

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЫНОСА ВОД КАЛИНИНГРАДСКОГО ЗАЛИВА И РЕКИ ПРЕГОЛИ (БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ) НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА

К. Д. Коробченкова^{*,1,2} , М. О. Ульянова^{1,2} 

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия

²Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, г. Калининград, Россия

* **Контакт:** Ксения Дмитриевна Коробченкова, korobchenkova14@mail.ru

Мониторинг выноса (плюма) высокопродуктивных вод Калининградского залива через Балтийский пролив актуален в условиях высокой антропогенной нагрузки и эвтрофикации вод юго-восточной части Балтийского моря. Оценена сезонная и межгодовая изменчивость распространения плюма по спутниковым данным в период с января 2020 г. по октябрь 2024 г. и проведено сравнение с результатами экспедиционных измерений солености воды. Площадь плюма достигала наибольших значений в период половодья (февраль–март) и в летний период (июнь–июль), когда отсутствуют сильные ветра, способствующие диссипации плюма. Анализ ветровых условий и направления движения плюма показал, что в большинстве случаев плюм распространяется вдоль побережья на северо-восток к м. Таран при преобладании юго-западного и юго-восточного ветра. Осенью плюм прижат к берегу доминирующими западными ветрами. Гидрофизическая структура плюма подтверждает результаты, полученные по спутниковым данным.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, плюм, ветровые условия, юго-восточная часть Балтийского моря, Калининградский залив.

Цитирование: Коробченкова, К. Д., М. О. Ульянова Оценка пространственного распространения выноса вод Калининградского залива и реки Преголи (Балтийское море) на основе спутникового мониторинга // Russian Journal of Earth Sciences. — 2025. — Т. 25. — ES4002. — DOI: <https://doi.org/10.2205/2025es001036> — EDN: TDNMGK

Введение

В устьевой области реки при смешении речных и морских вод происходит трансформация и перераспределение потоков тепла, взвеси, биогенных элементов и антропогенных загрязнений. Данная область является геохимическим барьером на пути выноса загрязняющих веществ с суши в прибрежные морские зоны с градиентами скоростей течений, солености, мутности, температуры вод [Гордеев, 1983; Лисицын, 1994; Eteyanov, 2005]. Такие зоны смешения в Балтийском море отличаются от зон в океане меньшим градиентом солености – Балтийское море является солоноватым водоемом.

Источником поступления терригенного вещества в юго-восточную часть Балтийского моря помимо береговой эрозии является не только сток самой крупной в регионе р. Вислы [Bajkiewicz-Grabowska et al., 2019; Svendsen et al., 2021], но и менее полноводной р. Преголи [Лаврова и др., 2014; Шеволигина и Лаврова, 2018], впадающей в Калининградский (Вислинский) залив. Залив является буферной зоной, в которой происходит трансформация и осаждение части загрязняющих веществ, поступающих с речными водами. Район исследования представляет собой зону динамического взаимодействия трех водных объектов: однорукавной реки Преголи, Калининградского залива и прибрежных вод Гданьского залива (рис. 1). В северной части мелководного

<https://elibrary.ru/TDNMGK>

Получено: 26 сентября 2024 г.

Принято: 11 июня 2025 г.

Опубликовано: 24 июня 2025 г.



© 2025. Коллектив авторов.

Калининградского залива находится глубокий (8–10 м) гидротехнический объект (Калининградский морской канал, КМК). В канале одновременно проходят как смешение речных, заливных и морских вод и их вынос в прибрежную зону моря (преимущественно по поверхности), так и заток морских вод (по дну) [Chubarenko and Chubarenko, 2003]. Значения солёности в исследуемом районе варьируются в зависимости от сезона года и составляют в устье реки 0–3 епс, в Калининградском заливе 2–5 епс, в КМК 2–7 епс, в прибрежной части моря 7–8 епс. Стратификация вод в канале и вынос распресненных вод из Калининградского залива в море зависит от факторов, вызванных барическим градиентом (ветер, уровень воды), и расхода реки. Формируется плюм заливной воды, характеризующийся пониженной соленостью и повышенной мутностью. Воздействие ветра определяет суточную и даже часовую изменчивость распространения плюма, а также его положение, форму и размер [Lihan et al., 2008; Saldias et al., 2012; Thomas and Weatherbee, 2006]. Энергия ветра концентрируется в поверхностном слое, что вызывает более интенсивное ветровое продвижение плюма по сравнению с менее стратифицированным окружающим морем [Osadchiev et al., 2021; Osadchiev and Zaviyalov, 2013; Zu et al., 2014].

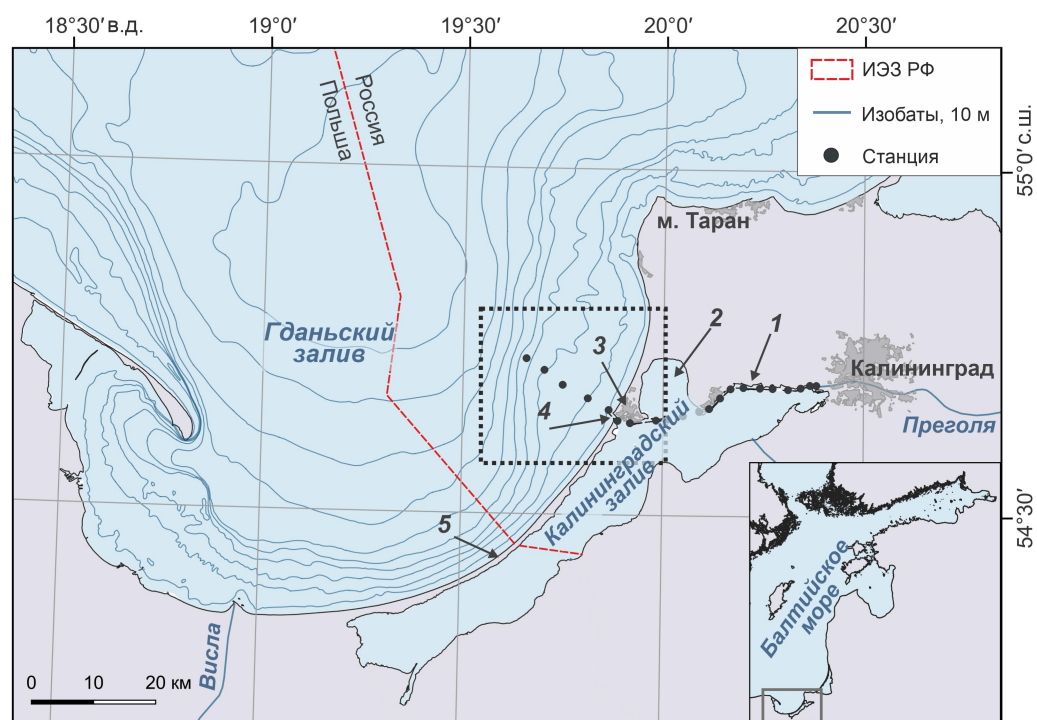


Рис. 1. Карта-схема района исследования. ИЭЗ РФ – исключительная экономическая зона РФ, 1 – Калининградский морской канал, 2 – Приморская бухта, 3 – г. Балтийск, 4 – Балтийский пролив, 5 – Балтийская коса, пунктиром обозначена область данных реанализа ERA5.

