

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ РЕЧНЫХ ВЫНОСОВ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ РИЖСКОГО ЗАЛИВА

Н. А. Князев

*Институт космических исследований РАН,
Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32,
e-mail: nkkniazev@cosmos.ru*

В работе рассматриваются возможности и ограничения идентификации речных выносов в южной части Рижского залива по спутниковым радиолокационным изображениям (РЛИ) за период 2022–2024 гг. Цель исследования – определить, в какой степени радиолокационные данные позволяют выявлять пространственные границы речного плюма и отслеживать его сезонную и межгодовую динамику. Показано, что контраст речного выноса на РЛИ формируется за счет модуляции капиллярной ряби при смешении речной и морской воды, а также наличия поверхностно-активных веществ, подавляющих коротковолновое волнение. Зимой видимость плюма возрастает, поскольку в этот сезон речные воды выносятся в море в виде льда, что хорошо видно на РЛИ. С помощью системы спутникового мониторинга «See the Sea» (STS) были выделены 62 речных плюма для трех рек – Западной Двины (Даугавы), Лиелупе и Гауи. Наибольшая степень выраженности и пространственная протяженность плюмов отмечена у реки Даугава, что связано с ее крупным водосборным бассейном и высокой водностью. Максимальные значения параметров плюма зарегистрированы в 2023 г., особенно у Лиелупе и Гауи, где площадь выноса увеличилась в 2–4 раза по сравнению с 2022 г. Несмотря на общее снижение в 2024 г., показатели остались выше базовых значений. Результаты исследования демонстрируют, что при определенных гидрометеорологических условиях и сезонах речные плюмы могут быть эффективно выявлены на радиолокационных изображениях. Полученные данные позволяют оценить потенциал РЛИ в задачах экологического мониторинга и управления водными ресурсами в прибрежных районах.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, речные выносы, радиолокация, C-SAR Sentinel-1, Лиелупе, Западная Двина (Даугава), Гауя, Рижский залив, Балтийское море

Введение

Речные выносы играют ключевую роль в формировании гидрофизических, гидрохимических и биологических характеристик прибрежных морских акваторий. Потоки пресной воды, поступающие из устьев рек, транспортируют взвешенные наносы, органические вещества, питательные элементы и загрязнители, изменяя структуру водной толщи и оказывая воздействие на экосистему шельфа (Osadchiev, Yankovsky, 2022). В зоне взаимодействия речных и морских вод пресные воды рек и внутренних водоемов, соединенных с морем проливами и

каналами, перемешиваются с более соленой морской водой, формируя динамическую структуру – плюм, существенно влияющий на распределение веществ и экологические процессы в прибрежной зоне (Митягина, Лаврова, 2024). В условиях наблюдаемых климатических изменений, проявляющихся в увеличении частоты экстремальных паводков, изменении режима осадков и таянии ледников, мониторинг динамики речных выносов приобретает особую актуальность. Традиционные методы наблюдений, основанные на сети гидрологических постов и эпизодических судовых измерениях, несмотря на высокую локальную точность, не позволяют охватить зону полного распространения плюма, отслеживать быструю изменчивость фронта смещения и получать данные, охватывающие всю исследуемую акваторию. В этой связи методы дистанционного зондирования Земли из космоса, в частности, радиолокационные съемки, обладают высоким потенциалом для регулярного и всепогодного мониторинга речных выносов. Радиолокационные системы чувствительны к изменениям шероховатости водной поверхности, обусловленным капиллярно-гравитационной рябью, что позволяет фиксировать особенности волновой модуляции в зонах смещения пресной и морской воды (Лаврова и др., 2016). При этом выявление речных выносов по радиолокационным изображениям (РЛИ) сопряжено с рядом методологических трудностей, включая влияние атмосферных условий, сезонности, наличия поверхностно-активных веществ и ледяного покрова. Несмотря на то, что существуют исследования, посвященные использованию РЛИ для изучения речных выносов (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), вопрос о том, в какой степени спутниковая радиолокация позволяет эффективно выявлять речные выносы и определять их пространственные характеристики, остается открытым и требует дополнительного изучения.

Цель настоящей работы – оценить применимость спутниковых радиолокационных данных для выявления и дешифрирования речных выносов в южной части Рижского залива на примере трех основных рек региона: Западной Двины (*лат.* Даугавы), Лиелупе и Гауи. В исследовании проводится анализ сезонной и межгодовой динамики плюмов за 2022–2024 гг. с использованием серии радиолокационных изображений. Особое внимание уделено влиянию ледовой обстановки и морфологических особенностей устьевых зон на детектирование выноса. Результаты позволят оценить потенциал радиолокационных данных для целей экологического мониторинга в районах речных выносов.

Районы исследования

Рижский залив, являющийся частью Балтийского моря, представляет собой полузамкнутый водоем с ограниченным водообменом, что способствует повышенному влиянию речных выносов на экосистему залива (Лаврова и др., 2014; Митягина,

Лаврова, 2024). Залив характеризуется относительно низкой соленостью, особенно в прибрежных районах, что связано со значительным речным стоком. Его гидродинамический режим определяется ветровыми течениями и речным воздействием, что приводит к выраженной пространственной и временной изменчивости параметров воды, включая мутность, содержание взвешенных веществ и биогенных элементов. Основными реками, формирующими материковый сток в Рижский залив, являются **Лиелупе, Западная Двина (Даугава) и Гауя**. Эти водотоки отличаются по гидрологическим характеристикам, источникам питания и объему выносимых в залив веществ (рисунок 1).



Рис. 1 – Приустьевые зоны рек Лиелупе, Западная Двина и Гауя, впадающих в Рижский залив. Цветосинтезированное изображение получено с OLI2-TIRS2 Landsat-9 от 06 марта 2024 г.

Западная Двина (Даугава) – крупнейшая река региона, берущая начало в России и протекающая через Беларусь и Латвию. Ее водосборный бассейн охватывает разнообразные ландшафты, включая лесные и заболоченные территории, а также урбанизированные районы. Питание реки смешанное, с преобладанием снегового, что обуславливает выраженное весеннее половодье. Среднегодовой сток Западной Двины составляет около 20–25 км³, при этом на период весеннего паводка может приходиться до 50 % годового выноса взвешенных веществ и биогенов (Krengel et al., 2018). Река является основным источником пресной воды для Рижского залива, что существенно влияет на его гидрохимический режим.

