

Проявление речных и лагунных выносов в данных спутника SWOT

М. В. Врублевский¹, О. Ю. Лаврова^{1,2}

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: vrublevsky@d902.iki.rssi.ru

² *МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, 119454, Россия*

Инновационная спутниковая миссия широкополосной альтиметрии SWOT (*англ.* Surface Water and Ocean Topography) предоставляет данные о топографии Мирового океана в виде продуктов различного разрешения, в том числе 250 м. Такое разрешение позволяет исследовать субмезомасштабные процессы поверхности океана, а использование радиолокационных частот даёт возможность изучать явления в условиях облачности или ограниченной освещённости. Совокупность преимуществ миссии, но при этом недостаточное покрытие по времени районов изучения речных и лагунных выносов другими данными стимулирует исследование возможностей применения данных SWOT в таких задачах. Таким образом, с целью оценки применимости данных спутника SWOT для мониторинга речных и лагунных выносов были проанализированы 813 наблюдений восьми хорошо изученных районов речных и лагунных выносов, обнаружены 145 проявлений выносов в поле удельной эффективной площади рассеяния по данным спутника SWOT, среди которых верифицированы 84. Проявления речных и лагунных выносов классифицированы на четыре типа. В настоящей работе впервые продемонстрирована возможность применения данных удельной эффективной площади рассеяния интерферометра Ка-диапазона спутника SWOT для проведения мониторинга речных и лагунных выносов. Использование данных SWOT существенно расширяет возможности исследования выносов наряду с методами, основанными на анализе данных оптических и радиолокационных изображений.

Ключевые слова: спутниковая альтиметрия, спутниковая интерферометрия, SWOT, KaRIn, речные выносы, выносы из залива

Одобрена к печати: 11.02.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-304-319

Введение

Исследованию процессов распространения речных вод в море уделяется большое внимание во всём мире, поскольку эти процессы играют существенную роль в формировании гидрологических, гидрохимических и гидробиологических условий прибрежных зон. Основные теоретические результаты были изложены ещё в работах (Лисицын, 1994; McClimans, 1988; O'Donnell, 1993). 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 речных выносов. Области распространения распреснённых вод в море успешно выявляются на спутниковых изображениях, полученных сенсорами оптического диапазона (Лаврова и др., 2022; Назирова и др., 2019, 2023; Devlin et al., 2015; Dzwonkowski, Yan, 2005; Johnson et al., 2001; Lavrova et al., 2016; Ody et al., 2016; Osadchiv, Sedakov, 2019; Tavora et al., 2023). Список подобных работ может быть существенно продолжен. Но существуют естественные ограничения на применение спутниковых данных оптического диапазона: облачность и отсутствие дневного света (ночь, полярная ночь).

Использование для наблюдения выносов рек и заливов данных спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой, работающих в коротком сантиметровом диапазоне,

не имеет ограничений, связанных с подобными проблемами. Электромагнитные волны этого диапазона проникают через облачный покров, обеспечивая круглосуточное и всепогодное наблюдение океана. На данный момент существует целый ряд работ, посвящённых изучению речных и эстуарных плюмов на основе данных спутниковых и самолётных радиолокаторов с синтезированной апертурой (Cresswell, Tildesley, 2000; Hessner et al., 2001; Klemas, 2012; Konik, Osadchiev, 2025; Li et al., 2017; Zhang et al., 2004; Zheng et al., 2004). Во всех перечисленных исследованиях рассматривается распространение выносов рек в приливных морях. В то же время работ, посвящённых радиолокационным (РЛ) наблюдениям выносов речных и лагунных вод в морях с незначительными приливами, практически нет. Можно отметить только публикацию (Иванов и др., 2018), направленную на изучение особенностей проявления на РЛ-изображениях выносов горных рек восточного побережья Чёрного моря, и работы (Князев, 2025; Митягина, Лаврова, 2024; Mityagina, 2025), в которых исследуется возможность использования данных радиолокаторов с синтезированной апертурой для выявления выносов рек в Балтийском и Каспийском морях — морях с незначительными приливами.

Следует отметить, что доступных РЛ-изображений, получаемых со спутников дистанционного зондирования Земли, не так много, что сильно снижает временную частоту наблюдений и делает необходимым поиск дополнительных источников РЛ-наблюдений акваторий речных выносов. В настоящей работе предлагается рассмотреть возможность применения данных РЛ-интерферометра Ка-диапазона KaRIn (*англ.* Ka-band Radio Interferometer) спутника SWOT (*англ.* Surface Water and Ocean Topography) для наблюдения речных и лагунных выносов.

При том, что наиболее распространёнными диапазонами частот для радиолокационных спутниковых систем являются L (1–2 ГГц), X (8–12 ГГц) и C (4–8 ГГц), а для альтиметрии ещё и Ku (12–18 ГГц), прибор KaRIn работает на частотах Ка-диапазона (27–40 ГГц), который, как известно, претерпевает более сильное затухание в атмосфере, в особенности во время дождя. Тем не менее Ка-диапазон считается перспективным для спутниковых радиолокаторов (Ardhuin et al., 2018), что подтверждается опытом миссии альтиметрии SARAL (*англ.* Satellite with ARgos and ALtika), в рамках которой выяснилось, что качество и доступность данных от использования Ка-диапазона не страдают и покрытие данными превышает 99,5 % (Verroux et al., 2018). Также эксперименты со стационарной океанографической платформы (Yurovsky et al., 2023) показали, что восстановление полей морской поверхности по сигналу радара Ка-диапазона основано на уже известных методах, развитых в спутниковой радиолокации. Один из таких методов — анализ удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР).

При благоприятных условиях (в первую очередь ветровых) различные океанические явления и процессы могут обнаруживаться в виде локальных контрастов УЭПР за счёт модуляции интенсивности РЛ-сигнала, вызванного гидродинамическими и геометрическими механизмами. Гидродинамическая модуляция обусловлена изменчивостью характеристик рассеивателей микроволнового излучения (брэгговской ряби). Геометрический механизм модуляции УЭПР связан с модуляцией локального угла падения микроволн из-за наклонов поверхности и вариациями дальности от радара до морской поверхности вследствие волнения (Булатов и др., 2003; Горшков и др., 2003; Kudryavtsev et al., 2014; Plant, 1989).

Соответственно, поля УЭПР, полученные в Ка-диапазоне, могут анализироваться известными методами анализа РЛ-данных, что позволяет проводить исследования океанологических явлений по данным УЭПР прибора KaRIn спутника SWOT. И такие исследования с применением данных УЭПР KaRIn начинают появляться с целью изучения мезо- и субмезомасштабных вихрей, идентификации полыней (Dibarboue et al., 2025) и анализа внутренних волн (da Silva et al., 2025), что подтверждает потенциал использования данных SWOT для наблюдения речных и лагунных выносов.