Доступным способом круглогодичного мониторинга пространственного распределения взвешенного вещества в устьевой области является спутниковый мониторинг. Плюмы значительно отличаются от окружающих их морских вод своими оптическими свойствами, что позволяет отслеживать их сезонную динамику. Ограничением метода является наличие облачности и штормовые условия на поверхности моря. Подобные исследования проводятся для мониторинга качества вод во многих районах Мирового океана, однако большая часть посвящена рекам, напрямую впадающим в море или в эстуарии открытого типа (реки Амазонка, Амур, Волга, Енисей, Обь и др., в регионе исследования – р. Висла, впадающая в Гданьский залив). Устьевые области некоторых рек осложнены наличием буферных зон – заливов полузамкнутого типа (лагуна Патус, лагуна Альбуфера, Куршский залив, Щецинский залив и др.), таким образом, плюм имеет не речное происхождение, а смешанное (воды реки и залива) и характеризуется

меньшими градиентами по солености, температуре и мутности между заливными и морскими водами. Например, в регионе исследования изучен плюм Куршского залива – буферной зоны для стока крупной р. Неман [Dabuleviciene et al., 2020; Vaiciute et al., 2013].

Данное исследование во многом является продолжением существующих работ [Лаврова и др., 2014; Назирова и Краюшкин, 2021; Lavrova et al., 2016]. Однако в регионе наблюдаются тенденции изменения синоптических условий [Полунина и Стонт, 2022; Стонт и др., 2020; Stont et al., 2023], которые, в свою очередь, влияют на динамику речного стока и распространение выноса распресненных мутных вод в море. Сопоставление этих данных позволяет получить некоторые количественные оценки закономерности распространения плюма. В этом контексте большое значение приобретает непрерывный долгосрочный комплексный мониторинг экосистемы Балтийского моря в целом и прибрежной зоны как наиболее быстро отражающей изменения, в частности.

Целью работы являлось определение сезонной и межгодовой изменчивости плюма Калининградского залива в прибрежной части Балтийского моря с учетом ветровых условий и речного стока в 2020–2024 гг. Полученные данные могут быть использованы для регионально адаптированной системы мониторинга Балтийского моря, созданной в 2022 г. в рамках системы климатического и экологического мониторинга ключевых районов Мирового океана и морей России [Bashirova et al., 2023].

Материалы и методы

Для исследования характера и морфологии плюма вод Калининградского залива были использованы данные дистанционного зондирования высокого пространственного разрешения для периода с января 2020 г. по октябрь 2024 г. Оптические (цветосинтезированные) изображения морской поверхности были получены путем обработки данных мультиспектрального сканера MSI (Multispectral Instrument) со спутников Sentinel-2A (пространственное разрешение 10 м). Для расширения ряда данных использовались спутниковые снимки концентрации взвешенного вещества мультиспектрального радиометра OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) со спутника Sentinel-3A (пространственное разрешение 300 м). Использовались спутниковые изображения 2-го уровня обработки (Level-2A of Sentinel-2 and Sentinel-3 processing), учитывающие атмосферную коррекцию. Предварительная обработка спутниковых данных выполнялась с помощью программного обеспечения SNAP 8.0. Границы плюма определялись по цветовому контрасту морских вод и вод плюма и оцифровывались с помощью настольной геоинформационной системы QGIS. Перед оцифровкой спутниковых данных мультиспектрального радиометра OLCI/Sentinel-3A дополнительно выполнялась нормализация данных методом стандартизации (на основе среднего значения и стандартного отклонения для сравнения значений с разной шкалой измерений) с помощью настольной геоинформационной системы QGIS. Всего было проанализировано порядка 600 спутниковых изображений, из которых 228 были репрезентативными с облачностью менее 50% (на 178 спутниковых изображениях был выражен плюм заливных вод в море, на 50 – заток морских вод через Балтийский пролив в Калининградский залив).

Для построения сезонных роз ветров использовались натурные данные направления и скорости ветра из открытых архивов [ООО «Расписание погоды», 2004] на метеостанции г. Балтийск (№26701, 54°39' с. ш., 19°55' в. д.) за период 2020–2024 гг. с дискретностью 3 часа. Для анализа преобладающих ветровых условий за сутки до и во время пролета спутника использовались данные о компонентах ветра (u - и v -компоненты) из реанализа ECMWF ERA5 [C3S, 2018] на высоте 10 м с дискретностью 1 час и пространственным разрешением 0,25° широты × 0,25° долготы. Сведения о количестве осадков брались из открытых архивов [ООО «Расписание погоды», 2004] на метеостанции г. Черняховск (№26711, 54°38' с. ш., 21°47' в. д.) за период 2020–2024 гг.

Данные о среднесуточном расходе воды р. Преголя на гидрологическом посту г. Гвардейск (56 км от устья) за 2020–2023 гг. были получены из Единой государственной

системы информации об обстановке в Мировом океане [ЕСИМО, 1999]. За 2024 г. данные о речном стоке в открытом доступе отсутствуют.

Для верификации спутниковых снимков и оценки мощности плюма проведены экспедиционные работы (06.08.2020, 02.03.2022), в которых выполнялись измерения вертикального распределения солености на станциях, расположенных в КМК от устья р. Преголи (ст. 1) до прибрежной акватории Балтийского моря (см. рис. 1). Работы проводились зондами Sea&Sun Tech CTD90M и SonTek CastAway.

Результаты и обсуждение

Площадь плюма

Результаты оцифровки границы плюма на спутниковых снимках за период 2020–2024 гг. представлены в табл. 1 и на рис. 2. Пробелы в данных образуются в зимний период (обработано всего пять снимков за пять лет), когда район исследования практически полностью покрыт облачностью. В периоды активной вегетации фитопланктона (апрель, июнь) плюм был наиболее ярко выражен из-за отличий оптических свойств вод Калининградского залива и вод Балтийского моря за счет наличия в приповерхностном слое вод залива значительного количества органического взвешенного вещества [Лаврова и др., 2016; Gasiunaite et al., 2005; Kudryavtseva and Aleksandrov, 2019]. Абсолютный максимум площади плюма за период исследования зафиксирован в июне 2021 г. и составил 296 км². Однако максимальная средняя за сезон площадь приходится на весну (42 км²), что объясняется половодьем р. Преголи (февраль–март) [Боскачѳв и Чубаренко, 2022; Korobchenkova et al., 2023]. Летом площади плюма также значительны, что связано с достаточно спокойными ветровыми условиями, позволяющими плюму «нарастать» и сохраняться в течение длительного времени. Анализ ветровых условий в 2020–2024 гг., как одного из главных режимообразующих факторов, показал, что весной преобладали слабые (скорость до 5 м/с) ветры северных румбов, реже наблюдались западные ветры со скоростью 5–10 м/с и слабые восточные ветры. Осенью и зимой можно выявить тенденцию к преобладанию ветра южных румбов со скоростью до 10 м/с и западного ветра со скоростью до 20 м/с.

Таблица 1. Сезонная изменчивость площадей плюма из Калининградского залива в период 2020–2024 гг.