Лиелупе образуется при слиянии рек Мемеле и Муса, протекает преимущественно по равнинной территории Латвии и отличается высокой мутностью, связанной с легкоразмываемыми глинистыми грунтами в среднем и нижнем течении. Питание реки преимущественно дождевое и грунтовое, что обеспечивает относительно

равномерный сток в течение года, хотя весенний паводок также выражен. Среднегодовой сток Лиелупе оценивается в 3.540 км^3 , при этом река выносит значительное количество взвешенных наносов, особенно в период интенсивных осадков и таяния снега (согласно отчету FAO, 1997).

Гауя, протекающая по территории Латвии и Эстонии, имеет меньший водосборный бассейн по сравнению с Западной Двиной, но отличается высокой скоростью течения и значительными уклонами в верхнем течении. Питание реки смешанное, с заметной долей подземных вод, что обеспечивает относительно стабильный сток в течение года. Среднегодовой объем выноса Гауи в Рижский залив составляет около 2.580 км^3 (согласно отчету FAO, 1997). Особенностью реки является низкая мутность в летний период, однако во время весеннего половодья и осенних паводков вынос взвешенных веществ увеличивается.

Сезонная динамика речных выносов в Рижский залив определяется климатическими условиями региона. Максимальные потоки взвешенных веществ и биогенных элементов наблюдаются весной в период таяния снега, тогда как летом и осенью их концентрации снижаются, хотя могут резко возрасти во время сильных дождей. Речные выносы в Рижский залив играют ключевую роль в формировании его экологического состояния, определяя баланс биогенных элементов в прибрежных акваториях. Таким образом, изучение особенностей стока рек Лиелупе, Западной Двины и Гауи необходимо для понимания процессов эвтрофикации и трансформации водных масс в прибрежной зоне Балтийского моря.

Данные и методы

Для исследования параметров речного выноса в работе использовались данные спутниковой радиолокации, обладающие рядом преимуществ по сравнению с оптическими снимками. В отличие от пассивных оптических систем, зависящих от солнечного освещения и облачного покрова, радиолокационные сенсоры обеспечивают всепогодный и круглосуточный мониторинг, что особенно важно для регионов с частой облачностью, таких как Балтийское море. Ключевым фактором для корректного выделения речных выносов на радиолокационных изображениях является учет влияния ветровых условий, поскольку ветер модулирует обратное рассеяние микроволн от поверхности моря. Для минимизации искажений выполнялся поиск и использование данных, полученных при низкой и умеренной ветровой активности (скорость ветра $\leq 5\text{--}6 \text{ м/с}$), когда контраст между пресными речными водами и солоноватыми морскими становится наиболее выраженным. В качестве спутниковых данных в работе применялись архивы РЛИ, полученных с космической системы Sentinel-1 Европейского космического агентства (ESA). Спутник Sentinel-1A (*Sentinel-1B вышел из строя к концу 2021 г.*) оснащен радаром с синтезированной апертурой (РСА) С-диапазона (5.405 ГГц), работающим в нескольких режимах, включая используемый Interferometric Wide (IW) с пространственным разрешением до $5 \times 20 \text{ м}$. Для

визуального детектирования речных выносов использовались данные соосной вертикальной (VV) поляризации, наиболее чувствительной к капиллярным волнам на морской поверхности.

Для обработки и анализа спутниковых данных в работе использовалась система спутникового мониторинга «See the Sea» (STS), разработанная в Институте космических исследований РАН и поддерживаемая Центром коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лаврова и др., 2019; Лупян и др., 2012). Интегрированные алгоритмы STS обеспечили не только возможность мониторинга речных выносов на встроенном картографическом интерфейсе, но и ручное выделение их пространственных границ с последующей количественной оценкой ключевых параметров, включая площадь распространения и протяженность плюмов.

В рамках данного исследования был выбран временной промежуток с 2022 по 2024 гг. Всего за указанный промежуток времени по исследуемому региону было проанализировано 441 РЛИ: 145 РЛИ в 2022 и 2023 гг., 151 РЛИ в 2024 г. Для каждого детектируемого речного выноса выполнялось оконтуривание границ с последующим сохранением векторных масок в геоинформационной базе данных системы STS. Результатом обработки стала синтезированная карта пространственного распределения речных выносов в акватории Рижского залива, построенная на основе накопленного массива данных.

Результаты спутниковых наблюдений

Детектирование речных выносов на РЛИ в южной части Рижского залива

Основным фактором, обеспечивающим контраст речного плюма на РЛИ, является модуляция мелкомасштабной ряби, формируемой под действием ветра (Hessner et al., 2001; Klemas, 2012). Радарные системы, работающие в микроволновом диапазоне, чувствительны к капиллярным и коротким гравитационным волнам, амплитуда и пространственное распределение которых изменяются в зоне смешения речных и морских вод. Различия в плотности двух водных масс приводят к образованию фронтов, где наблюдаются резкие градиенты скорости течений и турбулентность. Эти процессы влияют на волновой спектр, создавая участки с повышенной или пониженной шероховатостью, что проявляется в вариациях интенсивности обратного рассеяния (рисунок 2). Пространственное распределение плюмов преимущественно контролируется двумя ключевыми факторами: ветровым воздействием, определяющим их прибрежную динамику, и локальными течениями, влияющими на направление переноса. На рисунке 2а, согласно метеорологическим данным, интегрированным в STS (Лаврова и др., 2019), преобладал северо-западный ветер со скоростью 3–4 м/с, что могло способствовать прижиманию плюма к береговой линии. Западное направление распространения речного выноса, вероятно, обусловлено воздействием локальных течений. На рисунке 2б зафиксированы условия

юго-юго-западного ветра со скоростью 3–4 м/с, под воздействием которого наблюдаемые плумы приобрели вытянутую форму, ориентированную в северо-северо-восточном направлении.