Таким образом, развитие методов наблюдения прибрежных акваторий по данным РЛ-интерферометра Ка-диапазона KaRIn спутника SWOT представляется актуальным и перспективным направлением, а также формирует цель настоящей работы — оценить возможность применения данных KaRIn SWOT для изучения и мониторинга речных и лагунных выносов.

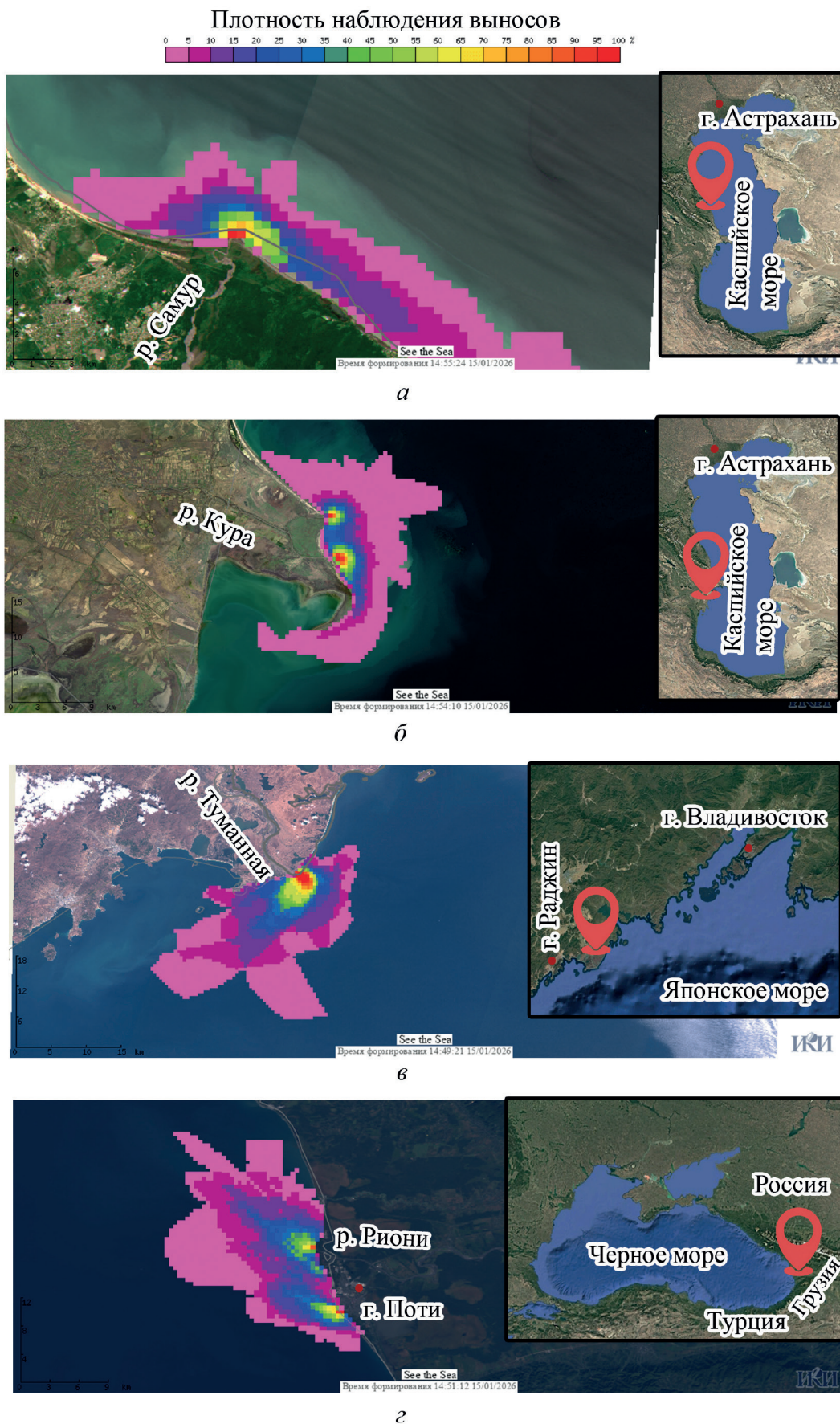


Рис. 1. Плотность наблюдения выносов в исследуемых районах:
 а — река Самур; б — река Кура; в — река Туманная; г — река Риони

