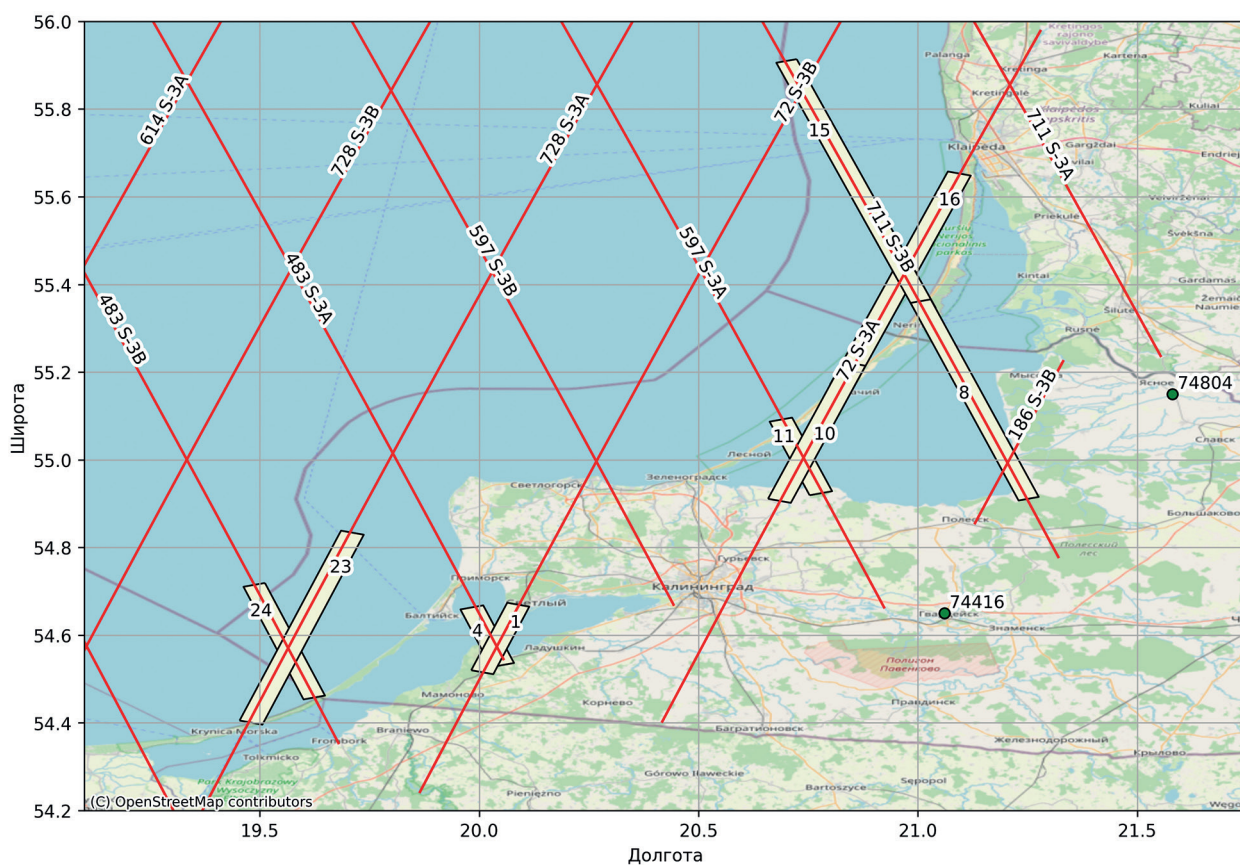


Рис. 2. Исследуемый район: прямоугольниками обозначены полигоны виртуальных станций, точками — наземные гидропосты, красными линиями — треки спутников Sentinel-3

Спутниковая радиолокация

В работе были использованы данные радиолокатора с синтезированной апертурой SAR-C (англ. Synthetic Aperture Radar), установленного на спутнике Sentinel-1A. Были проанализированы 404 РЛИ, полученные с пространственным разрешением 10 м над акваториями Куршского и Калининградского заливов и прилегающих областей Балтийского моря за

период с 01.01.2023 по 15.05.2024. Примеры проявлений выносов из заливов на РЛИ представлены на *рис. 3*.