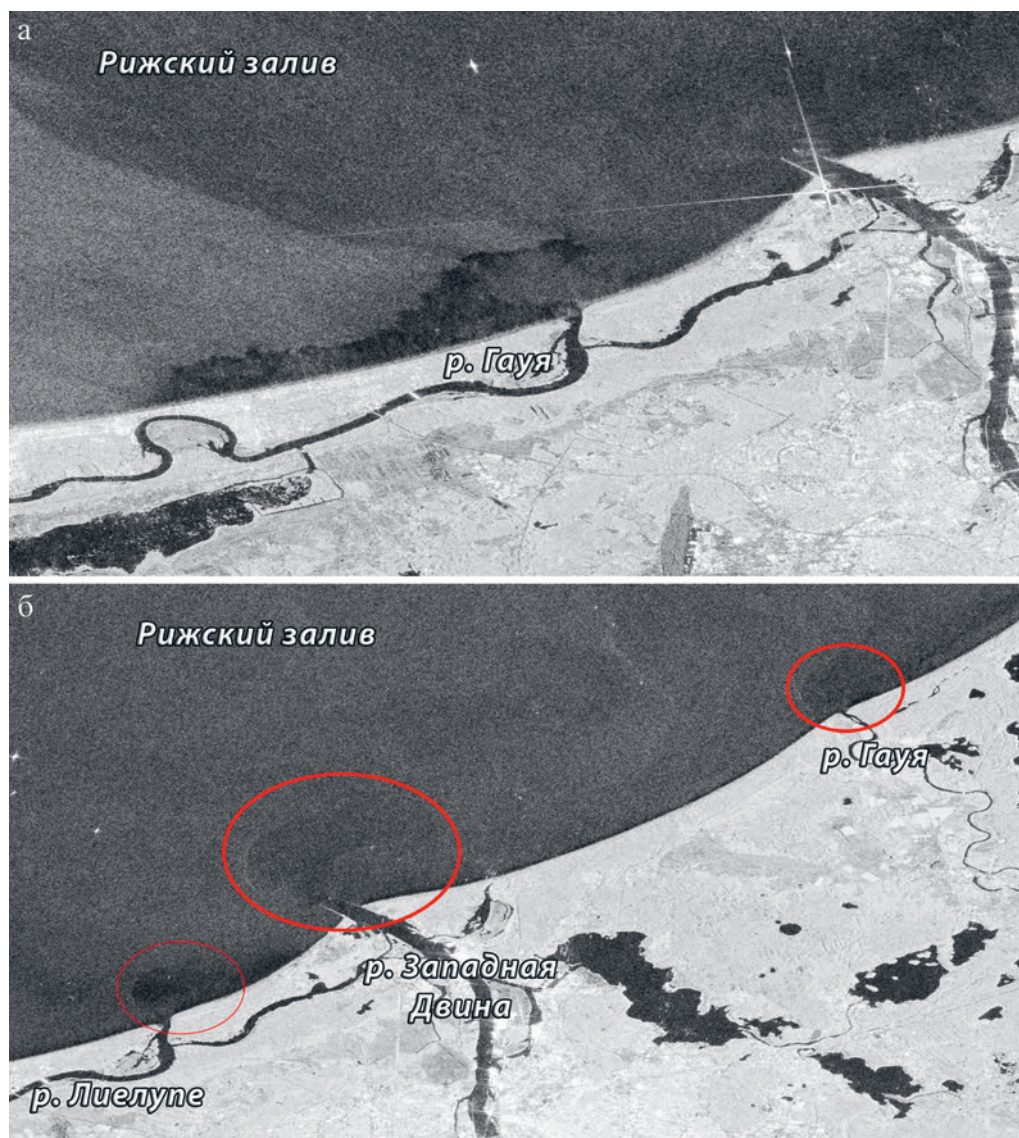


Рис. 2 – Примеры речных плумов на РЛИ. Спутниковые изображения получены с C_SAR_IW Sentinel-1A от: **а** – 30 апреля 2023 г.; **б** – 28 ноября 2024 г.

Динамические процессы, такие, как образование вихревых структур и сдвиговые течения, также вносят вклад в формирование радиолокационного изображения речного выноса. Под действием силы Кориолиса и взаимодействия с прибрежными течениями речной плум может приобретать спиралевидную или веерообразную форму, что хорошо распознается на РСА-изображениях благодаря характерным узорам, создаваемым модуляцией поверхностных волн. Важную роль в детектировании речного выноса играют поверхностно-активные вещества (ПАВ), присутствующие в речных водах в виде органических соединений или антропогенных загрязнений. Эти

вещества формируют тонкие пленки на поверхности воды, которые подавляют развитие капиллярных волн за счет своей упругости. В результате зоны, покрытые пленками, характеризуются пониженным обратным рассеянием и визуализируются на РЛИ как темные области. На рисунке 3 синим овалом отмечены проявления ПАВ вихревой структуры вокруг выноса р. Западная Двина, красным кругом отмечен вынос р. Гауя, визуализируемый более светлым оттенком за счет разницы скоростей поверхностного волнения выноса с прибрежным стоком.

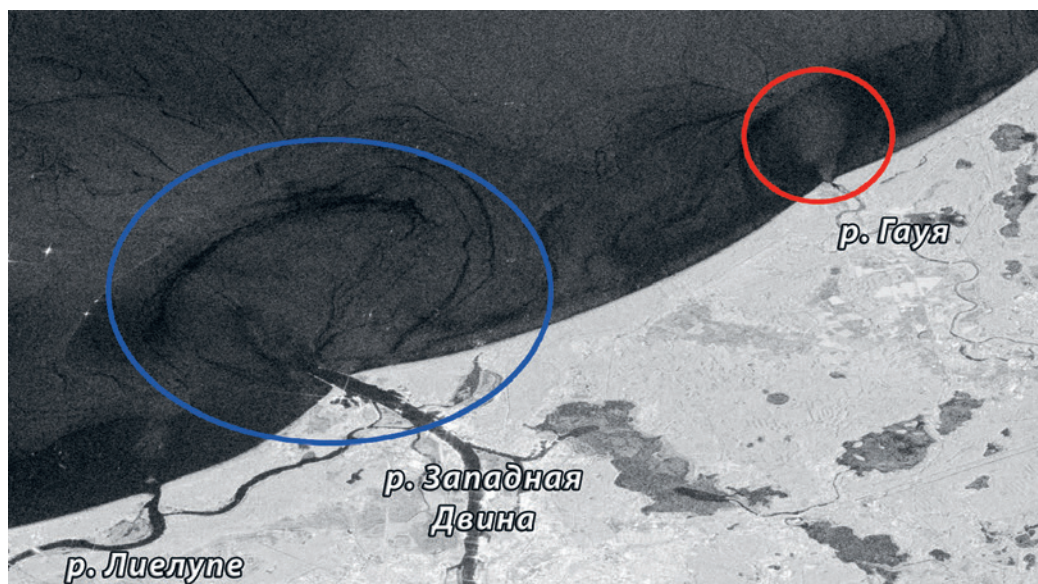


Рис. 3 – Проявление речных выносов на РЛИ. Спутниковое изображение получено с C-SAR-IW Sentinel-1A от 02 января 2023 г.