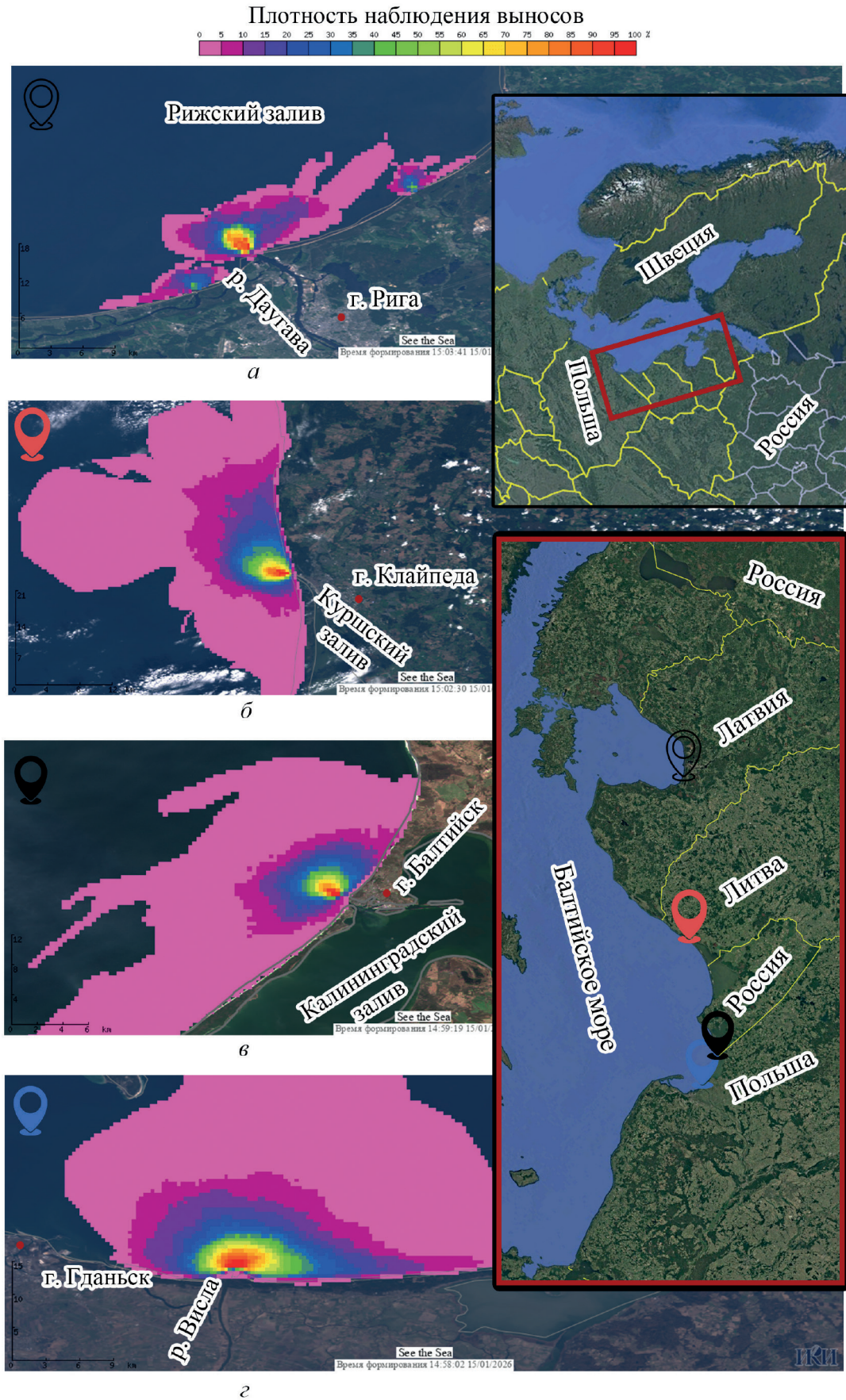


Рис. 2. Плотность наблюдения выносов в исследуемых районах Балтийского моря: а — река Даугава; б — из Куршского залива; в — из Калининградского залива; г — река Висла

Районы исследования

Для изучения проявления речных выносов в поле УЭПР, полученном по данным KaRIn SWOT, были выбраны хорошо исследованные специалистами ИКИ РАН районы речных выносов, а именно:

1. Устья рек Вислы и Даугавы и каналы Куршского и Калининградского заливов в юго-восточной части Балтийского моря. Этот регион примечателен тем, что помимо речных (Князев, 2025; Митягина и др., 2024) здесь встречаются и выносы из заливов (Митягина, Лаврова, 2024; Назирова, Краюшкин, 2021). К тому же это регион с высокой частотой облачности, вследствие чего развитие методов РЛ-наблюдения особенно актуально для этой акватории.
2. Устье реки Риони в северо-восточной части Чёрного моря, находящегося под влиянием речного стока горных рек, воды которых влекут большие объёмы взвешенного вещества (Лаврова и др., 2016; Lavrova et al., 2015).
3. Устья рек Самур и Куры в западной части Каспийского моря, крупнейшего замкнутого водоёма. Речные выносы этой акватории исследованы в работе (Mityagina, 2025).
4. Устье реки Туманной в Японском море как акватории, подверженной существенным приливам, что может сказываться на динамике речного плюма. Наблюдения речных выносов реки Туманной, например, с помощью данных оптического диапазона проводились в работе (Дубина, Катин, 2018).

Плотность наблюдения выносов, полученная из спутникового сервиса для изучения процессов и явлений на поверхности океана STS (*англ.* See the Sea) (Лаврова и др., 2019), показана на *рис. 1, 2* (см. с. 306, 307). Под плотностью наблюдения выносов понимается пространственное распределение частоты наблюдения рассматриваемого явления в пикселе относительно общего числа наблюдений.

Материалы и методы

Продукты широкополосной альтиметрии SWOT

Космический аппарат SWOT — инновационная альтиметрическая спутниковая миссия, разработанная с целью изучения гидрологии и океанографии, а также демонстрации возможностей и экспериментальной обработки новой инновационной технологии широкополосной альтиметрии. Запуск спутника состоялся 16 декабря 2022 г. на несолнечно-синхронную орбиту с наклоном 78° и высотой 891 км.

Основные приборы спутника — двухчастотный надирный альтиметр Poseidon-3C и радиолокационный интерферометр Ka-диапазона KaRIn. Особенность миссии заключается в применении технологии широкополосной альтиметрии, основанной на синтезе радиолокационной интерферометрии и надирной радиолокационной альтиметрии, что даёт возможность проводить измерения не только в надир, а охватывать площадь шириной около 120 км (по две полосы шириной 50 км).

В работе использованы две версии продукта несглаженных данных о высоте поверхности моря уровня L2: SWOT_L2_LR_SSH_UNSMOOTHED_2.0 (https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/SWOT_L2_LR_SSH_UNSMOOTHED_2.0) (с 1-го по 32-й цикл) и SWOT_L2_LR_SSH_UNSMOOTHED_D (https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/SWOT_L2_LR_SSH_UNSMOOTHED_D) (с 32-го по текущий 42-й цикл), за период наблюдения с августа 2023 г. по настоящее время. Оба продукта предоставляются Центром распространения активных данных по физической океанографии PODAAC (*англ.* Physical Oceanography Distributed Active Archive Center) и содержат данные о высоте поверхности моря, УЭПР в безразмерных единицах и вспомогательных параметрах без дополнительного сглаживания с разрешением около 250 м. Использованные треки и количество наблюдений для каждого трека, пересекающего каждый тестовый район, приведены в *таблице*.

Количество проанализированных наблюдений по трекам SWOT для каждого района

Район выносов	Треки SWOT	Число наблюдений
Река Кура	372	38
	109	36
	Всего:	74
Река Самур	94	34
	137	35
	415	36
	Всего:	105
Река Риони	456	39
	499	36
	Всего:	75
Река Туманная	32	38
	75	36
	Всего:	74
Река Даугава	195	40
	290	38
	501	38
	568	36
	Всего:	152
Река Висла	68	35
	529	37
	Всего:	72
Куршский залив	40	37
	223	38
	318	37
	Всего:	112
Калининградский залив	68	35
	223	38
	346	39
	529	37
	Всего:	149
Итого:	813	

Продукты верификации и оценки метеоусловий

С целью верификации предположения, что наблюдаемые особенности поля УЭПР следует считать проявлениями выносов, были привлечены данные квазиодновременной (отличной по времени от времени съёмки SWOT не более чем на 24 ч) спутниковой съёмки других сенсоров. Это данные:

- оптических сенсоров высокого пространственного разрешения (10–30 м) приборов MSI (*англ.* Multi Spectral Instrument) космических аппаратов серии Sentinel-2, OLI/TIRS (*англ.* Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor) и ETM+ (*англ.* Enhanced Thematic Mapper Plus) космических аппаратов серии Landsat;
- оптических сенсоров среднего разрешения (300 м) OLCI (*англ.* Ocean and Land Colour Instrument) Sentinel-3;
- радиолокатора с синтезированной апертурой SAR-C (*англ.* Synthetic Aperture Radar) Sentinel-1 разрешением 10 м.

С целью изучения гидрометеоусловий, сопровождающих съёмку KaRIn SWOT, были использованы данные модели глобального реанализа NCEP (*англ.* National Centers for Environmental Prediction), а именно: скорость и направление ветра, степень облачности, а также количество осадков.