Год	Зима	Весна	Лето	Осень
2020	33/42* (2)	42/162 (10)	63/212 (10)	26/52 (4)
2021	48/51 (2)	23/35 (4)	53/296 (9)	31/50 (6)
2022	3/3 (1)	48/138 (14)	23/56 (17)	16/35 (6)
2023	—	51/218 (16)	21/81 (20)	27/69 (10)
2024	—	33/124 (15)	37/137 (21)	35/71 (11)
Средняя за пять лет	33/51 (5)	42/218 (59)	35/296 (77)	28/71 (37)

*33/42 (2) – средняя, км²/ максимальная, км² (количество снимков)

В отсутствии приливов вторым важным условием, определяющим изменчивость параметров эстуарной системы р. Преголи, является речной сток. Анализ среднесуточного расхода воды р. Преголи на гидрологическом посту г. Гвардейск за 2020–2023 гг. показал, что в течение каждого года выраженный максимум расхода воды р. Преголи (100–200 м³/с) соответствовал половодью. В эти же месяцы наблюдались и значительные среднемесячные площади плюма (42, 54 и 52 км² в феврале, марте и апреле, соответственно) (рис. 3). Два вторичных максимума в мае-июне и ноябре-декабре связаны с паводками. Исключением являлся 2022 г., когда был ярко выражен только один максимум в конце февраля-начале марта при расходе воды р. Преголи около 400 м³/с. В этот период выпало 82 мм осадков, что составило 153% от климатической нормы [ООО «Расписание погоды», 2004], следующие три месяца количество выпавших осадков не превышало среднюю норму. В 2023 г. максимум состоял из трех пиков (174–

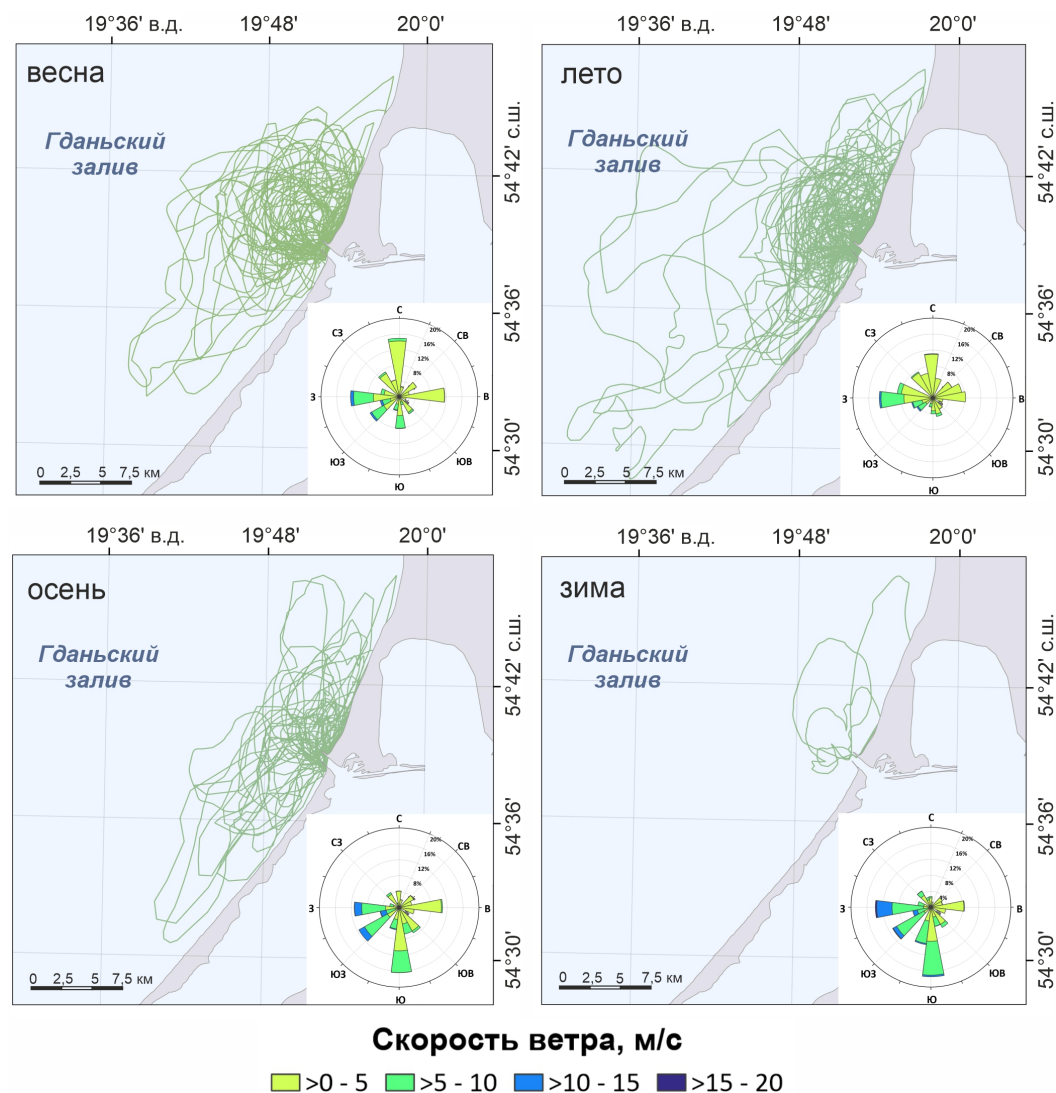


Рис. 2. Карта-схема распространения плюма вод Калининградского залива по данным оцифровки спутниковых снимков и сезонная повторяемость (%) направлений и скоростей (м/с) ветра (роза ветров) по данным метеостанции г. Балтийска с 2020 по 2024 гг.

214 м³/с) и пришелся на февраль-начало апреля. Нехарактерный для второй половины марта высокий расход воды, вероятно, связан с большим количеством осадков (138 мм за март).

Для выявления среднееголетнего положения плюма все зафиксированные случаи были объединены и ранжированы по величине площади плюма (рис. 4). Больше всего отмечено случаев распространения плюма площадью до 50 км² (143 случая или 80%) и удалением в сторону открытого моря не более 7 км, вдоль берега – до 15 км. В 26-ти случаях (15%) площадь плюма составляла от 50 до 100 км², удаление от берега было до 12 км, тогда как удаление вдоль берега на юг от пролива – около 18 км. В 9-ти случаях (5%) площадь плюма была более 100 км², внешняя граница фиксировалась на расстоянии до 20 км от берега. Чаще всего площадь плюма достигала таких значений в летний сезон. В работе [Назирова и Краюшкин, 2021] представлены результаты мониторинга Гданьского залива в районе выноса вод по спутниковым данным в период с января 2014 г. по сентябрь 2020 г., согласно которому наличие плюма заливных вод через Балтийский пролив фиксировалось на протяжении всего года с максимальными площадями выноса в летние месяцы. В 2020–2024 гг. эта тенденция сохранилась.

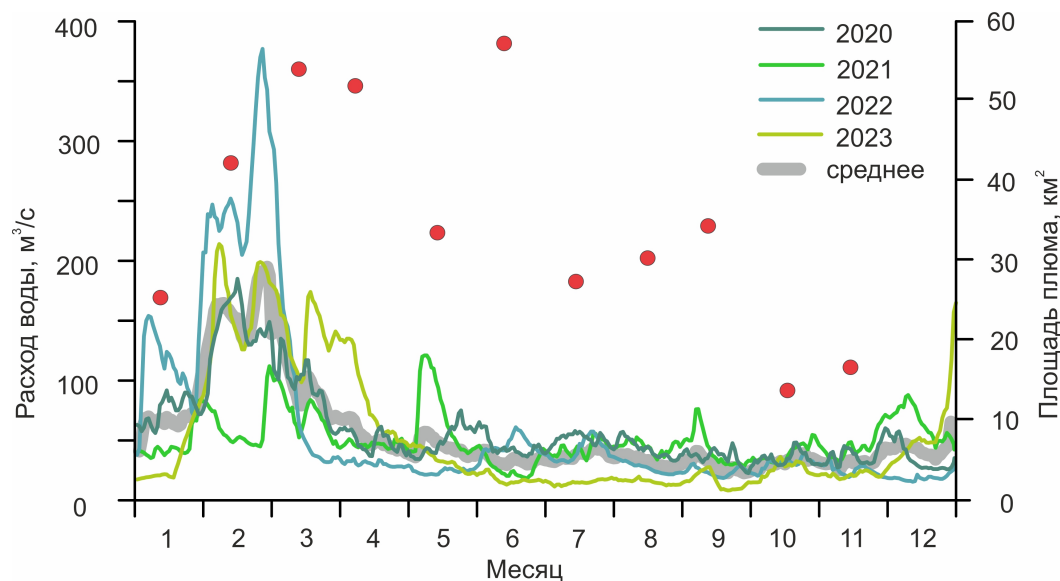


Рис. 3. Среднесуточный расход воды р. Преголи (пост Гвардейск) 2020–2023 гг. (кривые) и среднесуточные за период исследования площади плюма (красные точки).