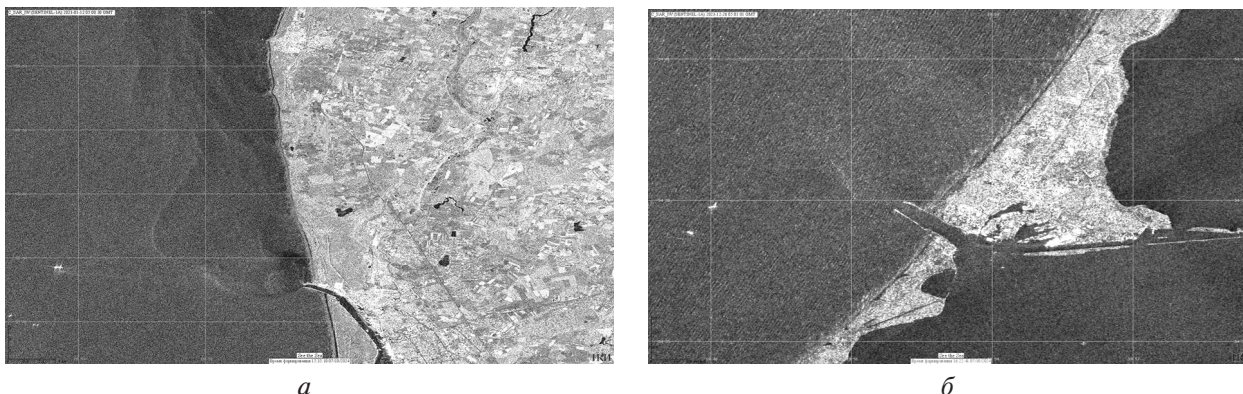


Рис. 3. Проявление на РЛИ выносов из заливов: *а* — Куршский залив, SAR-C Sentinel-1A 26.12.2023; *б* — Калининградский залив, SAR-C Sentinel-1A 12.01.2023

Результаты

Средние аномалии уровней в заливах

Данные SLA вдоль треков Sentinel-3 были получены из центра AVISO и аккумулированы в специально созданную базу данных. Также был адаптирован ранее созданный программный модуль (Врублевский и др., 2023) для создания виртуальных станций — симулированных полигональных объектов, в границах которых с помощью данных альтиметрии проводятся вычисления средних аномалий уровня моря на моменты измерения спутниками. Созданные виртуальные станции для исследуемых заливов показаны на *рис. 2*.

Для созданных виртуальных станций на основе ранее скачанных и обработанных файлов данных альтиметрии для всего исследуемого периода (01.01.2023–15.05.2024) построены временные ряды наблюдений средних значений SLA в границах виртуальной станции. Среднее значение SLA определяется как среднее арифметическое всех измерений SLA за пролёт, соответствующих полигону виртуальной станции и попадающих в диапазон между 25-м и 75-м перцентилем измеренных значений. Построенные ряды были отфильтрованы с помощью медианного фильтра с порогом $\pm 1,5$ медианы.

В силу того, что продукт L2P предоставляется без кросс-калибровки, необходимо было учесть возможную систематическую погрешность. Для её исключения временные ряды на полигонах, относящихся к одному заливу (8-й, 10-й, 11-й для Куршского и 1-й, 4-й для Калининградского), были откорректированы на разницу между медианами рядов. Откорректированные временные ряды были объединены в один временной ряд измерений SLA для каждого из заливов.

Полученные объединённые временные ряды, а также временные ряды изменения SLA, вычисленные аналогичным образом для участков Балтийского моря, приведены на *рис. 4* (см. с. 313).

На основе полученных данных, представленных на графиках (см. *рис. 4*), можно выделить периоды, когда SLA Куршского залива были выше, чем SLA Балтийского моря:

- 19.01.2023–26.06.2023,
- 03.08.2023–09.08.2023,
- 15.08.2023–10.09.2023,
- 09.10.2023–12.05.2024.

А также аналогичные периоды для Калининградского залива:

- 28.01.2023–12.06.2023,
- 07.08.2023–03.09.2023,

- 18.09.2023–29.10.2023,
- 20.11.2023–27.01.2024,
- 26.02.2024–07.07.2024.