Поиск и анализ данных для верификации и оценки метеорологических условий проводился в сервисе STS (Уваров и др., 2013).

Для каждого наблюдения, в особенности наблюдения с предполагаемым проявлением выноса в поле УЭПР, выполнялся поиск альтернативного источника наблюдения выноса. За верифицированное наблюдение проявления выноса было принято наличие проявления на РЛ-изображении или оптическом с временем съёмки, отличным менее чем на 24 ч от SWOT.

Результаты

Выявление проявлений выносов в данных SWOT

Выносы обусловлены речным или лагунным стоком, создающим пресноводный плюм, границы которого обозначены поверхностными фронтами, проявляющимися как узкие, вытянутые области контрастов УЭПР.

Всего из 813 проанализированных сцен обнаружено 145 таких проявлений выносов в поле УЭПР KaRIn SWOT. Примеры проявления выносов для каждого района показаны на *рис. 3* (см. с. 310).

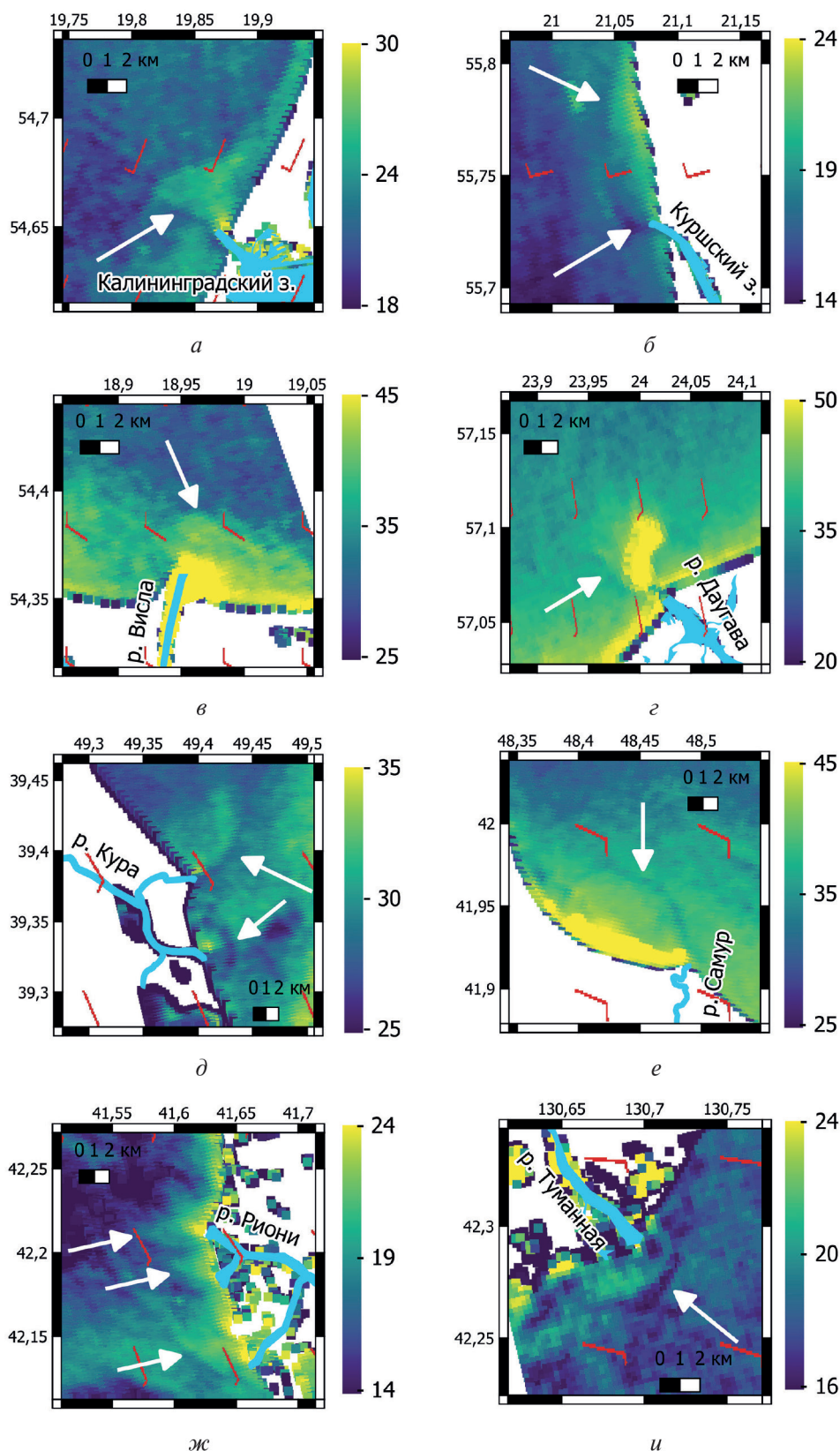


Рис. 3. Примеры проявлений выносов для каждого района в данных SWOT, даты съёмки: *a* — 12.09.2025; *б* — 30.05.2025; *в* — 05.02.2025; *г* — 14.01.2024; *д* — 21.05.2024; *е* — 06.10.2023; *ж* — 28.10.2025; *и* — 09.06.2025. Для каждого района справа приведена цветовая шкала УЭПР, красным обозначено направление ветра по данным реанализа NCEP из сервиса STS, голубые полигоны — контуры рассмотренных рек и заливов, белые стрелки указывают на проявление поверхностных фронтов на границах выносов