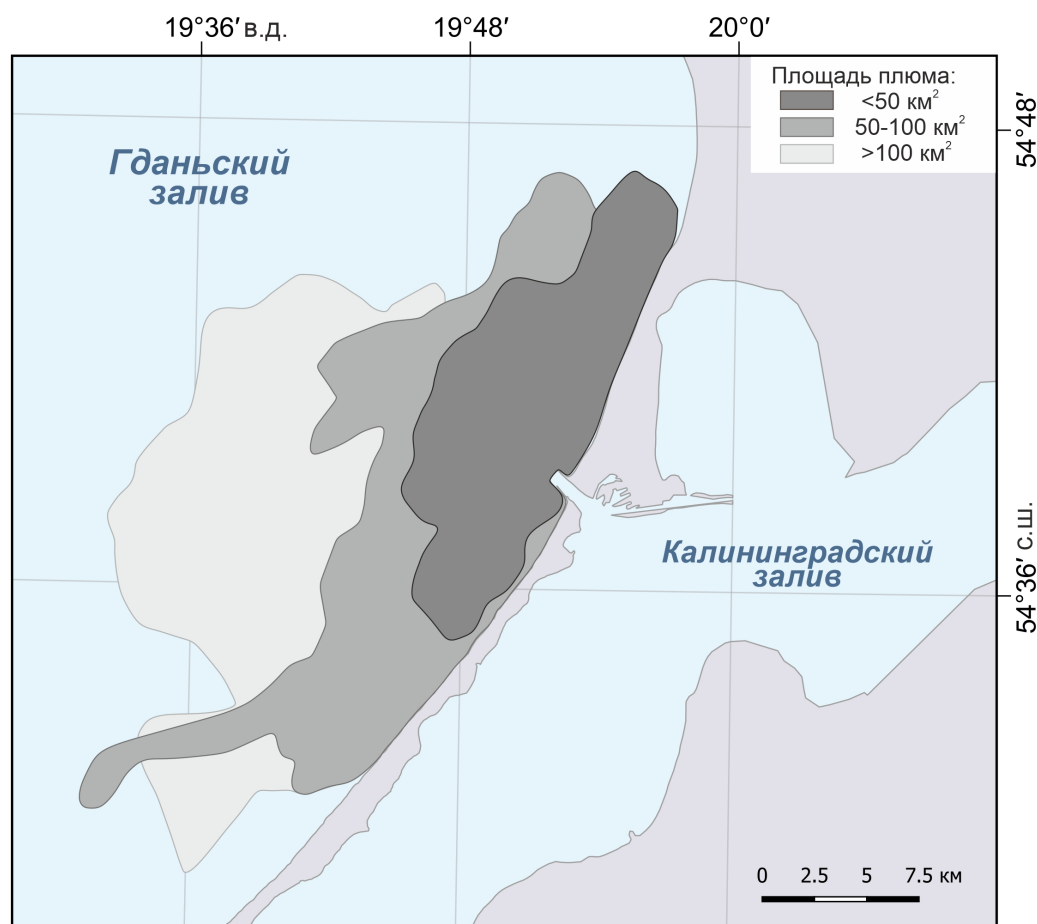


Рис. 4. Градация плюма вод Калининградского залива по среднесуточной площади по спутниковым данным с 2020 по 2024 гг.

В районе исследования направление ветра может изменяться несколько раз в течение суток. Можно предположить, что площадь распространения, форма и направление

движения плюма имеют внутрисуточную динамику. Из-за частоты спутниковых пролетов (раз в сутки) в работе рассматривается только межсуточная и сезонная динамика. Под действием ветра площадь плюма в течение нескольких дней может существенно изменяться (например, 01.06.2020 и 04.06.2020 – 55 и 182 км²; 07.03.2024 и 10.03.2024 – 124 и 34 км², соответственно).

Для сопоставления полученных результатов был выбран плюм р. Вислы, которая напрямую впадает в Гданьский залив. Площадь плюма р. Вислы в теплое время года часто превышает 500 км², по горизонтали распространяется до 27 км [Митягина и др., 2024]. Плюм вод Калининградского залива имеет меньшую площадь, но сравним по дальности распространения. Если говорить о различии влияния данных выносов на прибрежную зону моря, можно предположить, что, несмотря на меньшую площадь плюма залива, он выносит значительно большее количество органического вещества (в частности планктона), чем р. Висла. В Калининградском заливе, особенно в теплый период года, происходит массовое развитие планктона, который приспособлен к существованию в солоноватоводных условиях. Поэтому, попадая в морскую зону, он продолжает там развиваться. Пресноводный же планктон р. Вислы в соленой воде перестает развиваться и погибает. Таким образом, наличие буферного приемного водоема у реки качественно и количественно меняет «наполнение» плюма.

Направление движения плюма

Плюм заливных вод может иметь выраженную вытянутую форму и распространяться как в циклоническом, так и антициклоническом направлении вдоль морского побережья [Лаврова и др., 2016]. На распространение плюма влияют ветер, вдольбереговая циркуляция и вихревые процессы, характерные для акватории Гданьского бассейна [Гинзбург и др., 2015]. Мезомасштабные и мелкомасштабные вихревые структуры оказывают существенное влияние на распространение плюма вод р. Вислы и в меньшей мере на вынос вод Калининградского залива [Митягина и др., 2024; Lavrova et al., 2016]. Основное направление, в котором распространяется плюм заливных вод, совпадает с направлением ветровых течений [Lavrova et al., 2016].

За анализируемый период было отмечено распространение плюма в трёх основных направлениях: в 45% случаев вдоль побережья на северо-восток (к мысу Таран), в 29% перпендикулярно берегу в сторону открытого моря и в 26% вдоль побережья Балтийской косы на юго-запад. При распространении плюма на северо-восток при преобладании ветра юго-западного и юго-восточного направлений (табл. 2) происходит его смещение с вдольбереговыми потоками наносов и образование циклонического завихрения у мыса Таран в условиях даунвеллингового режима [Lavrova et al., 2016]. Также наблюдались случаи распространения плюма вдоль Балтийской косы при сильных северо-восточных (противонаправленных) ветрах преимущественно летом, когда увеличивалась повторяемость северного и северо-восточного ветров (см. рис. 2). Случаи распространения плюма шарообразной формы перпендикулярно берегу были зафиксированы в основном весной и частично летом, когда господствовал ветер восточных румбов. В эти сезоны скорость ветра не высока (до 5, реже 10 м/с), что позволяет плюму распространяться достаточно равномерно.

Зимой и осенью в большинстве случаев плюмы распространялись на северо-восток и были прижаты к берегу (см. рис. 2) под действием ветров западного и южного румбов, господствующих в это время года. Передвижение плюма вдоль побережья на юго-запад чаще всего было зафиксировано весной и летом, когда господствовали слабые ветра северных румбов. Затоки морской воды в Калининградский залив отмечены на поверхности моря на спутниковых снимках осенью и весной при умеренных, свежих и сильных (по шкале Бофорта) ветрах юго-западного и северо-западного направлений (см. табл. 2).

Отмечены случаи распространения плюма вдоль побережья в северо-восточном направлении и перпендикулярно берегу при нагонных северо-западном и западном ветрах (см. табл. 2). Например, 24–25.05.2020 был преимущественно умеренный (7 м/с)

Таблица 2. Повторяемость направления ветра (%) относительно распространения плюма в 2020–2024 гг.