Еще одним важным фактором для исследования речных выносов является сезонная динамика ледяного покрова. Речной вынос в зимний период формирует зоны повышенной температуры и солености подо льдом, что приводит к локальному подтаиванию или деформации ледяного покрова. Поскольку пресная вода замерзает при более высокой температуре, чем соленая, в местах впадения рек часто наблюдаются участки с пониженной сплоченностью льда, трещинами и промоинами (Dierking, Dall, 2007). Эти области характеризуются измененными морфологическими и электрическими свойствами, что влияет на интенсивность обратного рассеяния радиоволн. В частности, наличие открытой воды или тонкого молодого льда в зоне речного плюма приводит к пониженному обратному рассеянию по сравнению с окружающим толстым многолетним льдом, формируя темные пятна на РЛИ (рисунок 4а). В начале зимы, когда лед еще тонкий и неоднородный, речной вынос может вызывать образование полыней или участков с пониженной толщиной льда, которые хорошо детектируются благодаря контрасту диэлектрической проницаемости между льдом и водой. В период весеннего таяния речной плюм ускоряет разрушение ледяного покрова, формируя протяженные зоны разрушенного льда, видимые на РЛИ как области с хаотичной текстурой (рисунки 4б, в).

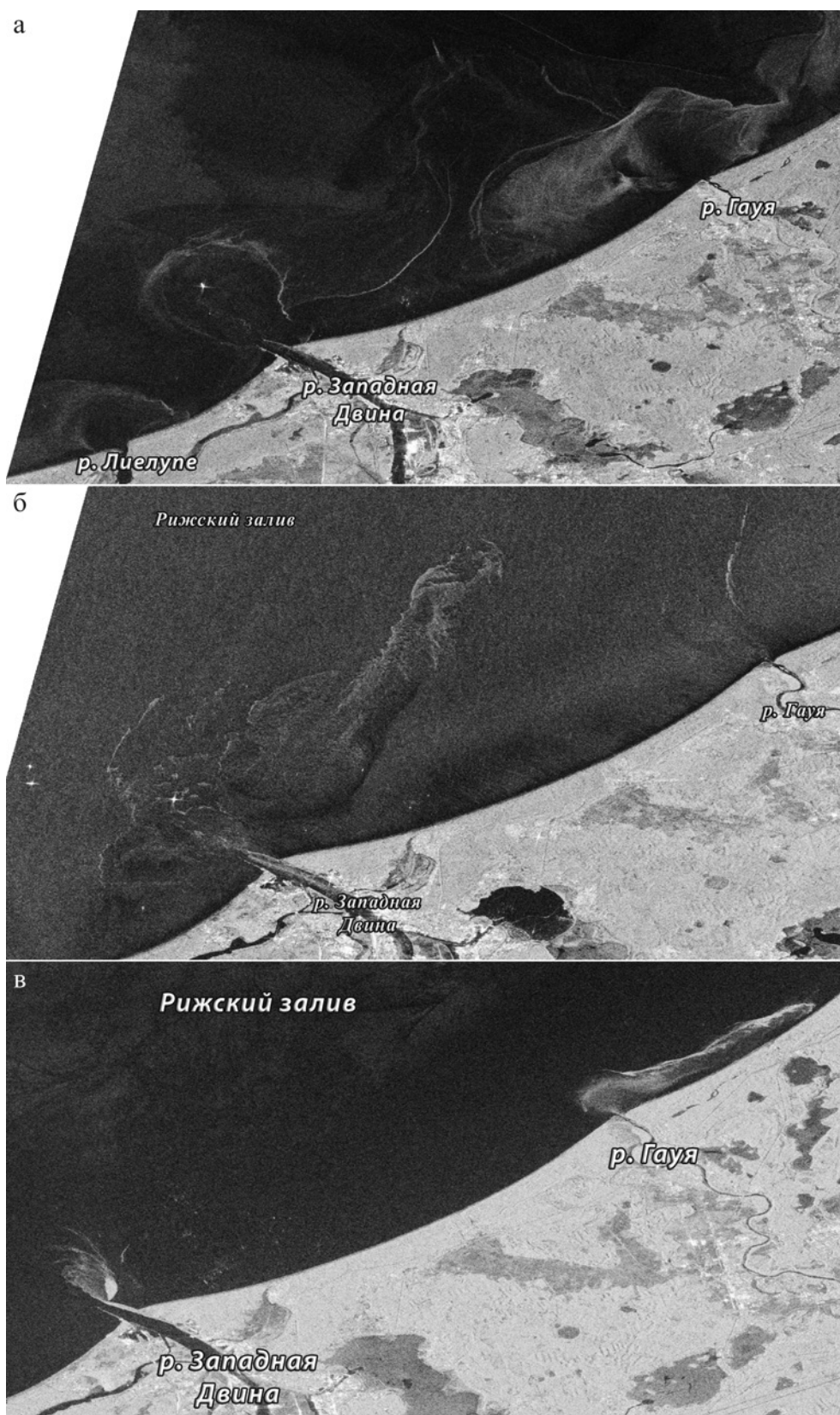


Рис. 4 – Влияние ледяного покрова в оконтуривании границ речных выносов. Спутниковые изображения получены с C-SAR-IW Sentinel-1A от: а – 26 января 2022 г.; б – 10 марта 2023 г.; в – 24 февраля 2023 г.

Статистический анализ частоты визуализации плумов на РЛИ в южной части Рижского залива

В ходе дешифрирования речных выносов в южной части Рижского залива с использованием системы STS было идентифицировано и сохранено 62 контура, соответствующих плумам трех основных рек за период 2022–2024 гг. Количественное распределение выявленных плумов по рекам представлено на рисунке 5.

