Мониторинг распространения вод Калининградского залива в акватории Гданьского залива (Юго-Восточная Балтика)

К. Р. Назирова, Е. В. Краюшкин

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

Представлены результаты многолетнего мониторинга Гданьского залива в районе выноса вод из Калининградского залива через Балтийский пролив по спутниковым данным высокого пространственного разрешения в оптическом диапазоне в период с января 2014 г. по сентябрь 2020 г. с последующим сравнением полученных результатов об особенностях распространения вод Калининградского залива с данными натурных экспедиционных измерений, выполненных в летний период 2018–2020 гг. Представлены результаты анализа преобладающих скоростей и направления ветра и их связь с формой и направлением распространения выноса. Рассмотрены основные межгодовые и сезонные морфометрические характеристики плюма (площадь и форма распространения). На основе данных дистанционного зондирования были оцифрованы и вычислены площади поверхностных проявлений плюмов, результаты представлены в виде сводных ежегодных карт для всего периода исследования. На основе данных натурных измерений показана высокая временная изменчивость плюма в течение нескольких суток. Исследована тонкая вертикальная структура плюма и получены данные об основных характеристиках гидрологического режима прибрежной зоны, находящегося под влиянием выноса из Балтийского пролива.

Ключевые слова: вынос из залива, прибрежные течения, транспорт взвешенного вещества, измерения *in situ*, спутниковый мониторинг, OLI Landsat-8, MSI Sentinel-2, Юго-Восточная Балтика

Одобрена к печати: 09.04.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-271-284

Введение

Район исследования — это акватория Гданьского залива, расположенная в юго-восточной части Балтийского моря (*рис. 1*). Средняя глубина залива составляет 70 м.

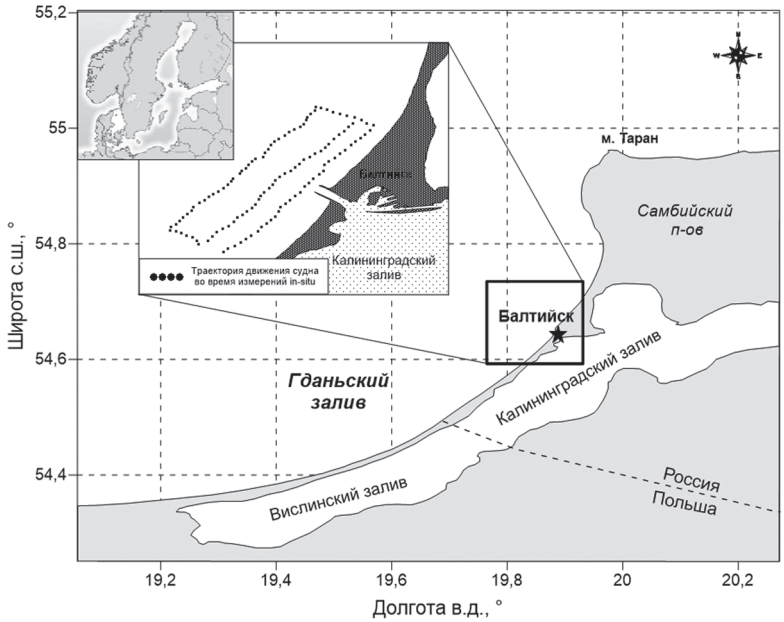


Рис. 1. Карта-схема района исследования

Воды залива испытывают сильное влияние от выноса р. Вислы (самая крупная река в Польше, площадь бассейна которой составляет 198,5 тыс. км^2, а расход воды — 1080 м^3/с), а также существенный вклад оказывает вынос вод из Калининградского (Вислинского) залива. Поступление в море большого количества взвешенного вещества хорошо проявляется на оптических данных спутникового дистанционного зондирования. Калининградский залив — это небольшая по размерам, практически замкнутая мелководная лагуна, отделённая от Гданьского залива песчаной Балтийской (Вислинской) косой. Средняя глубина залива составляет 2,7 м (за исключением искусственного фарватера (9–10 м)). Водообмен осуществляется через узкий Балтийский пролив, ширина которого составляет 400 м, а длина — 2 км (Гидрометеорология..., 1994; Лаврова и др., 2011). Система течений мелководного Балтийского моря формируется в первую очередь за счёт господствующих ветров. А также свой вклад вносит очертание береговой линии. Как правило, в мелководной прибрежной зоне скорость вдольберегового течения, направленного на северо-восток, не превосходит 50 см/с. Но при сильных северо-восточных ветрах картина может измениться на противоположную.