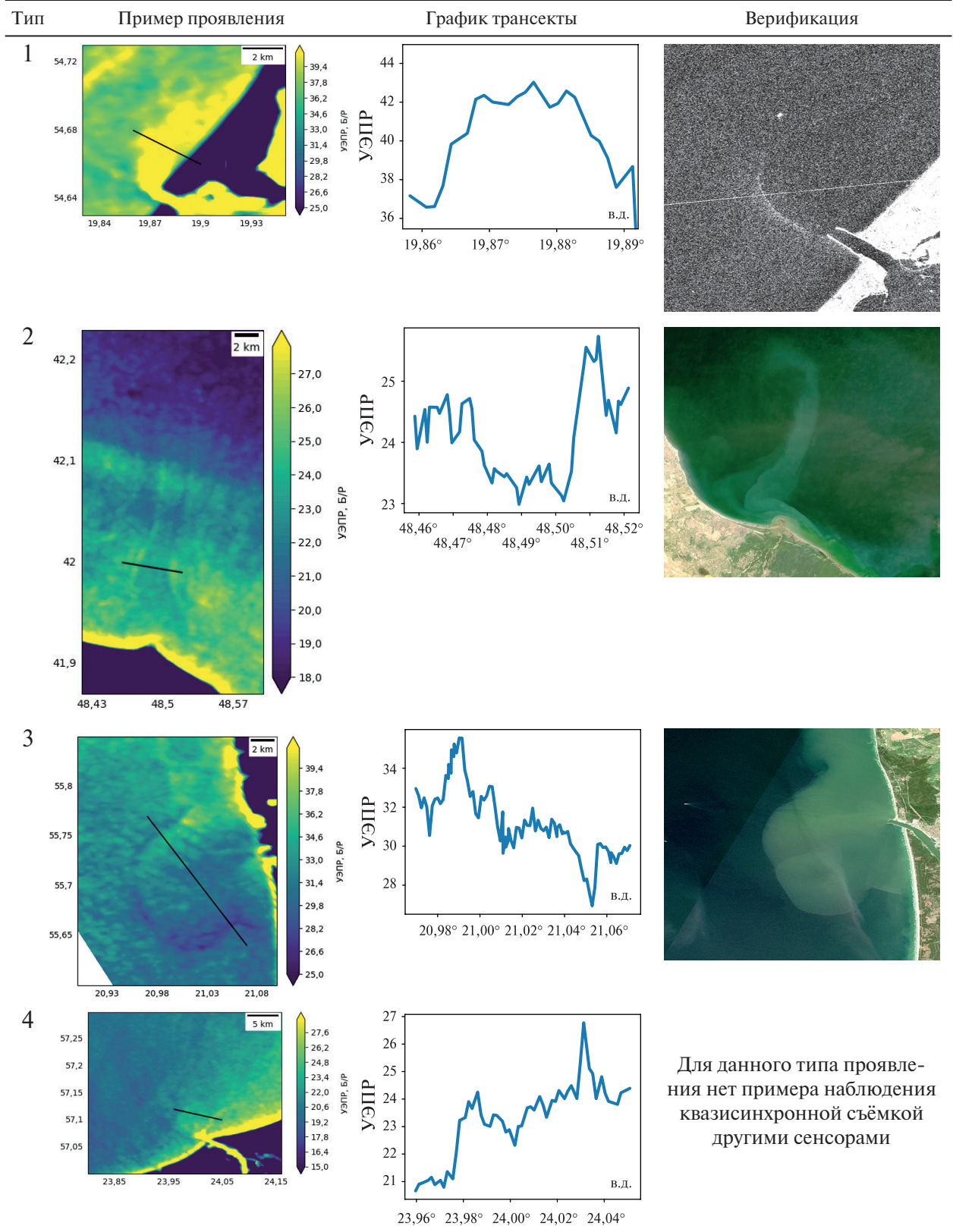


Рис. 4. Примеры основных выявленных типов проявления выносов в поле УЭПР KaRIn SWOT, графики модуляционных характеристик, а также верификационные данные наблюдаемых проявлений

Идентифицированные как проявления выносов по данным KaRIn SWOT картины пространственного распределения поля УЭПР были классифицированы на четыре типа по механизму визуализации плюмов:

- 1) область положительного контраста;
- 2) область отрицательного контраста;
- 3) границы отрицательного контраста, без ярко выраженной области контраста;
- 4) границы положительного контраста, без ярко выраженной области контраста.

Примеры выделенных типов проявлений, а также результаты выявления особенностей модуляции представлены на *рис. 4* (см. с. 311).

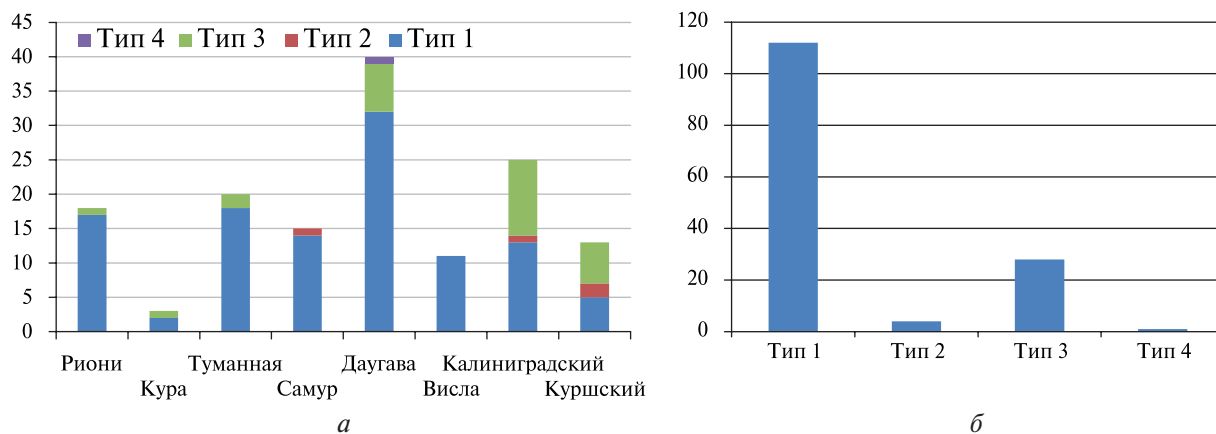


Рис. 5. Число проявлений выносов: *a* — по районам исследования; *б* — по типам

Статистика распределения типов выносов показана на *рис. 5*. Из него видно, что независимо от источника выноса наиболее популярный тип проявления выноса — тип 1, при этом тип 3 (второй по встречаемости) наиболее часто наблюдается при выносах из залива и в Балтийском море.

Верификация

Из 145 обнаруженных выносов удалось верифицировать по данным оптических или РЛ-изображений 84 проявления.

Как видно из приведённых примеров на *рис. 4*, границы или целые области контраста в полях УЭПР совпадают, пересекаются или имеют близкие очертания к тем границам и областям, которые идентифицируются по данным квазисинхронной съёмки других сенсоров, оптических или РЛ.

Анализ метеорологических данных

По данным предыдущих исследований в тестовых районах направления выносов определяются преимущественно ветровым воздействием. Также в рамках настоящего анализа замечено, что направление проявления выносов в поле УЭПР KaRIn SWOT определяется и совпадает с направлением ветра, полученным из реанализа NCEP и проанализированным в STS (см. примеры на *рис. 3*).

Проявления выносов в поле УЭПР идентифицируются при ветре, скорость которого не превышает 12 м/с. При более сильных ветрах наблюдаемая картина аналогична картинкам на РЛ-изображениях — вытянутые вдоль направления ветра контрасты изображения, маскирующие проявления других явлений на морской поверхности. В случаях, когда ветер со сто-

роны суши, проявления могут маскироваться проявлениями ветровой тени (Лаврова и др., 2011). При этом такой ветер формирует контрасты УЭПР не только в районе устья, но и в других областях береговой линии.