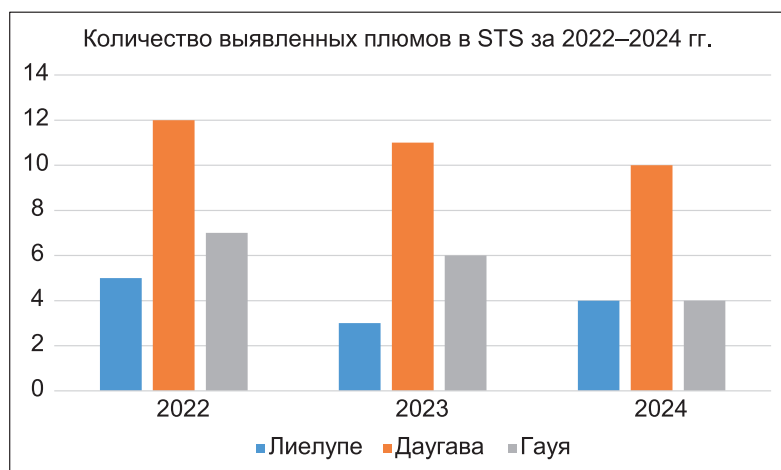


Рис. 5 – Диаграмма распределения выявленных плумов на РЛИ для каждой из рек на промежутке 2022–2024 гг.

Наибольшее количество распознаваемых на РЛИ речных плумов было зафиксировано в устьевой зоне реки Западная Двина. Это связано с совокупным действием нескольких факторов. Во-первых, Даугава обладает самым крупным водосборным бассейном среди латвийских рек, что обеспечивает высокий объем стока и значительный транспорт наносов и растворенных веществ. Во-вторых, бассейн Даугавы подвергается более высокой антропогенной нагрузке, по сравнению с бассейнами Лиелупе и Гауи, что обусловлено прохождением реки через крупные урбанизированные и промышленные районы (Витебск, Даугавпилс, Рига), а также наличием гидротехнических сооружений, регулирующих сток. Эти факторы способствуют увеличению содержания взвешенных частиц и биогенных элементов в речной воде, что может усиливать оптическую выраженность и устойчивость плума в прибрежной зоне (Yurkovskis & Poikāne, 2008). В-третьих, гидродинамические условия в устьевой области Даугавы, включая интенсивные течения и ветровое перемешивание в Рижском заливе, способствуют более активному распространению речного выноса в морскую акваторию. В отличие от Даугавы, река Лиелупе характеризуется меньшей динамикой течения, а ее сток во многом ослабевает в условиях мелководной устьевой зоны. Гауя, в свою очередь, формирует дельтовидную систему с высоким уровнем осаждения наносов вблизи устья, что ограничивает развитие протяженных поверхностных плумов и снижает их видимость в радиолокационных и оптических данных.

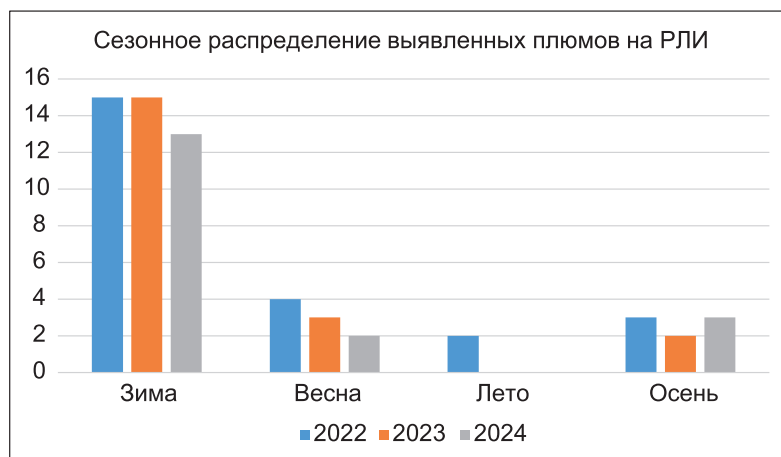


Рис. 6 – Диаграмма сезонного распределения выявленных плумов на РЛИ для каждой из рек на промежутке 2022–2024 гг.

Наибольшая частота определения речных плумов на радиолокационных изображениях в зимний период (рисунок 6) обусловлена совокупностью факторов, связанных с особенностями взаимодействия радиолокационного сигнала с водной поверхностью и спецификой зимнего гидрологического режима. Пониженная температура воды увеличивает ее вязкость, уменьшая развитие капиллярных волн и приводя к формированию более гладкой поверхности, что усиливает контраст между турбулентной зоной выноса с повышенной шероховатостью и окружающей акваторией. Как было ранее отмечено, особое значение имеет процесс ледообразования: формирующиеся участки по границам выноса кромки льда создают четкий контраст на радиолокационных изображениях, благодаря различиям в диэлектрических свойствах и шероховатости поверхности между открытой водой и ледяным покровом, что позволяет точно определять границы плума.

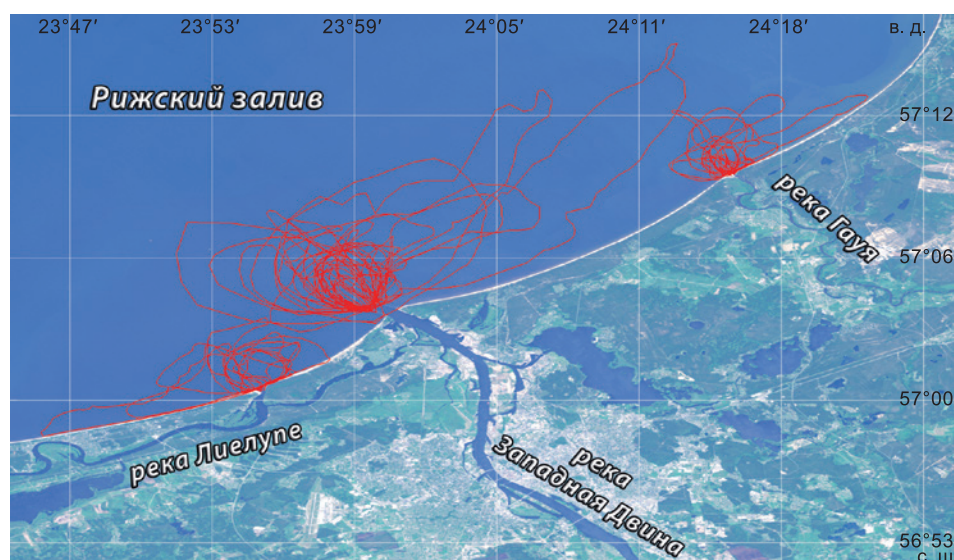


Рис. 7 – Карта пространственного распределения речных выносов 2022–2024 гг. в южной части Рижского залива

На рисунке 7 изображена карта пространственного распределения речных выносов в устьевых зонах рек Лиелупе, Западная Двина и Гауя за 2022–2024 гг. Для более информативной картины оконтуренные выносы нанесены на спутниковое изображение, полученное сенсором OLI-TIRS (Landsat 8) за 14.06.2025.