Как известно, Балтийское море представляет собой одну из акваторий Мирового океана, проявляющую чувствительность к глобальным изменениям климата. Так, в работе (Стонт и др., 2020) освещены особенности и приведены оценки тенденции изменения основных гидродинамических условий в прибрежной части Юго-Восточной Балтики за последний климатический полупериод (2005–2019). Для поля ветра над юго-восточной частью Балтийского моря характерно преобладание юго-западных и западных румбов, при этом увеличение скорости ветра наблюдается в осенне-зимний период года. Основная мода приходится на скорости 6–10 м/с. За последние 15 лет количество штормов медленно увеличивается: линейное приращение по тренду — +2 шторма (ветер со скоростью $\geqslant$15 м/с и продолжительностью не менее 6 ч) за период. Среднегодовая температура воздуха (T_a) возросла на 1,6 °С по сравнению с серединой XX в. (T_a в районе исследования составляет 8,9±0,6 °С). Максимальная T_a наблюдалась в 2019 г. — 9,9 °С. Среднегодовая температура поверхностного слоя акватории исследования также медленно повышается со скоростью 0,01 °С/год и равна 10,3±0,3 °С.

Повышение температуры воздуха и поверхностной температуры воды приводит к частым явлениям эвтрофикации Балтийского моря — насыщения водоёмов биогенными элементами, ростом биологической продуктивности (биомассы фитопланктона), в результате чего отмечается массовое развитие цианобактерий. В Калининградском заливе доминируют три разновидности фитопланктона: цианобактерии (более 80 % от общей численности), зелёные морские водоросли и диатомовые водоросли. Воды залива через Балтийский пролив попадают в Гданьский залив и при определённых гидрометеоусловиях могут распространяться на большие расстояния (Лаврова и др., 2011, 2014). Как показывают наши многолетние спутниковые наблюдения, вынос из залива может формировать либо плюм, аналогичный речному, либо хорошо сформированную струю, которая может распространяться как в юго-западном, так и в северо-восточном направлении вдоль морского побережья. В любом случае за счёт наличия в приповерхностном слое большого количества органического вещества (цианобактерий) становится возможным проследить трансформацию этих процессов, используя спутниковые сканеры цвета.

В работе (Лаврова и др., 2014) на основе результатов численного моделирования модифицированной модели Принстонского университета POM (*англ.* Princeton Ocean Model) (Blumberg, Mellor, 1987) на примере дрейфа взвешенного вещества в районе Гданьского залива было показано, что для адекватного описания процесса учёт только ветрового режима недостаточен: необходим учёт влияния как поля ветра, так и поля поверхностных морских течений. Более подробно с методикой расчётов и результатами моделирования можно ознакомиться в работах (Голенко и др., 2009, 2017).

Цель настоящей работы — изучить особенности распространения вод Калининградского залива через Балтийский канал в Гданьский залив на основе данных многолетнего спутникового мониторинга с дальнейшей верификацией результатов спутниковых наблюдений данными натурных измерений.