Направление ветра	Движение плюма на северо-восток	Движение плюма на юго-запад	Движение плюма перпендикулярно берегу	Заток морских вод
С	2	4	2	6
СВ	8	52	36	6
В	3	6	6	6
ЮВ	34	14	46	12
Ю	3	2	—	—
ЮЗ	32	18	8	44
З	3	—	—	2
СЗ	15	4	2	24

западный ветер, который к 26–27.05.2020 ослаб с сохранением направления. Это привело к релаксации нагона и выносу вод залива. Другой пример: 26–27.07.2024 господствовал северо-западный ветер, который прижимал к побережью плюм ранее вынесенных вод залива. К 31.07.2024 направление сменилось на юго-восточное и плюм «оторвался» от берега.

Отмечены затоки морских вод через Балтийский пролив в КМК и Калининградский залив при ветре западного и северо-западного направлений (в 24% случаев) в основном осенью и в начале зимы, также при устойчивых юго-западных ветрах (в 44% случаев) под действием экмановского переноса. Вследствие изменчивости направления ветра даже в течение одних суток наблюдались случаи одновременного затока морских вод и выноса заливных вод через Балтийский пролив в прибрежную часть моря или изменения ориентации распространения плюма.

Подспутниковые измерения

Одной из задач работы было рассмотрение случаев синхронных подспутниковых измерений гидрологической структуры в районе исследования для верификации спутниковых данных.

06.08.2020 Накануне (05.08.2020) экспедиционного выхода преобладал слабый ветер западного и западно-северо-западного направлений, которые являлись господствующими в течение сезона (см. рис. 2). 06.08.2020 направление ветра сменилось на нехарактерное для сезона юго-восточное, которое способствовало выносу заливных вод в прибрежную зону моря. Согласно спутниковому снимку, площадь плюма была небольшой и составила примерно 10 км² (рис. 5). Между Балтийским проливом и в 20 км мористее образовалась градиентная зона мощностью около 7 м в которой соленость изменялась от 6,0 до 7,2 епс, согласно данным зондирования водной толщи. Расход воды р. Преголи составил около 50 м³/с, то есть был незначительным.

02.03.2022 За двое суток до экспедиционного выхода преобладал восточный ветер, который способствовал выносу заливных вод, затем направление изменилось на юго-юго-западное со скоростью ветра 1–3 м/с и плюм незначительно сместился на северо-восток. На спутниковом изображении ярко выражен вынос через Балтийский пролив, площадь которого составила 30 км² (см. рис. 5). Условия для выноса были сформированы не столько ветровой ситуацией, сколько половодьем и максимальным расходом воды (247 м³/с, см. рис. 3). Сток речных вод весной в период половодья нарушает баланс водообмена, смещая его в сторону увеличения оттока воды (по продолжительности на 10%) [Chubarenko and Zakirov, 2021]. В распределении солености ярко выражены как вынос вод через Балтийский пролив в прибрежную часть моря, так и клин морских

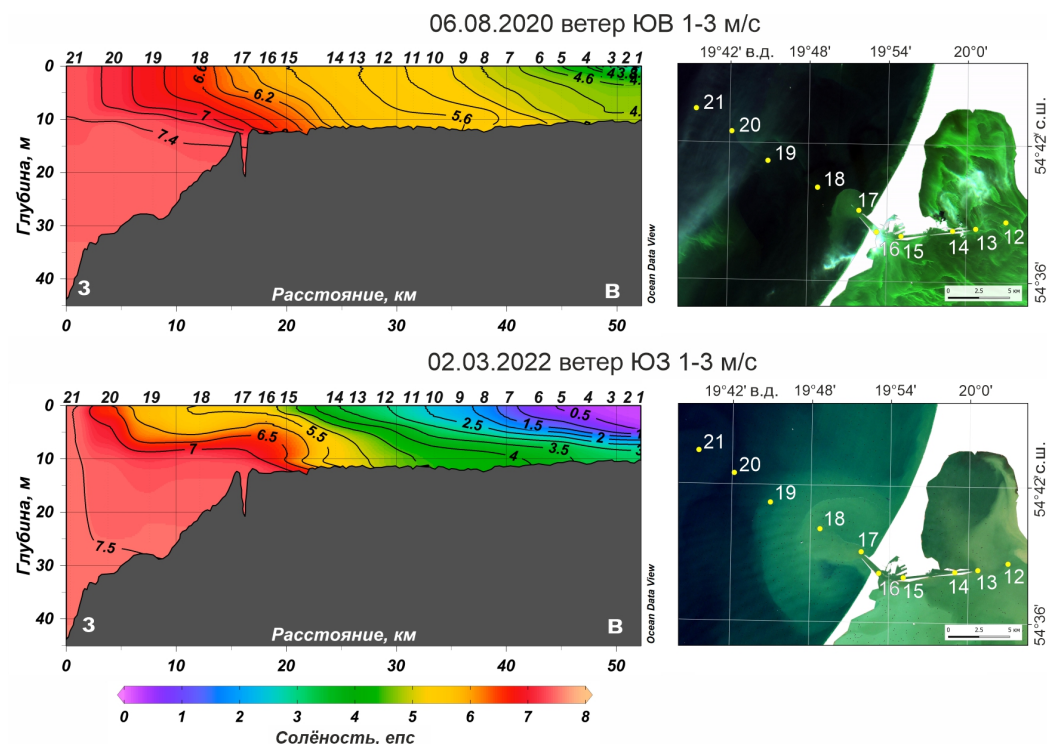


Рис. 5. Сопоставление распределения солёности по натурным измерениям (слева) и распространения плюма по спутниковым данным (справа). Расположение станций (цифры над профилями распределения солёности и желтые точки на спутниковых изображениях): ст. 1 – устье р. Преголи, ст. 2–15 – КМК, ст. 16–17 – Балтийский пролив, ст. 18–21 – прибрежная зона моря.

вод, распространяющийся по дну до Приморской бухты (см. рис. 5, ст. 12–13). Согласно [Лазаренко и Маевский, 1971], в 74,9% случаев через Балтийский пролив происходит однонаправленный вынос заливных вод или заток морских, 11,7% – формирование двухслойных течений с заток в придонном слое и поверхностным выносом и 13,4% двунаправленных течений. Согласно профилю солёности, глубина (мощность) плюма составляла 7–8 м. На нижней границе плюма солёность увеличилась на 1 епс на расстоянии по вертикали менее 5 м.

Данные гидрофизического зондирования позволили оценить глубину проникновения плюма и сопоставить с результатами, полученными для поверхностного слоя моря по спутниковым изображениям. Глубина проникновения вод со значениями солёности, характерными для вод залива (5,0 епс), была максимальной (8 м) весной в период половодья при максимальных значениях расхода воды. Для поверхностного слоя в целом наблюдалась сходимость распространения плюма в море, полученного дистанционным и контактными методами.

Заключение

Определение сезонных и межгодовых особенностей плюма Калининградского залива проводилось на основе данных дистанционного зондирования. Всего было обработано 228 спутниковых изображений (Sentinel-2A и 3A) за 2020–2024 гг. Были проанализированы гидрометеорологические условия (расход реки, осадки, скорость и направление ветра, натурные данные солёности) для исследования характера распространения и морфологии плюма и верификации спутниковых данных.