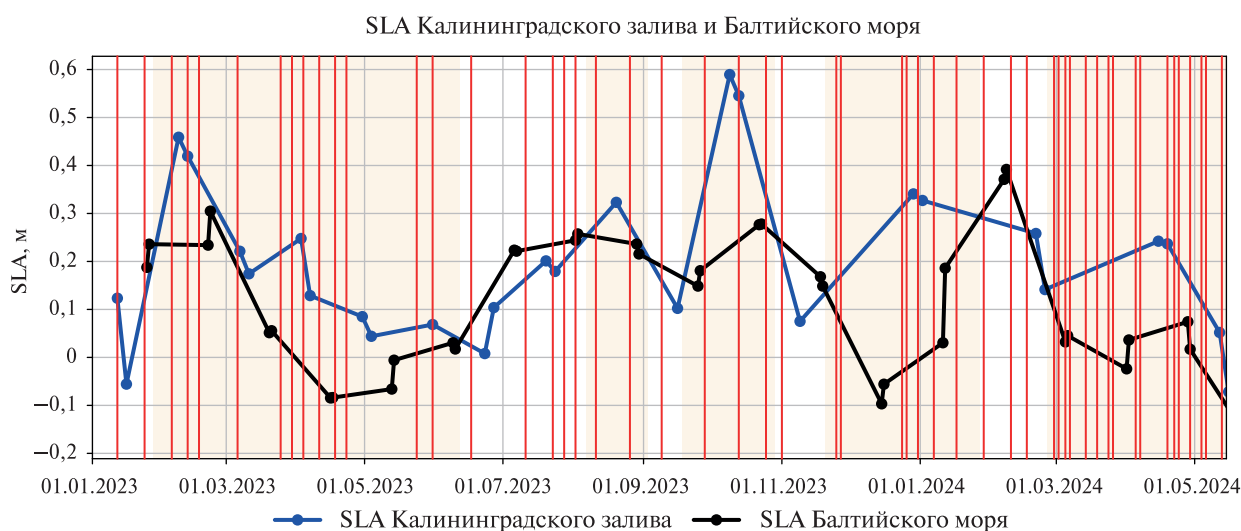
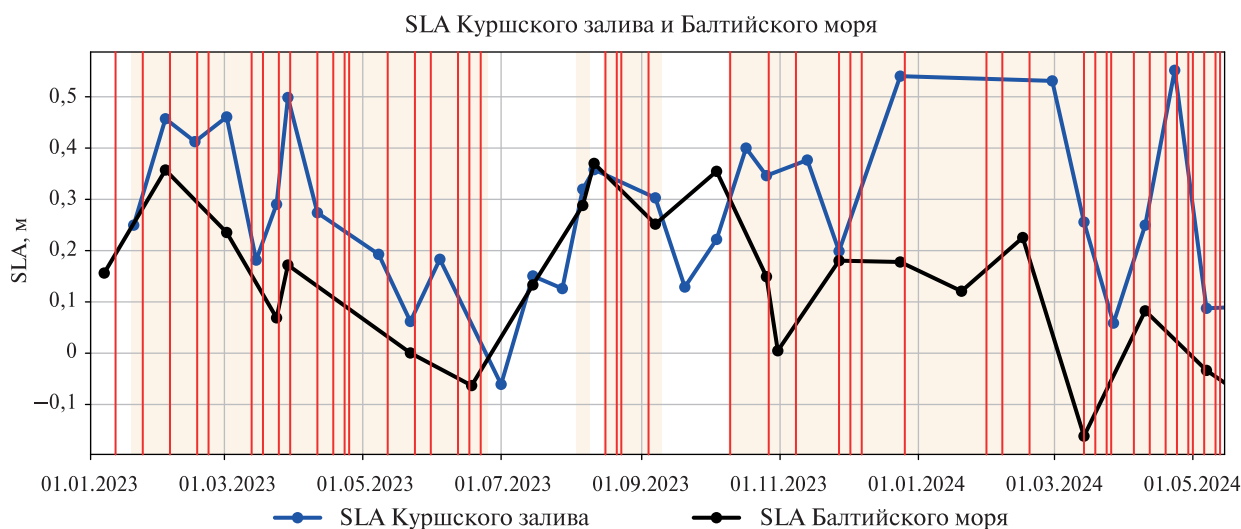


Рис. 4. Временные ряды SLA: а — Куршского залива и Балтийского моря; б — Калининградского залива и Балтийского моря. Синим обозначено изменение SLA залива, чёрным — SLA Балтийского моря, выделенные области соответствуют периодам, когда SLA залива выше SLA моря, красным — даты наблюдения выносов из залива

Взаимосвязь SLA заливов и регистрации выносов на РЛИ

Для исследования выносов на РЛИ из залива было проанализировано 404 изображения за период с 01.01.2023 по 15.05.2024, на которых были идентифицированы 99 проявлений выносов на РЛИ. Для каждого зарегистрированного проявления были определены площадь, направление ветра, разница SLA залива и моря и тип (по терминологии, ведённой в статье (Митягина, Лаврова, 2024)). Основные результаты анализа приведены в табл. 3.