Материалы и методы

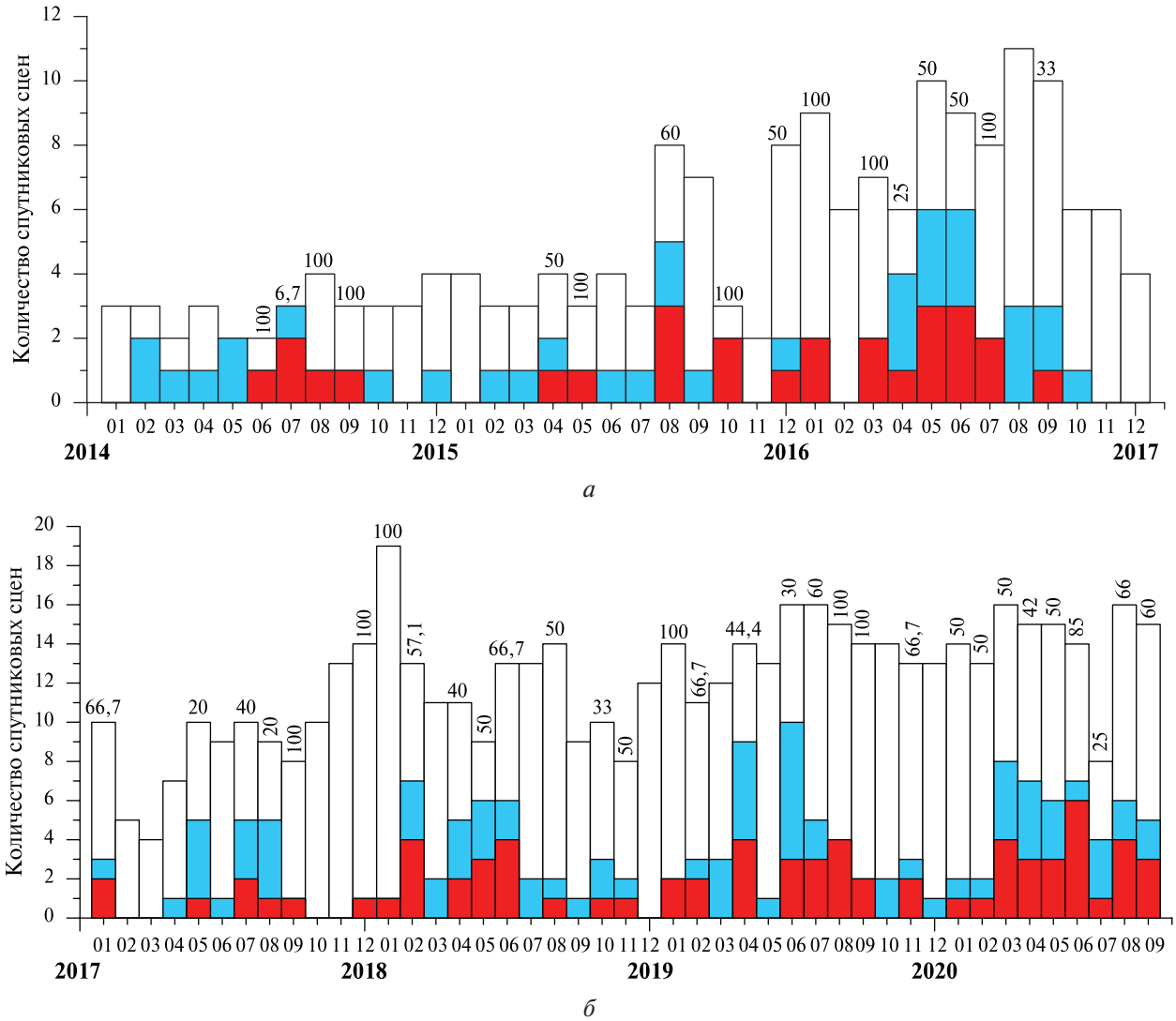
Спутниковый мониторинг. Опыт предыдущих исследований (Krayushkin et al., 2019) показал, что, несмотря на все преимущества радиолокационных данных (всепогодность и независимость от дневного света), их использование для мониторинга выноса из Калининградского залива не является информативным, так как область выноса именно в данном районе исследования практически никогда не имеет специфических проявлений на радиолокационных изображениях. Для исследования характера и морфологии выноса из Калининградского залива были использованы оптические данные дистанционного зондирования высокого пространственного разрешения для временного периода с января 2014 г. по сентябрь 2020 г. Основные данные были получены со спутника Landsat-8 (OLI — *англ.* Operational Land Imager) начиная с 2014 г. и спутников Sentinel-2A/2B (MSI — *англ.* Multispectral Instrument) с 2015 г. Пространственное разрешение получаемых изображений со спутников Landsat-8 и Sentinel-2 — 30 и 10 м соответственно, т. е. вполне достаточное для решения поставленных задач. В работе были использованы цветосинтезированные изображения в псевдоестественных цветах, которые строились по 4-му, 3-му и 2-му спектральным каналам для обоих сенсоров. Всего было проанализирована 721 сцена. При работе с оптическими данными в цветосинтезированном RGB-формате использовалась информационная система See the Sea, разработанная в Институте космических исследований РАН (Лупян и др., 2019; Лаврова и др., 2019). В системе See the Sea была проведена ручная оцифровка границ плюмов и определены их площади. Полученный материал позволил провести статистические оценки видимых на спутниковых данных особенностей распространения вод Калининградского залива через Балтийский пролив.