В условиях отсутствия приливов в исследуемом районе основными факторами, влияющими на распространение плюма заливных вод и заток морских вод, являются ветровые условия и интенсивность речного стока. Анализ ветрового воздействия на плум выявил преобладание в 2020–2024 гг. распространения выноса на северо-восток (в

45% случаев) при сильном (8–10 м/с), устойчивом юго-западном и юго-восточном ветре, который господствует практически круглый год, кроме летнего сезона. Максимальное удаление внешней границы плюма от пролива на север вдоль берега составило 24 км. Отмечено меньше случаев распространения плюма вдоль Балтийской косы (26% случаев) при сильных (8–10 м/с) северо-восточных ветрах преимущественно весной и летом, однако удаление плюма от пролива было большим, чем вдоль Самбийского полуострова. Весной и летом при слабом (1–3 м/с) восточном и юго-восточном ветре, который преобладал в данные сезоны года, плюм распространялся перпендикулярно берегу (29% случаев). Осенью плюм был «прижат» к берегу под действием сильных западных и юго-западных ветров. Затоки морских вод через Балтийский пролив в Калининградский залив, выраженные на поверхности моря, происходили при ветре западного и северо-западного направлений (в 24% случаев) в основном осенью и в начале зимы.

Максимальные среднемесячные площади выноса заливных вод соответствовали периоду половодья, которое в разные годы приходилось на февраль–апрель. В это время еще отсутствует активное развитие планктона, поэтому можно сделать вывод, что плюм насыщен терригенной (неорганической) взвесью. Летом также фиксировались значительные по площади плюмы (в том числе абсолютный максимум), что может объясняться отсутствием сильных ветров, способствующих разрушению плюма. Плюм в теплый период года насыщен органической взвесью, поскольку в Калининградском заливе идет интенсивное развитие солоноватоводного планктона, который, поступая в море, продолжает свое развитие. Средняя площадь плюма за период пять лет составила 35 км², максимальная – 296 км². Остается открытым вопрос о вкладе в плюм взмучивания донных осадков, поскольку при продвижении плюма от пролива на северо-восток он попадает в зону активной береговой абразии.

Подспутниковый эксперимент в период исследований позволил верифицировать спутниковые данные и оценить мощность плюма: в марте она достигала 8 м. Гидрофизические данные подтвердили достоверность спутниковых.

Благодарности. Сбор и анализ метеорологических и гидрофизических данных выполнены за счёт госзадания ИО РАН (тема №FMWE-2024-0025). Анализ спутниковых данных поддержан из средств БФУ им. И. Канта (тема №FZWM-2023-0004). Авторы благодарны за помощь в интерпретации метеоданных Ж. И. Стонт, в получении гидрофизических данных – В. А. Кречик

Список литературы

- Боскачёв Р. В., Чубаренко Б. В. Анализ изменчивости гидрологических характеристик на устьевом участке реки Преголи (юго-восточная Балтика) // Гидрометеорология и экология. — 2022. — № 69. — С. 644–674. — DOI: [10.33933/2713-3001-2022-69-644-674](https://doi.org/10.33933/2713-3001-2022-69-644-674).
- Гинзбург А. И., Булычева Е. В., Костяной А. Г. и др. О роли вихрей в распространении нефтяных загрязнений по акватории Юго-Восточной Балтики (по данным спутникового мониторинга) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2015. — Т. 12, № 3. — С. 149–157. — EDN: [UAFZCR](https://www.edn.ru/10.33933/2713-3001-2015-3-149-157).
- Гордеев В. В. Речной сток в океан и черты его геохимии. — Москва : Наука, 1983. — 152 с.
- ЕСИМО. Центр океанографических данных ФГБУ ВНИИГМИ-МЦД. — 1999. — URL: <http://portal.esimo.ru/portal/> (дата обр. 12.05.2024).
- Лаврова О. Ю., Краюшкин Е. В., Соловьев Д. М. и др. 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. — EDN: [TJEKWP](https://www.edn.ru/10.33933/2713-3001-2014-4-76-99).
- Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. — Москва : ИКИ РАН, 2016. — 334 с. — EDN: [XXTFNL](https://www.edn.ru/10.33933/2713-3001-2016-334).
- Лазаренко Н. Н., Маевский А. Гидрометеорологический режим Вислинского залива. — Ленинград : Гидрометеиздат, 1971. — 279 с.
- Лисицын А. Р. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. — 1994. — Т. 34, № 5. — С. 735–747. — EDN: [YJGONJ](https://www.edn.ru/10.33933/2713-3001-1994-5-735-747).

- 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](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-4-237-250).
- 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](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-2-271-284).
- ООО «Расписание погоды». Погода в 240 странах мира. Архив погоды в Балтийске. — 2004. — URL: <https://rp5.ru/> (дата обр. 13.06.2024).
- Полунина Ю. Ю., Стонт Ж. И. Влияние ветровых условий на распределение зоопланктона устьевой области реки Преголи (бассейн Балтийского моря) после техногенной трансформации её русла // Морской биологический журнал. — 2022. — Т. 7, № 1. — С. 78–92. — DOI: [10.21072/mbj.2022.07.1.07](https://doi.org/10.21072/mbj.2022.07.1.07).
- Стонт Ж. И., Навроцкая С. Е., Чубаренко Б. В. Многолетние тенденции изменчивости гидрометеорологических характеристик в Калининградском регионе // Океанологические исследования. — 2020. — Т. 48, № 1. — С. 45–61. — DOI: [10.29006/1564-2291.JOR-2020.48\(1\).3](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(1).3).
- Щеголихина М. С., Лаврова О. Ю. Мониторинг выносов речных и лагунных вод в Азовское и Балтийское моря на основе спутниковых данных видимого диапазона // Вестник ТвГУ. Серия: География и Геоэкология. — 2018. — № 3. — С. 180–191. — DOI: [10.26456/2226-7719-2018-3-180-191](https://doi.org/10.26456/2226-7719-2018-3-180-191). — EDN: YUNIRF.
- Bajkiewicz-Grabowska E., Zalewski M., Kobusińska M. E., et al. The seasonal structure of contributors to the discharge of the Vistula River to the Baltic Sea // Technology Wody. — 2019. — No. 6. — P. 8–15. — (In Polish).
- Bashirova L., Sivkov V., Ulyanova M., et al. Climate and environmental monitoring of the Baltic Sea: General principles and approaches // Reliability: Theory & Applications. — 2023. — Vol. 18. — P. 164–171. — DOI: [10.24412/1932-2321-2023-575-164-171](https://doi.org/10.24412/1932-2321-2023-575-164-171).
- C3S. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. — 2018. — DOI: [10.24381/cds.adbb2d47](https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47). — URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/doi/10.24381/cds.adbb2d47>.
- Chubarenko B., Zakirov R. Water Exchange of Nontidal Estuarine Coastal Vistula Lagoon with the Baltic Sea // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. — 2021. — Vol. 147, no. 4. — DOI: [10.1061/\(asce\)ww.1943-5460.0000633](https://doi.org/10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000633).
- Chubarenko B. V., Chubarenko I. P. The transport of Baltic water along the deep channel in the Gulf of Kaliningrad and its influence on fields of salinity and suspended solids // Proceedings of the Baltic Marine Science Conference 22-26 October 1996. — ICES Cooperative research report No. 257, 2003. — P. 151–156.
- Dabuleviciene T., Vaiciute D., Kozlov I. E. Chlorophyll-a Variability during Upwelling Events in the South-Eastern Baltic Sea and in the Curonian Lagoon from Satellite Observations // Remote Sensing. — 2020. — Vol. 12, no. 21. — P. 3661. — DOI: [10.3390/rs12213661](https://doi.org/10.3390/rs12213661).
- Emelyanov E. M. The Barrier Zones in the Ocean. — Springer-Verlag, 2005. — 632 p. — DOI: [10.1007/b137218](https://doi.org/10.1007/b137218).
- Gasiunaite Z. R., Cardoso A. C., Heiskanen A. S., et al. Seasonality of coastal phytoplankton in the Baltic Sea: Influence of salinity and eutrophication // Estuarine, Coastal and Shelf Science. — 2005. — Vol. 65, no. 1/2. — P. 239–252. — DOI: [10.1016/j.ecss.2005.05.018](https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.05.018).
- Korobchenkova K. D., Aleksandrov S. V., Semenova A. S., et al. Influence of Hydrometeorological Conditions on the Plankton Distribution in the Estuary of the Pregolya River and the Coastal Part of the Baltic Sea // Oceanology. — 2023. — Vol. 63, S1. — P. 188–201. — DOI: [10.1134/s0001437023070068](https://doi.org/10.1134/s0001437023070068).
- Kudryavtseva E. A., Aleksandrov S. V. Hydrological and Hydrochemical Underpinnings of Primary Production and Division of the Russian Sector in the Gdansk Basin of the Baltic Sea // Oceanology. — 2019. — Vol. 59, no. 1. — P. 49–65. — DOI: [10.1134/S0001437019010077](https://doi.org/10.1134/S0001437019010077).
- 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 Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. — 2016. — Vol. 9, no. 11. — P. 5193–5201. — DOI: [10.1109/JSTARS.2016.2580602](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2580602).
- Lihan T., Saitoh S. I., Iida T., et al. Satellite-measured temporal and spatial variability of the Tokachi River plume // Estuarine, Coastal and Shelf Science. — 2008. — Vol. 78, no. 2. — P. 237–249. — DOI: [10.1016/j.ecss.2007.12.001](https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.12.001).
- Osadchiev A., Sedakov R., Barymova A. Response of a Small River Plume on Wind Forcing // Frontiers in Marine Science. — 2021. — Vol. 8. — P. 809566. — DOI: [10.3389/fmars.2021.809566](https://doi.org/10.3389/fmars.2021.809566).
- Osadchiev A. A., Zavialov P. O. Lagrangian model of a surface-advected river plume // Continental Shelf Research. — 2013. — Vol. 58. — P. 96–106. — DOI: [10.1016/j.csr.2013.03.010](https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.03.010).