Типы выносов, согласно цитируемой статье, следующие:

1 — плюмы с выраженной границей, видимой как яркая белая линия усиления обратнорассеянного сигнала;

- 2 — граница плюма очерчена сликками, т. е. тёмными линиями ослабления радиолокационного сигнала;
- 3 — яркие тёмные или светлые области усиления/ослабления РЛ-сигнала в плюме без формирования выраженного фронта;
- 4 — проявление плюма за счёт трассеров, таких как лёд/скопление биогенных плёнок.

Таблица 3. Характеристики выносов, определённые по РЛИ и данным альтиметрии

Залив	Площадь, км ²			
	минимальная	максимальная	средняя	
Куршский	0,99	349,08	51,35	
Калининградский	0,25	41,33	9,93	
	ΔSLA, м			
	минимальное	максимальное	среднее	
Куршский	-0,07	0,50	0,18	
Калининградский	-0,09	0,35	0,12	
	Частота встречаемости типа, %			
	Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4
Куршский	13	20	67	0
Калининградский	17	19	6	4

Установить зависимость площади выноса на РЛИ от разницы SLA залива и моря не удалось, коэффициенты корреляции Пирсона для данных Куршского залива — 0,019, Калининградского — 0,055. Также не прослеживается зависимость типа проявления выноса на РЛИ от разницы SLA.

Известно, что в периоды, когда SLA заливов выше SLA моря, между заливами и морем возникает течение из заливов в море, при обратном (уровень Балтийского моря выше уровня в заливах) возникает обратное течение из моря в залив. Это утверждение согласуется с другими исследованиями (Закиров и др., 2022; Szydlowski et al., 2019). Чтобы проверить предположение, что наличие течения из залива в море является условием наблюдения выносов на РЛИ, были сопоставлены даты наблюдений выносов на РЛИ и временные ряды наблюдений SLA (см. рис. 4).

На рис. 4 даты наблюдений выносов на РЛИ обозначены красными вертикальными линиями. Для Куршского залива хорошо видно, что наблюдение выносов на РЛИ регистрируется в моменты времени, когда SLA залива выше SLA моря. Для Калининградского залива такая закономерность прослеживается не так явно.

В то же время чётко прослеживается связь между периодами, когда SLA моря выше SLA заливов, т. е. происходит заток морских вод в заливы, и отсутствием проявлений выносов на РЛИ. Для каждого залива были построены розы ветров для двух периодов: когда происходит заток (синяя линия) и выток (красная линия), т. е. когда по альтиметрическим данным SLA залива выше SLA моря (рис. 5, см. с. 315). Данные по ветру были взяты из архивов gr5.ru. Для Куршского залива SLA моря выше SLA залива в первую очередь при западно-юго-западном ветре, а выток происходит главным образом при восточном-северо-восточном ветре. Но, судя по представленной диаграмме (см. рис. 5а), выток может происходить при любом направлении ветра западных румбов. Для Калининградского залива заток, судя по диаграмме (см. рис. 5б), может происходить в более широком диапазоне ветров западных румбов, а вынос — практически при любом направлении ветра. Возможно, этим и объясняется отсутствие чёткой закономерности для Калининградского залива между разницей в SLA и в проявлениях выноса на РЛИ. Также можно предположить, что изменение SLA Калининградского залива и SLA моря происходит чаще, чем осуществляются альтиметрические измерения Sentinel-3.

Согласно исследованию (Szydłowski et al., 2019), на изменение уровня моря в Калининградском заливе сильно влияет направление ветра, который в данном районе неустойчивый.