В таблице 1 продемонстрирована пространственная изменчивость выноса рек за 2022–2024 гг. Значениями Avg(S) и Avg(L) указаны средние показатели площади оконтуриваемых плюмов и их протяженность соответственно, Max(S) и Max(L) описывают максимальные значения площади и протяженности плюма за указанные годы.

Табл. 1 – Количественные показатели пространственной изменчивости выноса рек в южной части Рижского залива

Год	Река	Avg(S), км ²	Avg(L), км	Max(S), км ²	Max(L), км
2022	Лиелупе	5.30	4.20	12.11	6.00
2022	Даугава	10.01	6.76	70.11	24.1
2022	Гауя	1.34	2.92	4.86	6.55
2023	Лиелупе	11.95	5.43	21.73	10.07
2023	Даугава	25.62	7.84	83.74	17.71
2023	Гауя	5.49	3.99	9.73	8.37
2024	Лиелупе	9.01	4.05	13.69	4.65
2024	Даугава	13.07	5.35	29.01	8.10
2024	Гауя	4.98	2.78	11.80	4.50

Для оценки распространения речных выносов в южной части Рижского залива были получены данные осадков из системы Giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/>) за 2022–2024 гг. В качестве региона исследований выбран полигон, охватывающий южное побережье Рижского залива и ограниченный точками с координатами 23.6041° в. д., 56.8817° с. ш., 24.2633° в. д., 57.1893° с. ш. В качестве продукта поставляемых данных выбран GPM_3IMERGM v07 – Merged Satellite-Gauge Precipitation Estimate, входящий в состав GPM (англ. Global Precipitation Measurement – Глобальная система измерения осадков). На рисунке 8 представлена динамика пространственно усредненных значений осадков за исследуемый период.



Рис. 8 – График ежемесячного выпадения осадков в южной части Рижского залива за 2022–2024 гг.

Анализ данных за 3 года выявил значительные межгодовые и межречные различия в характеристиках выноса. Наибольшие средние и максимальные показатели площади и протяженности плюмов характерны для реки Западная Двина, что объясняется ее крупнейшим водосборным бассейном и стоком. Оценка влияния осадков показала, что их количество существенно варьировало: от минимальных значений в марте 2022 г. (6.66 мм) и мае 2023 г. (15.55 мм) до экстремальных летних максимумов (июль 2022 г. – 103.67 мм, август 2023 г. – 198.10 мм, июль 2024 г. – 165.81 мм). В 2023 г. зафиксирован пик выноса у всех рек: у реки Лиелупе средняя площадь плюма увеличилась более, чем вдвое (с 5.30 до 11.95 км²), а у реки Гауя – в четыре раза (с 1.34 до 5.49 км²), что может быть связано с повышенным выпадением осадков в этот период. К 2024 г. параметры снизились, но остались выше базовых значений 2022 г., за исключением средней протяженности выноса реки Гауя (2.78 км против 2.92 км). Максимальные значения (Max(S), Max(L)) демонстрируют высокую пространственную изменчивость, особенно у реки Западная Двина (Max(S) = 83.4 км² в 2023 г.), что указывает на эпизодическое влияние атмосферных осадков.

Заключение

В ходе проведенного исследования были проанализированы пространственно-временные особенности речных выносов в южной части Рижского залива за период 2022–2024 гг. с использованием радиолокационных спутниковых изображений. Полученные результаты подтверждают высокую информативность методов дистанционного зондирования С-диапазона для мониторинга динамики речного плюма в прибрежных морских водах. Основным фактором, определяющим контраст речного выноса на РЛИ, является взаимодействие пресной речной воды с волновыми и ветровыми процессами на поверхности моря, а также присутствие поверхностно-активных веществ, подавляющих капиллярные колебания. Детектирование плюмов существенно улучшается в зимний период, когда ледовые процессы способствуют усилению контраста между речным выносом и морской поверхностью за счет различий в шероховатости и диэлектрических свойствах. Зафиксированы характерные формы плюмов (веерообразные, спиралевидные), обусловленные действием Кориолисовой силы, прибрежных течений и гидродинамической обстановки устьевых зон.

Анализ данных выявил, что наибольшие размеры, интенсивность и частота регистрации речных плюмов связаны с выносом реки Западная Двина. Это обусловлено прежде всего природными факторами – крупнейшим водосборным бассейном и высокой водностью. В отличие от Даугавы, речные выносы рек Лиелупе и Гауя отличались меньшей площадью и менее выраженной структурой, что связано с различиями в морфологии устьевых зон и гидрологическим режимом.

Выявленные сезонные и межгодовые колебания (в частности, выраженный пик в 2023 г.) демонстрируют значительное влияние климатических условий и хозяйственной деятельности на динамику речного стока и распространение взвешенных

веществ в прибрежной зоне. С использованием системы STS было охарактеризовано более 60 плюмов за исследуемый период, что создает основу для долговременного мониторинга речного влияния на экосистему залива. Таким образом, радиолокационные спутниковые данные доказали свою эффективность как инструмент регулярного и всепогодного наблюдения за речными выносами в прибрежных морских акваториях. Полученные результаты могут быть использованы в целях экологического мониторинга и управления качеством морской среды и прибрежного водопользования.

Благодарности. Исследование выполнено за счет 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.