- Saldias G. S., Sobarzo M., Largier J., et al. Seasonal variability of turbid river plumes off central Chile based on high-resolution MODIS imagery // *Remote Sensing of Environment*. — 2012. — Vol. 123. — P. 220–233. — DOI: [10.1016/j.rse.2012.03.010](https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.03.010).
- Stont Z. I., Bobykina V. P., Ulyanova M. O. "Diving" cyclones and consequences of their impact on the coasts of the South-Eastern Baltic Sea // *Russian Journal of Earth Sciences*. — 2023. — DOI: [10.2205/2023ES000827](https://doi.org/10.2205/2023ES000827).
- Svendsen L., Gustafsson B., Sonesten L., et al. Input of nutrients by the seven biggest rivers in the Baltic Sea region in 1995–2017. — *Baltic Sea Environment Proceedings No.178*. HELCOM, 2021. — 24 p.
- Thomas A., Weatherbee R. A. Satellite-measured temporal variability of the Columbia River plume // *Remote Sensing of Environment*. — 2006. — Vol. 100, no. 2. — P. 167–178. — DOI: [10.1016/j.rse.2005.10.018](https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.018).
- Vaiciute D., Bresciani M., Matta E., et al. Variability of bio-optical parameters of the SE Baltic Sea coastal waters based on in situ and satellite data // *ESA Living Planet Symposium*. — ESA, 2013. — P. 11.
- Zu T., Wang D., Gan J., et al. On the role of wind and tide in generating variability of Pearl River plume during summer in a coupled wide estuary and shelf system // *Journal of Marine Systems*. — 2014. — Vol. 136. — P. 65–79. — DOI: [10.1016/j.jmarsys.2014.03.005](https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.03.005).

ASSESSMENT OF SPATIAL DISTRIBUTION OF WATER DISCHARGE FROM THE KALININGRAD LAGOON AND THE PREGOLYA RIVER (THE BALTIC SEA) BASED ON SATELLITE MONITORING

K. D. Korobchenkova^{*,1,2}  and M. O. Ulyanova^{1,2} 

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

****Correspondence to:** Kseniia Korobchenkova, korobchenkova14@mail.ru

In the context of high anthropogenic pressure and eutrophication of the waters in the southeastern Baltic Sea, it is important to monitor the plume of highly productive waters from the Kaliningrad Lagoon through the Baltic Strait. Seasonal and interannual variability in plume propagation was estimated using satellite data from January 2020 to October 2024, and was then compared with expeditionary salinity measurements. The plume area was largest during the flood period (February–March) and the summer period (June–July), when strong winds contributing to plume dissipation were absent. Analysis of wind conditions and plume movement direction showed that, in most cases, the plume propagates along the coast to the northeast towards Cape Taran, predominantly in response to southwest and southeast winds. In autumn, dominant westerly winds press the plume to the coast. The hydrophysical structure of the plume corroborates the findings derived from satellite data.

Keywords: satellite monitoring, plume, wind conditions, south-eastern part of the Baltic Sea, the Kaliningrad Lagoon.

Citation: Korobchenkova, K. D. and M. O. Ulyanova (2025), Assessment of Spatial Distribution of Water Discharge from the Kaliningrad Lagoon and the Pregolya River (the Baltic Sea) Based on Satellite Monitoring, *Russian Journal of Earth Sciences*, 25, ES4002, <https://doi.org/10.2205/2025ES001036>, EDN: TDNMGK

Received: September 26, 2024

Accepted: June 11, 2025

Published: June 24, 2025



© 2025. The Authors.

References

- Bajkiewicz-Grabowska E., Zalewski M., Kobusińska M. E., et al. The seasonal structure of contributors to the discharge of the Vistula River to the Baltic Sea // *Technology Wody*. — 2019. — No. 6. — P. 8–15. — (In Polish).
- Bashirova L., Sivkov V., Ulyanova M., et al. Climate and environmental monitoring of the Baltic Sea: General principles and approaches // *Reliability: Theory & Applications*. — 2023. — Vol. 18. — P. 164–171. — DOI: [10.24412/1932-2321-2023-575-164-171](https://doi.org/10.24412/1932-2321-2023-575-164-171).
- Boskachev R. V., Chubarenko B. V. Analysis of the variability of hydrological characteristics at the mouth section of the Pregolya River (Southeast Baltic) // *Hydrometeorology and Ecology*. — 2022. — No. 69. — P. 644–674. — DOI: [10.33933/2713-3001-2022-69-644-674](https://doi.org/10.33933/2713-3001-2022-69-644-674). — (In Russian).
- Chubarenko B., Zakirov R. Water Exchange of Nontidal Estuarine Coastal Vistula Lagoon with the Baltic Sea // *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. — 2021. — Vol. 147, no. 4. — DOI: [10.1061/\(asce\)ww.1943-5460.0000633](https://doi.org/10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000633).
- Chubarenko B. V., Chubarenko I. P. The transport of Baltic water along the deep channel in the Gulf of Kaliningrad and its influence on fields of salinity and suspended solids // *Proceedings of the Baltic Marine Science Conference 22-26 October 1996*. — ICES Cooperative research report No. 257, 2003. — P. 151–156.
- Dabuleviciene T., Vaiciute D., Kozlov I. E. Chlorophyll-a Variability during Upwelling Events in the South-Eastern Baltic Sea and in the Curonian Lagoon from Satellite Observations // *Remote Sensing*. — 2020. — Vol. 12, no. 21. — P. 3661. — DOI: [10.3390/rs12213661](https://doi.org/10.3390/rs12213661).
- Emelyanov E. M. *The Barrier Zones in the Ocean*. — Springer-Verlag, 2005. — P. 632. — DOI: [10.1007/b137218](https://doi.org/10.1007/b137218).