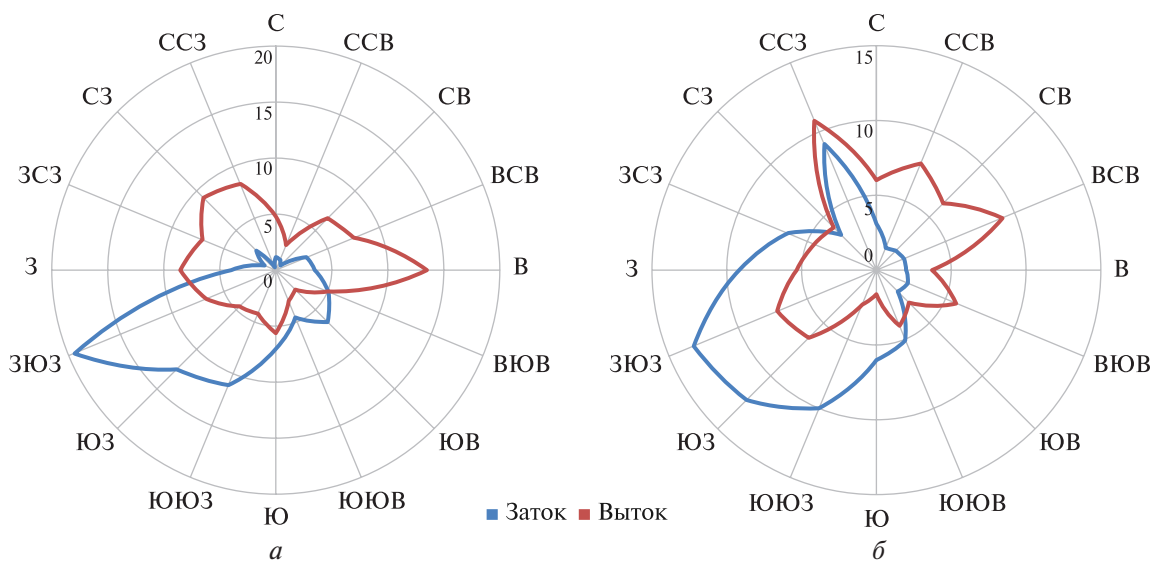


Рис. 5. Розы ветров: а — Куршского залива; б — Калининградского залива

Взаимосвязь SLA заливов и расходов рек, впадающих в заливы

В силу того, что альтиметрические данные имеют низкое временное разрешение, принято решение использовать среднесуточные значения расхода воды, которые были измерены на гидропостах, находящихся в максимальной близости к устьям впадающих в исследуемые заливы крупных рек. Выбор такого подхода основан на следующем: согласно работе (Jakimavičius et al., 2018), речной приток в Куршский залив составляет 67 % от общего поступления воды в залив, что, как можно предположить, оказывает существенное влияние на уровень моря в заливе. Соответственно, были рассмотрены расходы воды на гидропостах № 74804 (Неман) и № 74416 (Преголя), положение которых показано на рис. 2.

Данные среднесуточных измерений уровня и расхода воды с 2008 по 2022 г. получены с сервиса АИС ГМВО (Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов, <https://gmvo.skniivh.ru/>). Чтобы установить зависимость расхода воды от уровня, измеренного на гидрологическом посту, была использована формула (Ranz, 1982):

$$Q = p(G - e)^N,$$

где Q — расход; G — уровень воды на гидрологическом посту; p , e , N — калибровочные коэффициенты.

Подбор кривой осуществлялся с помощью метода наименьших квадратов с использованием библиотеки SciPy языка программирования Python. Вычисленные расходы были сопоставлены с действительными значениями. Средняя квадратичная ошибка и коэффициент корреляции приведены в табл. 4.

Таблица 4. Средняя квадратичная ошибка и коэффициент корреляции приближения с помощью кривой

№ поста	Средняя квадратичная ошибка, м ³ /с	Коэффициент корреляции Пирсона
74804	24,9	0,925
74416	28,5	0,928

Полученные зависимости были экстраполированы на ежедневные данные об уровне воды с 01.01.2023 по 15.05.2024, измеренные и распространяемые ЕСИМО (<https://www.esimo.ru/>), а также сопоставлены с SLA соответствующих заливов. Была предпринята попытка оценить время «добегания» — период, за который вода в реке проходит участок между двумя створами, следующим образом: вычислялась корреляция Пирсона между SLA заливов и рассчитанным расходом в предшествующие наблюдениям SLA даты. Таким образом обнаружилась наибольшая корреляция между расходом на гидропостах и SLA заливов. Согласно описанному методу, время «добегания» составило пять дней для Куршского залива и четыре дня для Калининградского. Задача выявления взаимосвязи между повышенными значениями расхода на гидропостах основных рек, SLA в заливах и проявлениями на РЛИ ещё требует отдельного решения.

Выводы и обсуждение результатов

В ходе проведения исследования было установлено, что данные спутниковой радиолокационной альтиметрии, а именно данные аномалий уровня моря, полученные по измерениям миссии Sentinel-3, позволяют определить взаимосвязь между отношением уровня Балтийского моря и Куршского и Калининградского заливов относительно друг друга и регистрацией выносов на РЛИ. Известно, что разница уровня в заливах и в море порождает появление течений: когда SLA в заливе превышает значения SLA в Балтийском море, возникает течение из залива в море, когда уступает — из моря в залив. Наблюдение перепада уровня позволяет судить о наличии таких течений, следовательно, позволяет регистрировать условия для наблюдения выносов на РЛИ.