Также наблюдение морской поверхности в поле УЭПР SWOT, как было упомянуто ранее, ограничено содержанием молекул воды в атмосфере. В случаях интенсивных осадков картина в поле УЭПР была представлена практически равномерными областями низких значений УЭПР (менее 5). Как показал настоящий анализ, данных о количестве осадков недостаточно, чтобы установить возможность наблюдения морской поверхности, так как даже при их отсутствии, но при высокой степени облачности может наблюдаться картина, аналогичная как при интенсивных осадках. Но также при высокой доле (в %) облачности (в том числе 100 % по данным NCEP) и небольших осадках (в том числе около 3–4 кг/м²) поле УЭПР находится в среднем в значениях 15–40 и даже даёт возможность идентифицировать проявления выносов. Таким образом, параметры о степени облачности и количестве осадков метеоданных реанализа NCEP не обеспечивают достаточной информацией для оценки возможности наблюдения морской поверхности в поле УЭПР KaRIn SWOT, но позволяют определить зависимость направления распространения речного выноса от направления ветра и оценить по силе ветра возможность идентификации проявлений. Для решения задачи оценки «прозрачности облачности» для KaRIn SWOT необходимо привлечение данных о влагосодержании атмосферы, что выходит за рамки настоящей работы.

Выводы и обсуждение

Проведённое исследование демонстрирует возможность изучения речных и лагунных выносов анализом пространственного распределения УЭПР, полученной по данным РЛ-интерферометра Ka-диапазона KaRIn спутника широкополосной альтиметрии SWOT, с целью идентификации проявлений речных и лагунных выносов. Для обоснования этой возможности были проанализированы 813 сцен съёмки восьми районов исследования спутником SWOT, из которых 145 определены как сцены, на которых наблюдаются проявления выносов. Среди них удалось верифицировать 84 проявления за счёт привлечения данных квазисинхронной спутниковой съёмки оптического и радиолокационного диапазонов.

Привлечение метеоданных реанализа NCEP позволило установить, что благоприятными для наблюдения поля УЭПР по данным SWOT KaRIn видятся условия ветра, не превышающего по скорости 12 м/с. Также анализ метеоданных NCEP показал, что информации о количестве осадков и степени облачности недостаточно для оценки возможности наблюдения в поле УЭПР процессов на морской поверхности и необходимо привлекать, вероятно, данные о влагосодержании атмосферы. При этом небольшая облачность и осадки малой интенсивности не препятствуют наблюдению морской поверхности, что даёт преимущество в использовании данных SWOT для изучения процессов поверхности океана перед методами, основанными на анализе данных оптической съёмки, тем самым выступая дополнительным источником данных для анализа наравне с данными РЛ-съёмки в условиях облачности и недостаточной освещённости.

При этом отсутствие проявлений выносов в поле УЭПР KaRIn SWOT не указывает на отсутствие речного выноса, что подтверждается случаями наблюдения речных плюмов на оптических изображениях в моменты времени, когда в поле УЭПР KaRIn SWOT проявления выносов не идентифицируются. Анализ условий проявления речных и лагунных выносов в поле УЭПР KaRIn SWOT ещё требует развития.

Тем не менее речные и лагунные выносы можно идентифицировать обнаружением характерных признаков одного из четырёх типов проявлений выносов, описанных в настоящей работе. Выносы в данных SWOT могут проявляться как положительные или отрицательные контрасты поля УЭПР относительно окружающего поля или как положительные или отрицательные контрасты поля УЭПР, представляющие собой не области, а границы речных и лагунных выносов.

Предыдущие исследования показали, что в рассмотренных регионах направления выносов определяются направлением ветра, анализ в рамках настоящей работы, основанный на привлечении синхронных со съёмкой SWOT метеоданных реанализа NCEP, это подтверждает.

Таким образом, использование данных KaRIn SWOT позволяет проводить наблюдения (при благоприятных метеоусловиях) районов интереса с целью мониторинга речных и лагунных выносов наряду с методами, основанными на анализе данных других сенсоров других спектральных диапазонов.

Стоит отметить, что на всех безоблачных оптических изображениях, момент съёмки которых был квазисинхронным съёмке SWOT, в чьих данных присутствует предполагаемое проявление, идентифицирован плюм в поле цветности или вынос в поле мутности. Не на всех полученных квазисинхронной съёмкой РЛ-изображениях был идентифицирован вынос, когда в поле УЭПР вынос проявлялся, это может быть связано с тем, что гидрометеорологические условия проявлений выносов на РЛ-изображениях и в поле УЭПР SWOT KaRIn могут отличаться.

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

Литература

1. Булатов М. Г., Кравицов Ю. А., Лаврова О. Ю. и др. Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // Успехи физ. наук. 2003. Т. 173. № 1. С. 69–87. DOI: 10.3367/UFNr.0173.200301d.0069.
2. Горшков К. А., Долина И. С., Соустова И. А., Троицкая Ю. И. Модуляция коротких ветровых волн в присутствии интенсивных внутренних волн. Эффект модуляции инкремента // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 5. С. 661–672.
3. Дубина В. А., Катин И. О. Особенности трансграничного переноса поверхностных вод в северо-западной части Японского моря по многолетним спутниковым наблюдениям // Вестн. Дальневосточного отд-ния Российской акад. наук. 2018. № 6. С. 13–19. DOI: 10.25808/08697698.2018.202.6.002.
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. Князев Н. А. Оценка применимости спутниковых радиолокационных данных для выявления речных выносов в южной части Рижского залива // Океанол. исслед. 2025. Т. 53. № 3. С. 5–21. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(3).1.
6. Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Митягина М. И., Гинзбург А. И., Шеремет Н. А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 480 с.
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., Лупян Е. А. Текущие возможности и опыт использования информационной системы See the Sea для изучения и мониторинга явлений и процессов на морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 266–287. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
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. Лисицын А. П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
11. Митягина М. И., Лаврова О. Ю. Возможности спутникового радиолокационного наблюдения плюмов речных и лагунных вод в юго-восточной части Балтийского моря // Современные про-

- блемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 288–305. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-288-305.
12. 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.
 13. 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.
 14. 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.
 15. Назирова К. Р., Лаврова О. Ю., Алферьева Я. О., Князев Н. А. 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.
 16. 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.
 17. Ardhuin F., Aksenov Y., Benetazzo A. et al. Measuring currents, ice drift, and waves from space: the Sea surface Kinematics Multiscale monitoring (SKIM) concept // Ocean Science. 2018. V. 14. Iss. 3. P. 337–354. DOI: 10.5194/os-14-337-2018.
 18. 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.
 19. da Silva J. C. B., Magalhaes J. M., Bossler A. et al. Internal solitary wave parameters from SWOT KaRIn sea surface topography: A case study in the Tropical Atlantic // Science of Remote Sensing. 2025. V. 12. Article 100307. DOI: 10.1016/j.srs.2025.100307.
 20. 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. Iss. 10. P. 12909–12941. DOI: 10.3390/rs71012909.
 21. Dibarboure G., Anadon C., Briol F. et al. Blending 2D topography images from the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) mission into the altimeter constellation with the Level-3 multi-mission Data Unification and Altimeter Combination System (DUACS) // Ocean Science. 2025. V. 21. Iss. 1. P. 283–323. DOI: 10.5194/os-21-283-2025.
 22. 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. DOI: 10.1016/j.csr.2005.06.011.
 23. 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.
 24. Johnson D. R., Weidemann A., Arnone R., Davis C. O. Chesapeake Bay outflow plume and coastal upwelling events: Physical and optical properties // J. Geophysical Research: Oceans. 2001. V. 106. No. C6. P. 11613–11622. DOI: 10.1029/1999JC000185.
 25. 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. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-11-00025.1.
 26. Konik A., Osadchiv A. Dynamics of the Iokanga River plume according to SAR and optical satellite data // J. Marine Systems. 2025. V. 250. Article 104093. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2025.104093.
 27. Kudryavtsev V., Kozlov I., Chapron B., Johannessen J. A. Quad-polarization SAR features of ocean currents // J. Geophysical Research: Oceans. 2014. V. 119. No. 9. P. 6046–6065. DOI: 10.1002/2014JC010173.
 28. Lavrova O. Yu., Soloviev D. M., Mityagina M. I. et al. Revealing the influence of various factors on concentration and spatial distribution of suspended matter based on remote sensing data // Proc. SPIE. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2015. V. 9638. Article 96380D. DOI: 10.1117/12.2193905.
 29. Lavrova O. Yu., Soloviev D. M., Strockov M. A. et al. River plumes investigation using Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI data // Proc. SPIE. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2016. V. 9999. Article 99990G. DOI: 10.1117/12.2241312.
 30. 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.

31. *McClimans T.A.* Estuarine fronts and river plumes // Physical processes in estuaries / eds. J. Dronkers, W. van Leussen. Springer, 1988. P. 55–69.
32. *Mityagina M. I.* Kura River plume patterns observed by satellite SAR in the coastal zone of the southwestern Caspian Sea // *Ecologica Montenegrina*. 2025. V. 85. P. 89–106. DOI: 10.37828/em.2025.85.5.
33. *O'Donnell J.* Surface fronts in estuaries: A review // *Estuaries*. 1993. V. 16. P. 12–39. DOI: 10.2307/1352761.
34. *Ody A., Doxaran D., Vanhellemont Q. et al.* Potential of high spatial and temporal ocean color satellite data to study the dynamics of suspended particles in a micro-tidal river plume // *Remote Sensing*. 2016. V. 8. Iss. 3. Article 245. DOI: 10.3390/rs8030245.
35. *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.
36. *Plant W.J.* The modulation transfer function: Concept and applications // *Radar Scattering from Modulated Wind Waves: Proc. Workshop on Modulation of Short Wind Waves in the Gravity-Capillary Range by Non-Uniform Currents*. Bergen aan Zee, The Netherlands, 24–26 May 1988. Dordrecht, Netherlands: Springer, 1989. P. 155–172. DOI: 10.1007/978-94-009-2309-6_13.
37. *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. Article 1215327. 18 p. DOI: 10.3389/fmars.2023.1215327.
38. *Verron J., Bonnefond P., Aouf L. et al.* The benefits of the Ka-band as evidenced from the SARAL/AltiKa altimetric mission: Scientific applications // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. Iss. 2. Article 163. DOI: 10.3390/rs10020163.
39. *Yurovsky Yu. Yu., Malinovsky V. V., Korinenko A. E., Glukhov L. A., Dulov V. A.* Prospects for radar monitoring of wind speed, wind wave spectra and velocity of currents from an oceanographic platform // *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*. 2023. No. 3. P. 40–54.
40. *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.
41. *Zheng Q., Clemente-Colón P., Yan X.-H. et al.* Satellite synthetic aperture radar detection of Delaware Bay plumes: Jet-like feature analysis // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2004. V. 109. No. C3. Article C03031. 11 p. DOI: 10.1029/2003JC002100.

Manifestation of river and lagoon outflows in SWOT satellite data

M. V. Vrublevsky¹, O. Yu. Lavrova^{1,2}

¹ *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*

E-mail: vrublevsky@d902.iki.rssi.ru

² *MIREA — Russian Technological University, Moscow 119454, Russia*

The innovative SWOT wide-swath altimetry satellite mission provides data on the topography of the World Ocean in the form of products with various resolutions, including 250 m. This resolution allows for the study of submesoscale processes at the ocean surface, whereas the use of radar frequencies makes it possible to study phenomena in cloudy conditions or limited light. The combination of mission advantages and insufficient temporal coverage of river and lagoon outflows study areas by other data stimulates research into the possibilities of using SWOT data for such tasks. Thus, in order to assess the applicability of SWOT satellite data for monitoring river and lagoon outflows, 813 observations of eight well-studied areas of river and lagoon outflows were analyzed, 145 manifestations of outflows were detected in the field of normalized radar cross section according to SWOT satellite data, of which 84 were verified. River and lagoon outflows were classified into four types. This study demonstrates for the first time the applicability of SWOT Ka-band interferometer normalized radar cross section data for monitoring river and lagoon outflows. The use of SWOT data significantly expands the possibilities for studying outflows, along with methods based on analysis of optical and radar image data.

Keywords: satellite altimetry, satellite interferometry, SWOT, KaRIn, river outflows, outflows from the bay

Accepted: 11.02.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-304-319

References

1. Bulatov M. G., Kravtsov Yu. A., Lavrova O. Yu. et al., Physical mechanisms of aerospace radar imaging of the ocean, *Physics Uspekhi*, 2003, V. 46, No. 1, pp. 63–79, DOI: 10.1070/PU2003v046n01ABEH001114.
2. Gorshkov K. A., Dolina I. S., Soustova I. A., Troitskaya Yu. I., Modulation of short wind waves in the presence of strong internal waves: The effect of growth-rate modulation, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2003, V. 39, No. 5, pp. 596–606.
3. Dubina V. A., Katin I. O., Transboundary transfer features in the northwestern part of the Japan Sea based on the multiyear satellite imagery, *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk*, 2018, No. 6, pp. 13–19 (in Russian), DOI: 10.25808/08697698.2018.202.6.002.
4. 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, V. 15, No. 5, pp. 191–202 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-191-202.
5. Knyazev N. A., Assessing the applicability of satellite radar data for detecting river plumes in the southern part of the gulf of Riga, *J. Oceanological Research*, 2025, V. 53, No. 3, pp. 5–21 (in Russian), DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(3).1.
6. Lavrova O. Yu., Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* (Complex satellite monitoring of Russian seas), Moscow: IKI RAS, 2011, 480 p. (in Russian).
7. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., *Sputnikovyie 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., Loupian E. A., Current capabilities and experience of using the See the Sea information system for studying and monitoring phenomena and processes on the sea surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 3, pp. 266–287 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
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, V. 19, No. 5, pp. 264–283 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-264-283.
10. Lisitzin A. P., A marginal filter of the oceans, *Okeanologiya*, 1994, V. 34, No. 5, pp. 735–747 (in Russian).
11. Mityagina M. I., Lavrova O. Yu., Feasibility of satellite radar observation of river and lagoon plumes in the southeastern Baltic Sea, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 5, pp. 288–305 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-288-305.
12. 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, V. 21, No. 4, pp. 237–250 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-237-250.
13. 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, V. 18, No. 2, pp. 271–284 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-271-284.
14. 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, V. 16, No. 2, pp. 227–243 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-227-243.
15. Nazirova K. R., Lavrova O. Yu., Alferyeva Ya. O., Knyazev N. A., Spatiotemporal plume variability of Terek and Sulak rivers from satellite data and concurrent *in situ* measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 5, pp. 285–303 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-285-303.
16. Uvarov I. A., Khalikova O. A., Balashov I. V., Burtsev M. A., Loupian E. A., Matveev A. A., Platonov A. E., Proshin A. A., Tolpin V. A., Krasheninnikova Yu. S., Meteorological data management in framework of the satellite monitoring information systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, V. 10, No. 2, pp. 30–45 (in Russian).