- ESIMO. Oceanographic Data Center of the Federal State Budgetary Institution VNIIGMI-MCD. — 1999. — URL: <http://portal.esimo.ru/portal/> ; (visited on 05/12/2024) ; (in Russian).
- Gasiunaite Z. R., Cardoso A. C., Heiskanen A. S., et al. Seasonality of coastal phytoplankton in the Baltic Sea: Influence of salinity and eutrophication // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. — 2005. — Vol. 65, no. 1/2. — P. 239–252. — DOI: [10.1016/j.ecss.2005.05.018](https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.05.018).
- Ginzburg A. I., Bulycheva E. V., Kostyanoy A. G., et al. On the role of vortices in the transport of oil pollution in the southeastern Baltic Sea (according to satellite monitoring) // *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. — 2015. — Vol. 12, no. 3. — P. 149–157. — EDN: [UAFZCR](https://www.edn.ru/2015/03/149-157) ; (in Russian).
- Gordeev V. V. River runoff into the ocean and its geochemical features. — Moscow : Nauka, 1983. — P. 152. — (In Russian).
- Korobchenkova K. D., Aleksandrov S. V., Semenova A. S., et al. Influence of Hydrometeorological Conditions on the Plankton Distribution in the Estuary of the Pregolya River and the Coastal Part of the Baltic Sea // *Oceanology*. — 2023. — Vol. 63, S1. — P. 188–201. — DOI: [10.1134/s0001437023070068](https://doi.org/10.1134/s0001437023070068).
- Kudryavtseva E. A., Aleksandrov S. V. Hydrological and Hydrochemical Underpinnings of Primary Production and Division of the Russian Sector in the Gdansk Basin of the Baltic Sea // *Oceanology*. — 2019. — Vol. 59, no. 1. — P. 49–65. — DOI: [10.1134/S0001437019010077](https://doi.org/10.1134/S0001437019010077).
- 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 Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. — 2016a. — Vol. 9, no. 11. — P. 5193–5201. — DOI: [10.1109/JSTARS.2016.2580602](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2580602).
- Lavrova O. Yu., Krayushkin E. V., Soloviev D. M., et al. Influence of wind and hydrodynamic processes on propagation of the vistula lagoon waters into the Baltic sea // *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. — 2014. — Vol. 11, no. 4. — P. 76–99. — EDN: [TJEKWP](https://www.edn.ru/2014/04/76-99) ; (in Russian).
- Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostyanoy A. G. Satellite methods for detecting and monitoring marine zones of ecological risk. — Moscow : IKI RAS, 2016b. — P. 334. — EDN: [XXTFLN](https://www.edn.ru/2016/03/334) ; (in Russian).
- Lazarenko N. N., Mayevsky A. Hydrometeorological regime of the Vistula Lagoon. — Leningrad : Hydrometeoizdat, 1971. — P. 279. — (In Russian).
- Lihan T., Saitoh S. I., Iida T., et al. Satellite-measured temporal and spatial variability of the Tokachi River plume // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. — 2008. — Vol. 78, no. 2. — P. 237–249. — DOI: [10.1016/j.ecss.2007.12.001](https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.12.001).
- Lisitsyn A. R. A marginal filter of the oceans // *Okeanologiya*. — 1994. — Vol. 34, no. 5. — P. 735–747. — EDN: [YJGOHJ](https://www.edn.ru/1994/05/735-747) ; (in Russian).
- 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 dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. — 2024. — Vol. 21, no. 4. — P. 237–250. — DOI: [10.21046/2070-7401-2024-21-4-237-250](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-4-237-250). — (In Russian).
- Nazirova K. R., Krayushkin E. V. Monitoring the spread of the Kaliningrad Bay waters in the Gulf of Gdansk (South-East Baltic) // *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. — 2021. — Vol. 18, no. 2. — P. 271–284. — DOI: [10.21046/2070-7401-2021-18-2-271-284](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-2-271-284). — (In Russian).
- Osadchiv A., Sedakov R., Barymova A. Response of a Small River Plume on Wind Forcing // *Frontiers in Marine Science*. — 2021. — Vol. 8. — P. 809566. — DOI: [10.3389/fmars.2021.809566](https://doi.org/10.3389/fmars.2021.809566).
- Osadchiv A. A., Zavialov P. O. Lagrangian model of a surface-advected river plume // *Continental Shelf Research*. — 2013. — Vol. 58. — P. 96–106. — DOI: [10.1016/j.csr.2013.03.010](https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.03.010).
- Polunina Yu. Yu., Stont Zh. I. Wind effect on zooplankton distribution in the estuary of the Pregolya River (the Baltic Sea basin) after technogenic transformation of its riverbed // *Marine Biological Journal*. — 2022. — Vol. 7, no. 1. — P. 78–92. — DOI: [10.21072/mbj.2022.07.1.07](https://doi.org/10.21072/mbj.2022.07.1.07). — (In Russian).
- Raspisaniye pogody LLC. Weather in 240 countries of the world. Weather archive in Baltiysk. — 2004. — (visited on 06/13/2024) ; (in Russian). <https://rp5.ru/>.
- Saldias G. S., Sobarzo M., Largier J., et al. Seasonal variability of turbid river plumes off central Chile based on high-resolution MODIS imagery // *Remote Sensing of Environment*. — 2012. — Vol. 123. — P. 220–233. — DOI: [10.1016/j.rse.2012.03.010](https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.03.010).
- Shchegolikhina M. S., Lavrova O. Yu. Monitoring of river and bay discharges with the help of satellite images of visible range // *Herald of Tver State University. Series: Geography and Geoecology*. — 2018. — No. 3. — P. 180–191. — DOI: [10.26456/2226-7719-2018-3-180-191](https://doi.org/10.26456/2226-7719-2018-3-180-191). — EDN: [YUNIRF](https://www.edn.ru/2018/03/180-191) ; (in Russian).

- Stont J. I., Navrotskaya S. E., Chubarenko B. V. Long-Term Tendencies in Variations of Hydro-Meteorological Characteristics in Kaliningrad Oblast // Journal of Oceanological Research. — 2020. — Vol. 48, no. 1. — P. 45–61. — DOI: [10.29006/1564-2291.JOR-2020.48\(1\).3](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(1).3). — (In Russian).
- Stont Z. I., Bobykina V. P., Ulyanova M. O. "Diving" cyclones and consequences of their impact on the coasts of the South-Eastern Baltic Sea // Russian Journal of Earth Sciences. — 2023. — ES2001. — DOI: [10.2205/2023ES000827](https://doi.org/10.2205/2023ES000827).
- Svendsen L., Gustafsson B., Sonesten L., et al. Input of nutrients by the seven biggest rivers in the Baltic Sea region in 1995–2017. — Baltic Sea Environment Proceedings No.178. HELCOM, 2021. — P. 24.
- The Copernicus Climate Change Service. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. — 2014. — (visited on 06/10/2024). <https://cds.climate.copernicus.eu/>.
- Thomas A., Weatherbee R. A. Satellite-measured temporal variability of the Columbia River plume // Remote Sensing of Environment. — 2006. — Vol. 100, no. 2. — P. 167–178. — DOI: [10.1016/j.rse.2005.10.018](https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.018).
- Vaiciute D., Bresciani M., Matta E., et al. Variability of bio-optical parameters of the SE Baltic Sea coastal waters based on in situ and satellite data // ESA Living Planet Symposium. — ESA, 2013. — P. 11.
- Zu T., Wang D., Gan J., et al. On the role of wind and tide in generating variability of Pearl River plume during summer in a coupled wide estuary and shelf system // Journal of Marine Systems. — 2014. — Vol. 136. — P. 65–79. — DOI: [10.1016/j.jmarsys.2014.03.005](https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.03.005).