Однако не наблюдается чёткой зависимости площади и типа проявления выносов на РЛИ от разницы SLA заливов и моря. Это может объясняться двумя причинами. Первая и самая главная — необходимо учитывать силу и направление ветра. Площадь выноса и образование фронтов на его границе зависит в первую очередь от ветра. Вторая причина — низкое временное разрешение альтиметрических данных. Для установления зависимости между наблюдением выносов на РЛИ и SLA необходимо увеличить временную частоту измерений SLA, подключив другие альтиметрические миссии. Для этого потребуется использовать другие или разработать свои методы вычисления SLA по данным альтиметрических приборов разных миссий, так как, как было сказано ранее, измерения SLA от других миссий альтиметрии не содержатся в продукте Along-track Sea Level Anomalies Level-2+ (AVISO).

Исследование проведено 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. Работа выполнена с использованием ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019), который развивается и поддерживается в рамках темы «Мониторинг» Минобрнауки (госрегистрация № 122042500031-8).

Литература

1. Врублевский М. В., Константинова А. М., Бурицев М. А. Интерфейс для работы с данными альтиметрии для мониторинга внутренних водоемов // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2023. С. 76. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a.
2. Есюкова Е. Е. Результаты еженедельного мониторинга побережья Вислинского залива в районе пос. Прибрежный в 2011–2012 годах // Вестн. Балтийского федерального ун-та им. И. Канта. 2013. № 1. С. 82–91.
3. Закиров Р. Б., Чубаренко Б. В., Чечко В. А. Гидролитодинамические условия движения наносов через Балтийский пролив (Калининградский залив, Балтийское море) // Эколог. безопасность прибреж. и шельфовой зон моря. 2022. № 4. С. 52–68. DOI: 10.22449/2413-5577-2022-4-52-68.

4. 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.
5. Килесо А. В., Стонт Ж. И. Некоторые аспекты изменчивости уровня Куршского залива (Юго-Восточная Балтика) при различных синоптических ситуациях // Гидрометеорология и экология. 2020. № 61. С. 494–506. DOI: 10.33933/2074-2762-2020-61-494-506.
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. Лебедев С. А., Костяной А. Г. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. М.: Море, 2005. 366 с.
9. Лисицын А. П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
10. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
11. Митягина М. И., Лаврова О. Ю. Возможности спутникового радиолокационного наблюдения плумов речных и лагунных вод в юго-восточной части Балтийского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 288–305. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-288-305.
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. Чуринов Д. А., Стонт Ж. И., Ульянова М. О. Влияние штормовых ситуаций на изменчивость уровня воды в Куршском заливе (Балтийское море) в 2019 г. // Материалы 7-го Международ. Балтийского морского форума. 2019. С. 408–415.
14. Chubarenko V., 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.
15. 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. V. 7. P. 12909–12941. DOI: 10.3390/rs71012909.
16. Dzwonkowski B., Yan X-H. Tracking of a Chesapeake Bay estuarine outflow plume with satellite-based Ocean Color data // Continental Shelf Research. 2005. V. 25. P. 1942–1958. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2005.06.011>.
17. Gasiūnaitė Z. R., Daunys D., Olenin S. et al. The Curonian Lagoon // Ecology of Baltic Coastal Waters. Berlin; Heidelberg: Springer. 2008. P. 197–215. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73524-3_9.
18. Hopkins J., Lucas M., Dufau C. Detection and variability of the Congo River plume from satellite derived sea surface temperature, salinity, ocean colour and sea level // Remote Sensing of Environment. 2013. V. 139. P. 365–385. DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.015.
19. Horner-Devine A. R., Jay D. A., Orton P. M. et al. A conceptual model of the strongly tidal Columbia River plume // J. Marine Systems. 2009. V. 78. No. 3. P. 460–475. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2008.11.025.
20. Jakimavičius D., Kriaučiūnienė J., Šarauskienė D. Impact of climate change on the Curonian Lagoon water balance components, salinity and water temperature in the 21st century // Oceanologia. 2018. V. 60. Iss. 3. P. 378–389. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2018.02.003>.
21. Jay D. A., Zaron E. D., Pan J. Initial expansion of the Columbia River tidal plume: Theory and remote sensing observations // J. Geophysical Research Oceans. 2010. V. 115. Iss. C2. Article C00B15. <https://doi.org/10.1029/2008JC004996>.
22. Johnson D. R., Weidemann A., Arnone R. et al. Chesapeake Bay outflow plume and coastal upwelling events: physical and optical properties // J. Geophysical Research. 2001. V. 106. P. 11613–11622. DOI: 10.1029/1999JC000185.
23. Kahru M., Elmgren R. Multidecadal time series of satellite-detected accumulations of cyanobacteria in the Baltic Sea // Biogeosciences. 2014. V. 11. Iss. 13. P. 3619–3633. <https://doi.org/10.5194/bg-11-3619-2014>.
24. 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. Iss. 9. P. 5193–5201. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2580602.