Список литературы

1. Иванов А. Ю., Хлебников Д. В., Коновалов Б. В., Евтушенко Н. В., Терлеева Н. В. Особенности отображения выносов рек в Черном море в данных дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 191–202. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-5-191-202>.
2. 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.
3. 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.
4. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Уваров И. А., Луян Е. А. Текущие возможности и опыт использования информационной системы See the Sea для изучения и мониторинга явлений и процессов на морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 266–287. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287>.
5. Луян Е. А., Матвеев А. А., Уваров И. А., Бочарова Т. Ю., Лаврова О. Ю., Митягина М. И. Спутниковый сервис See The Sea – инструмент для изучения процессов и явлений на поверхности океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 251–261.
6. Митягина М. И., Лаврова О. Ю. Возможности спутникового радиолокационного наблюдения плюмов речных и лагунных вод в юго-восточной части Балтийского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 288–305. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-5-288-305>.
7. Cresswell G. R., Tildesley P. C. Detecting tropical river plumes and island wakes with Radarsat // Canadian Journal of Remote Sensing. 2000. Vol. 26. No. 4. P. 267–272. <https://doi.org/10.1080/07038992.2000.10874777>.
8. Dierking W., Dall J. Sea-Ice Deformation State From Synthetic Aperture Radar Imagery – Part I: Comparison of C- and L-Band and Different Polarization // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2007. Vol. 45. Iss. 11. P. 3610–3622. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.903711>.

9. Food and agriculture Organization of the United Nations. *Irrigation in the countries of the former Soviet unions in figures: report* // Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 1997. 48 p. <https://www.fao.org/4/w6240e/w6240e00.htm> (дата обращения 22.07.2025)
10. 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. P. 3030–3044. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<3030:TROPSB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<3030:TROPSB>2.0.CO;2).
11. Jay D. A., Pan J., Orton P. M., Horner-Devine A. R. Asymmetry of Columbia River tidal plume fronts // J. Marine Systems. 2009. Vol. 78. No. 3. P. 442–459. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.11.015>.
12. 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. P. 2033–2048. <https://doi.org/10.1080/01431160802549211>.
13. Klemas V. Remote sensing of coastal plumes and ocean fronts: Overview and case study // J. Coastal Research. 2012. Vol. 28. No. 1A. P. 1–7. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00025.1>.
14. Krengel F., Bernhofer C., Chalov S., Efimov V., Efimova L., Gorbachova L., Habel M., Helm B., Kruhlov I., Nabyvanets Y., Osadcha N., Osadchyi V., Pluntke T., Reeh T., Terskii P., Karthe D. Challenges for transboundary river management in Eastern Europe – three case studies // DIE ERDE – Journal of the Geographical Society of Berlin. 2018. Vol. 149. No. 2–3. P. 157–172. <https://doi.org/10.12854/erde-2018-389>.
15. NASA/GES DISC. Giovanni: Interactive Online Visualization and Analysis Tool // <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/> (дата обращения: 22.07.2025).
16. Osadchiev A., Yankovsky A. Editorial: River plumes and estuaries // Frontiers in Marine Science. 2022. Vol. 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.986114>.
17. 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. P. 1211–1222. <https://doi.org/10.1029/1998JC900034>.
18. 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. P. 3479–3505.
19. Yurkovskis A., Poikāne R. Biogeochemical, physical and anthropogenic transformations in the Daugava River estuary and plume, and the open Gulf of Riga (Baltic Sea) indicated by major and trace elements // Journal of Marine Systems. Vol. 70. P. 77–96. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2007.03.003>.
20. Zhang X., Twarog E. M., McLaughlin D. J., Sletten M. A., Marmorino G. O., Trump C. L., Allan N. Radar scattering behavior of estuarine outflow plumes // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2004. Vol. 42. No. 2. P. 367–379. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.821056>.
21. Zheng Q., Clemente-Colon P., Yan X.-H. Timothy, Liu W., Huang N. E. Satellite synthetic aperture radar detection of Delaware Bay plumes: Jet-like feature analysis // J. Geophysical Research. 2004. Vol. 109. No. C3. P. C03031.1–C03031.11. <https://doi.org/10.1029/2003JC002100>.

Статья поступила в редакцию 15.04.2025, одобрена к печати 29.05.2025.

Для цитирования: Князев Н. А. Оценка применимости спутниковых радиолокационных данных для выявления речных выносов в южной части Рижского залива // Океанологические исследования. 2025. № 53 (3). С. 5–21. [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(3\).1](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(3).1).

ASSESSING THE APPLICABILITY OF SATELLITE RADAR DATA FOR DETECTING RIVER PLUMES IN THE SOUTHERN PART OF THE GULF OF RIGA

N. A. Knyazev

*Space Research Institute, Russian Academy of Sciences,
84/32, Profsoyuznaya st., Moscow, 117997, Russia,
e-mail: nkkniazev@cosmos.ru*

This study investigates the potential and constraints of river plume identification in the southern Gulf of Riga using satellite synthetic aperture radar (SAR) imagery from 2022–2024. The research evaluates SAR data's capacity to delineate plume boundaries and monitor their seasonal and interannual variability. The visibility of plumes in SAR images arises from capillary wave modulation at freshwater-seawater interfaces and surfactant-induced suppression of short-wave turbulence. Winter conditions improve plume visibility through ice-associated river discharge, clearly detectable in SAR images. Through the See the Sea (STS) monitoring system, 62 plumes were identified from three rivers: the Daugava (Western Dvina), Lielupe, and Gauja. The Daugava exhibited the most extensive plumes, reflecting its large watershed and high discharge volumes. Maximum plume expansion occurred in 2023, with the Lielupe and Gauja plumes covering 2–4 times larger areas than in 2022. Although 2024 saw reduced activity, plume metrics remained elevated above baseline levels. The results demonstrate that SAR data can effectively track river plumes under specific hydrometeorological conditions, proving valuable for environmental monitoring, water resource management, and coastal anthropogenic impact assessments in the Baltic region.

Keywords: satellite monitoring, river plumes, radar remote sensing, Sentinel-1 C-SAR, Lielupe, Western Dvina (Daugava), Gauja, Gulf of Riga, Baltic Sea

Acknowledgments: The study was funded by the Russian Science Foundation Grant No. 24-17-00182 “Development of the techniques for remote assessment of river outflow spreading in coastal zones” (<https://rscf.ru/project/24-17-00182/>), conducted at the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences.

References

1. Cresswell, G. R. and P. C. Tildesley, 2000: Detecting tropical river plumes and island wakes with Radarsat, *Canadian Journal of Remote Sensing*, **26** (4), 267–272, <https://doi.org/10.1080/07038992.2000.10874777>.
2. Dierking, W. and J. Dall, 2007: Sea-Ice Deformation State From Synthetic Aperture Radar Imagery – Part I: Comparison of C- and L-Band and Different Polarization. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **45** (11), 3610–3622, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.903711>.
3. Food and agriculture Organization of the United Nations. *Irrigation in the countries of the former Soviet unions in figures: report in Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Rome, 1997, <https://www.fao.org/4/w6240e/w6240e00.htm> (last accessed in 22.07.2025).