17. Ardhuin F., Aksenov Y., Benetazzo A. et al., Measuring currents, ice drift, and waves from space: the Sea surface KInematics Multiscale monitoring (SKIM) concept, *Ocean Science*, 2018, V. 14, Iss. 3, pp. 337–354, DOI: 10.5194/os-14-337-2018.
18. Cresswell G. R., Tildesley P. C., Detecting tropical river plumes and island wakes with RADARSAT, *Canadian J. Remote Sensing*, 2000, V. 26, No. 4, pp. 267–272, DOI: 10.1080/07038992.2000.10874777.
19. da Silva J. C. B., Magalhaes J. M., Bossler A. et al., Internal solitary wave parameters from SWOT KaRIn sea surface topography: A case study in the Tropical Atlantic, *Science of Remote Sensing*, 2025, V. 12, Article 100307, DOI: 10.1016/j.srs.2025.100307.
20. 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, Iss. 10, pp. 12909–12941, DOI: 10.3390/rs71012909.
21. Dibarboure G., Anadon C., Briol F. et al., Blending 2D topography images from the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) mission into the altimeter constellation with the Level-3 multi-mission Data Unification and Altimeter Combination System (DUACS), *Ocean Science*, 2025, V. 21, Iss. 1, pp. 283–323, DOI: 10.5194/os-21-283-2025.
22. 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, pp. 1942–1958, DOI: 10.1016/j.csr.2005.06.011.
23. 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, pp. 3030–3044, DOI: 10.1175/1520-0485(2001)031<3030:TROPSB>2.0.CO;2.
24. Johnson D. R., Weidemann A., Arnone R., Davis C. O., Chesapeake Bay outflow plume and coastal upwelling events: physical and optical properties, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2001, V. 106, No. C6, pp. 11613–11622, DOI: 10.1029/1999JC000185.
25. Klemas V., Remote sensing of coastal plumes and ocean fronts: Overview and case study, *J. Coastal Research*, 2012, V. 28, No. 1A, pp. 1–7, DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-11-00025.1.
26. Konik A., Osadchiv A., Dynamics of the Iokanga River plume according to SAR and optical satellite data, *J. Marine Systems*, 2025, V. 250, Article 104093, DOI: 10.1016/j.jmarsys.2025.104093.
27. Kudryavtsev V., Kozlov I., Chapron B., Johannessen J. A., Quad-polarization SAR features of ocean currents, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2014, V. 119, No. 9, pp. 6046–6065, DOI: 10.1002/2014JC010173.
28. Lavrova O. Yu., Soloviev D. M., Mityagina M. I. et al., Revealing the influence of various factors on concentration and spatial distribution of suspended matter based on remote sensing data, *Proc. SPIE: Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*, 2015, V. 9638, Article 96380D, DOI: 10.1117/12.2193905.
29. Lavrova O. Yu., Soloviev D. M., Stochkov M. A. et al., River plumes investigation using Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI data, *Proc. SPIE. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*, 2016, V. 9999, Article 99990G, DOI: 10.1117/12.2241312.
30. 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, pp. 2276–2287, DOI: 10.1109/TGRS.2016.2641161.
31. McClimans T. A., Estuarine fronts and river plumes, In: *Physical processes in estuaries*, J. Dronkers, W. van Leussen (eds.), Springer, 1988, pp. 55–69.
32. Mityagina M. I., Kura River plume patterns observed by satellite SAR in the coastal zone of the southwestern Caspian Sea, *Ecologica Montenegrina*, 2025, V. 85, pp. 89–106, DOI: 10.37828/em.2025.85.5.
33. O'Donnell J., Surface fronts in estuaries: A review, *Estuaries*, 1993, V. 16, pp. 12–39, DOI: 10.2307/1352761.
34. Ody A., Doxaran D., Vanhellemont Q. et al., Potential of high spatial and temporal ocean color satellite data to study the dynamics of suspended particles in a micro-tidal river plume, *Remote Sensing*, 2016, V. 8, Iss. 3, Article 245, DOI: 10.3390/rs8030245.
35. 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, pp. 522–533, DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.043.
36. Plant W. J., The modulation transfer function: Concept and applications, In: *Radar Scattering from Modulated Wind Waves: Proc. Workshop on Modulation of Short Wind Waves in the Gravity-Capillary Range by Non-Uniform Currents, Bergen aan Zee, The Netherlands, 24–26 May 1988*, Dordrecht, Netherlands: Springer, 1989, pp. 155–172, DOI: 10.1007/978-94-009-2309-6_13.
37. 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, Article 1215327, 18 p., DOI: 10.3389/fmars.2023.1215327.
38. Verron J., Bonnefond P., Aouf L. et al., The benefits of the Ka-band as evidenced from the SARAL/AltiKa altimetric mission: Scientific applications, *Remote Sensing*, 2018, V. 10, Iss. 2, Article 163, DOI: 10.3390/rs10020163.

39. Yurovsky Yu. Yu., Malinovsky V. V., Korinenko A. E., Glukhov L. A., Dulov V. A., Prospects for radar monitoring of wind speed, wind wave spectra and velocity of currents from an oceanographic platform, *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, 2023, No. 3, pp. 40–54.
40. 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, pp. 367–379, DOI: 10.1109/TGRS.2003.821056.
41. Zheng Q., Clemente-Colón P., Yan X.-H. et al., Satellite synthetic aperture radar detection of Delaware Bay plumes: Jet-like feature analysis, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2004, V. 109, No. C3, Article C03031, 11 p., DOI: 10.1029/2003JC002100.