25. 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.
26. McClimans T.A. Estuarine fronts and river plumes // Physical Processes in Estuaries / eds. J. Dronkers, W. van Leussen. Springer, 1988. P. 55–69.
27. 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.
28. Ranz S. E. Measurement and computation of streamflow. V. 2. Computation of discharge // Water Supply Paper 2175. U. S. Geological Survey. 1982. P. 285–631.
29. Rud O., Gade M. Monitoring algae blooms in the Baltic Sea: A multi-sensor approach // Proc. IGARSS'99. 1999. V. 2. P. 1211–1213.
30. Szydłowski M., Kolerski T., Zima P. Impact of the artificial strait in the Vistula Spit on the hydrodynamics of the Vistula Lagoon (Baltic Sea) // Water. 2019. V. 11. No. 5. Article 990. <https://doi.org/10.3390/w11050990>.
31. Umgiesser G., Zemlys P., Erturk A. Seasonal renewal time variability in the Curonian Lagoon caused by atmospheric and hydrographical forcing // Ocean Science. 2016. V. 12. P. 391–402. DOI: 10.5194/os-12-391-2016.
32. 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.

Using satellite altimetry data to assess the conditions for observation in radar images of outflows from Kaliningrad and Curonian lagoons

M. V. Vrublevsky, O. Yu. Lavrova, M. I. Mityagina, A. N. Yakusheva

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: vrublevsky@d902.iki.rssi.ru

Outflows from bays such as Kaliningrad and Curonian ones have a significant impact on the hydrochemical and hydrobiological processes in the Baltic Sea. Therefore, outflow is an important object of observation both using traditional hydrological measurements and Earth remote sensing data. Observations of runoff using optical sensors have become widespread, but the observation data can be very sparse in time due to cloudiness. Radar images can be used to supplement these observations. To do this, it is necessary to understand the mechanisms of outflow manifestation in them and conditions of their occurrence. One of these conditions is currents that arise between the bay and the sea as a result of the difference in water levels. The aim of the article is to develop a method for assessing the conditions favorable for observing outflow in radar images based on satellite radar altimetry data of the studied bays and the Baltic Sea. The paper presents the results of a correlation study of outflow observations and the ratio of bay and sea water levels, and also provides an assessment of the applicability of the proposed methodology and an analysis of the possibility of its extension by using the discharge data of rivers flowing into the studied bays.

Keywords: satellite altimetry, outflow from the bay, SAR-C Sentinel-1, Sentinel-3, Curonian Lagoon, Kaliningrad Lagoon, Baltic Sea