4. Hessner, K., A. Rubino, P. Brandt, and W. Alpers, 2001: The Rhine outflow plume studied by the analysis of synthetic aperture RADAR data and numerical simulations. *J. Physical Oceanography*, **31** (10), 3030–3044, [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<3030:TROPSB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<3030:TROPSB>2.0.CO;2).
5. Ivanov, A. Yu., D. V. Khlebnikov, B. V. Konovalov, N. V. Evtushenko, and N. V. Terleeva, 2018: Osobennosti otobrazheniya vynosov rek v Chyornom more v dannyh distancionnogo zondirovaniya (Manifestations of river outflows in the Black Sea in remote sensing data). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, **15** (5), 191–202, <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-5-191-202>.
6. Jay, D. A., J. Pan, P. M. Orton, and A. R. Horner-Devine, 2009: Asymmetry of Columbia River tidal plume fronts. *J. Marine Systems*, **78** (3), 442–459, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.11.015>.
7. Jiang, L., X-H. Yan, and V. Klemas, 2009: Remote sensing for the identification of coastal plumes: case studies of Delaware Bay. *Intern. J. Remote Sensing*, **30**, 2033–2048, <https://doi.org/10.1080/01431160802549211>.
8. Klemas, V., 2012: Remote sensing of coastal plumes and ocean fronts: Overview and case study. *J. Coastal Research*, **28** (1A), 1–7, <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00025.1>.
9. Krengel, F., C. Bernhofer, S. Chalov, V. Efimov, L. Efimova, L. Gorbachova, M. Habel, B. Helm, I. Kruhlov, Y. Nabyanets, N. Osadcha, V. Osadchyi, T. Pluntke, T. Reeh, P. Terskii, and D. Karthe, 2018: Challenges for transboundary river management in Eastern Europe – three case studies. *DIE ERDE – Journal of the Geographical Society of Berlin*, **149** (2–3), 157–172, <https://doi.org/10.12854/erde-2018-389>.
10. Lavrova, O. Yu., E. V. Krayushkin, D. M. Soloviev, M. N. Golenko, N. N. Golenko, N. A. Kalashnikova, and A. N. Demidov, 2014: Vliyanie vetrovogo vozdejstviya i gidrodinamicheskikh processov na rasprostranenie vod Kaliningradskogo zaliva v akvatorii Baltijskogo morya (Influence of wind and hydrodynamic processes on propagation of the Vistula lagoon waters into the Baltic Sea). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, **11** (4), 76–99.
11. Lavrova, O. Yu., M. I. Mityagina, and A. G. Kostianoy, 2016: *Sputnikovyie metody vyyavleniya i monitoringa zon ekologicheskogo riska morskikh akvatorii* (Satellite methods for detecting and monitoring marine zones of ecological risk), Moscow, IKI RAS, 334 p.
12. Lavrova, O. Yu., M. I. Mityagina, I. A. Uvarov, and E. A. Loupian, 2019: Tekushchie vozmozhnosti i opyt ispol'zovaniya informacionnoj sistemy See the Sea dlya izucheniya i monitoringa yavlenij i processov na morskoj poverhnosti (Current capabilities and experience of using the See the Sea information system for studying and monitoring phenomena and processes on the sea surface). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, **16** (3), 266–287, <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287>.
13. Loupian, E. A., A. A. Matveev, I. A. Uvarov, T. Yu. Bocharova, O. Yu. Lavrova, and M. I. Mityagina, 2024: Sputnikovyj servis See The Sea – instrument dlya izucheniya processov i yavlenij na poverhnosti okeana (The Satellite Service See the Sea – a tool for the study of oceanic phenomena and processes). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, **21** (5), 321–332.
14. Mityagina, M. I. and O. Yu. Lavrova, 2024: Vozmozhnosti sputnikovogo radiolokacionnogo nablyudeniya plyumov rechnyh i lagunnyh vod v yugo-vostochnoj chasti Baltijskogo morya (Feasibility of satellite radar observation of river and lagoon plumes in the southeastern Baltic Sea). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, **21** (5), 288–305, <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-5-288-305>.

15. NASA/GES DISC. Giovanni: Interactive Online Visualization and Analysis Tool, <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/> (last accessed in 22.07.2025).
16. Osadchiev, A. and A. Yankovsky, 2022: Editorial: River plumes and estuaries. *Frontiers in Marine Science*, **9**, <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.986114>.
17. Sletten, M., G. O. Marmorino, and T. F. Donato, 1999: An airborne, real aperture radar study of the Chesapeake Bay outflow plume. *J. Geophysical Research*, **104** (C1), 1211–1222, <https://doi.org/10.1029/1998JC900034>.
18. Vogelzang, J., K. G. Ruddick, and J. B. Moens, 1997: On the signatures of river outflow fronts in radar imagery. *Intern. J. Remote Sensing*, **18**, 3479–3505.
19. Yurkovskis, A., and R. Poikāne, 2008: Biogeochemical, physical and anthropogenic transformations in the Daugava River estuary and plume, and the open Gulf of Riga (Baltic Sea) indicated by major and trace elements. *Journal of Marine Systems*, **70**, 77–96, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2007.03.003>.
20. Zhang, X., E. M. Twarog, D. J. McLaughlin, M. A. Sletten, G. O. Marmorino, C. L. Trump, and N. Allan, 2004: Radar scattering behavior of estuarine outflow plumes. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, **42** (2), 367–379, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.821056>.
21. Zheng, Q., P. Clemente-Colon, X.-H. Yan, W. Timothy Liu, and N. E. Huang, 2004: Satellite synthetic aperture radar detection of Delaware Bay plumes: Jet-like feature analysis. *J. Geophysical Research*, **109** (C3), C03031.1–C03031.11, <https://doi.org/10.1029/2003JC002100>.

Submitted 15.04.2025, accepted 29.05.2025.

For citation: Knyazev, N. A., 2025: Assessing the applicability of satellite radar data for detecting river plumes in the southern part of the Gulf of Riga. *Journal of Oceanological Research*, **53** (3), 5–21, [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(3\).1](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(3).1).