Accepted: 12.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-306-320

References

1. Vrublevsky M. V., Konstantinova A. M., Bourtsev M. A., Interface for working with altimetry data for monitoring inland water bodies, *Materialy 21-i Mezhduнародnoi konferentsii "Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 21th Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2022, p. 76 (in Russian), DOI: 10.21046/20DZZconf-2023a.
2. Esiukova E. E., Results of weekly monitoring of the coast of Vistula Lagoon near the Pribrezhny settlement in 2011–2012, *Vestnik Baltiiskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta*, 2013, No. 1, pp. 82–91.
3. Zakirov R. B., Chubarenko B. V., Chechko V. A., Hydrolithodynamic conditions of sediment movement through the strait of Baltiysk (Vistula Lagoon, Baltic Sea), *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, 2022, No. 4, pp. 52–68, DOI: 10.22449/2413-5577-2022-4-52-68.
4. Ivanov A. Yu., Khlebnikov D. V., Konovalov B. V. et al., Manifestations of river outflows in the Black Sea in remote sensing data, *Sovremennyye 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.
5. Kileso A. V., Stont Zh. I., Some aspects of the water level variability of the Curonian Lagoon (South-Eastern Baltic) under various synoptic situations, *Hydrometeorology and Ecology*, 2020, No. 61, pp. 494–506 (in Russian), DOI: 10.33933/2074-2762-2020-61-494-506.
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, *Sovremennyye 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., *Sputnikovyye 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. Lebedev S. A., Kostianoy A. G., *Sputnikovaya al'timetriya Kaspiiskogo morya* (Satellite altimetry of the Caspian Sea), Moscow: More, 2005, 366 p.
9. Lisitzin A. P., A marginal filter of the oceans, *Oceanology*, 1994, Vol. 34, No. 5, pp. 735–747.
10. Loupian E. A., Proshin A. A., Bourtsev M. A. et al., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
11. Mityagina M. I., Lavrova O. Yu., Feasibility of satellite radar observation of river and lagoon plumes in the southeastern Baltic Sea, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, Vol. 21, No. 5, pp. 288–305 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-288-305.
12. Nazirova K. R., Krayushkin E. V., Monitoring the spread of the Kaliningrad Bay waters in the Gulf of Gdansk (South-East Baltic), *Sovremennyye 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. Churin D. A., Stont Zh. I., Ulyanova M. O., Effect of storm situations on the variability of water level in the Curonian Lagoon (Baltic Sea) in 2019, *Materialy 7-go Mezhduнародnogo Baltiiskogo morskogo foruma* (Proc.: 7th Baltic maritime forum), 2019, pp. 408–415 (in Russian).
14. 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.
15. 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, DOI: 10.3390/rs71012909.
16. Dzwonkowski B., Yan X-H., Tracking of a Chesapeake Bay estuarine outflow plume with satellite-based ocean color data, *Continental Shelf Research*, 2005, Vol. 25, pp. 1942–1958, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2005.06.011>.
17. Gasiūnaitė Z. R., Daunys D., Olenin S., et al., The Curonian Lagoon, In: *Ecology of Baltic Coastal Waters*, Berlin; Heidelberg: Springer, 2008, pp. 197–215, https://doi.org/10.1007/978-3-540-73524-3_9.
18. Hopkins J., Lucas M., Dufau C., Detection and variability of the Congo River plume from satellite derived sea surface temperature, salinity, ocean colour and sea level, *Remote Sensing of Environment*, 2013, Vol. 139, pp. 365–385, DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.015.
19. Horner-Devine A. R., Jay D. A., Orton P. M. et al., A conceptual model of the strongly tidal Columbia River plume, *J. Marine Systems*, 2009, Vol. 8, Issue 3, pp. 460–475, DOI: 10.1016/j.jmarsys.2008.11.025.
20. Jakimavičius D., Kriauciūnienė J., Šarauskienė D., Impact of climate change on the Curonian Lagoon water balance components, salinity and water temperature in the 21st century, *Oceanologia*, 2018, Vol. 60, Issue 3, pp. 378–389, <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2018.02.003>.
21. Jay D. A., Zaron E. D., Pan J., Initial expansion of the Columbia River tidal plume: Theory and remote sensing observations, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2010, Vol. 115, Issue C2, Article C00B15, <https://doi.org/10.1029/2008JC004996>.

22. Johnson D. R., Weidemann A., Arnone R. et al., Chesapeake Bay outflow plume and coastal upwelling events: physical and optical properties, *J. Geophysical Research*, 2001, Vol. 106, pp. 11613–11622, DOI: 10.1029/1999JC000185.
23. Kahru M., Elmgren R., Multidecadal time series of satellite-detected accumulations of cyanobacteria in the Baltic Sea, *Biogeosciences*, 2014, Vol. 11, Issue 13, pp. 3619–3633, <https://doi.org/10.5194/bg-11-3619-2014>.
24. 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.
25. 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.
26. McClimans T.A., Estuarine fronts and river plumes, In: *Physical Processes in Estuaries*, J. Dronkers, W. van Leussen (eds.), Springer, 1988, pp. 55–69.
27. Osadchiev 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.
28. Ranz S.E., Measurement and computation of streamflow: Vol. 2. Computation of discharge, In: *Water Supply Paper 2175, U.S. Geological Survey*, 1982, pp. 285–631.
29. Rud O., Gade M., Monitoring algae blooms in the Baltic Sea: A multi-sensor approach, *Proc. IGARSS'99*, 1999, Vol. 2, pp. 1211–1213.
30. Szydłowski M., Kolerski T., Zima P., Impact of the artificial strait in the Vistula Spit on the hydrodynamics of the Vistula Lagoon (Baltic Sea), *Water*, 2019, Vol. 11, No. 5, Article 990, <https://doi.org/10.3390/w11050990>.
31. Umgiesser G., Zemlys P., Erturk A., Seasonal renewal time variability in the Curonian Lagoon caused by atmospheric and hydrographical forcing, *Ocean Science*, 2016, Vol. 12, pp. 391–402, DOI:10.5194/os-12-391-2016.
32. 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.