Судовые измерения. Для исследования трёхмерной структуры плюма и верификации спутниковых данных были проведены подспутниковые натурные измерения. Экспедиционные измерения проводились на траверзе г. Балтийска (см. *рис. 1*) с борта маломерного судна «Фламинго» с использованием акустического доплеровского профилографа течений ADCP (*англ.* Acoustic Doppler Current Profiler) Teledyne RD Instruments WorkHorse Monitor 300 Hz, а также CTD-зонда (*англ.* Conductivity, Temperature and Depth — электропроводимость, температура и глубина) RBR Concerto для определения температуры и солёности морской воды от поверхности до дна. Кроме того, производились измерения значений мутности вод с помощью дополнительного датчика обратного рассеивания света Seapoint Turbidity и концентрации хлорофилла *a* в воде с помощью датчика флюоресценции Turner Design Cyclops-7. А также проводились измерения мутности морской воды в приповерхностном слое (первые 10–20 см) при помощи портативного турбидиметра TN400 фирмы Apera Instruments (США). В настоящей работе использовались материалы пяти экспедиционных измерений: в августе 2018 г. (08.08.2018), в августе 2019 г. (01.08.2019 и 07.08.2019) и в августе 2020 г. (18.08.2020 и 21.08.2020).

Метеорологические данные. Для анализа и учёта основных метеорологических параметров (скорость и направление ветра, температура воздуха, атмосферное давление, количество выпавших осадков) использовался архив метеорологических данных Meteoblue (www.meteoblue.com). Эти метеорологические данные получены на основе использования глобальной модели NEMSGLOBAL, пространственное разрешение которой составляет 3–30 км, размер ячейки — 3×3 км. Данное моделирование основано на сочетании негидростатического мезомасштабного моделирования NMM (*англ.* Nonhydrostatic Meso-Scale Modelling) с реальными измерениями системы мониторинга окружающей среды (*англ.* Environment Monitoring System) NOAA (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration — Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США), что позволяет учитывать в расчётах множество деталей и тем самым увеличивать достоверность получаемых данных. Для изучения влияния ветрового режима на характер распространения вод из Калининградского залива были использованы данные в узле с координатами 54,69 °с.ш. и 19,78° в. д. (в четырёх милях от молов Балтийского пролива). Были определены преобладающие скорости и направления ветра (розы ветров) в период с января 2014 г. по сентябрь 2020 г.

Результаты

Спутниковый мониторинг. Для исследуемого района за период с января 2014 г. по сентябрь 2020 г. было проанализировано 721 спутниковое изображение. Из них на 511 изображениях район исследования покрыт сплошной облачностью; другими словами, практически 60 % спутниковых данных непригодны для мониторинга выноса из Калининградского залива. Оставшиеся 211 безоблачных сцен неравномерно распределены в течение всего исследуемого периода (*рис. 2*). Например, можно отметить небольшие периоды в разные годы, когда на всех спутниковых данных район исследования полностью покрыт облачностью, т. е. образуются пробелы в данных. В среднем наилучший показатель безоблачных дней — 50–60 % от общего количества спутниковых данных — наблюдается в весенне-летний период: с апреля по июль. Только на половине безоблачных сцен (~100 сцен) вынос из залива проявляется в виде плюма на спутниковых RGB-изображениях. При этом наличие плюма в той или иной степени фиксируется на протяжении всего года (с января по декабрь).



а

б

Рис. 2. Гистограммы распределения спутниковых данных в период с января 2004 г. по декабрь 2016 г. (*а*) и с января 2017 г. по сентябрь 2020 г. (*б*) над районом исследования в юго-восточной части Балтийского моря. Цветом отмечены спутниковые данные: белый — сцены, полностью покрытые облачностью; голубой — безоблачные сцены; красный — сцены, на которых вынос проявляется в виде плюма. Сверху над столбцами указано количество спутниковых сцен с видимым проявлением выноса из залива (в процентах) относительно количества безоблачных спутниковых изображений

Примечательно, что месяцы, когда зафиксировано наибольшее количество спутниковых сцен с проявлением плюма (>10 случаев в месяц), примерно совпадают со статистикой наиболее безоблачных сцен: апрель – август. Причиной этого является не только превосходство в количестве безоблачных дней над акваторией исследуемого района в этот период, но также этот период считается наиболее благоприятным для развития обильного цветения сине-зелёных водорослей в замкнутых заливах, за счёт которых вынос из канала проявляется наиболее ярко на спутниковых изображениях в оптическом диапазоне. В целом стоит отметить увеличение общего количества спутниковой информации в последние годы. Если в 2014 г. над исследуемым районом было получено меньше 50 спутниковых изображений (35) за весь год, то в 2019 г. их количество увеличилось более чем в 4,5 раза и уже составило 165 сцен (за счёт запуска спутника Sentinel-2B в марте 2017 г.).

Анализ межгодовой повторяемости спутниковых изображений с плюмом показал, что начиная с 2018 г. их количество тоже увеличивается (*рис. 3*). В 2014 г. было выделено только 5 спутниковых изображений с поверхностным проявлением выноса из залива. А за неполный 2020 г. зафиксировано 26 случаев.

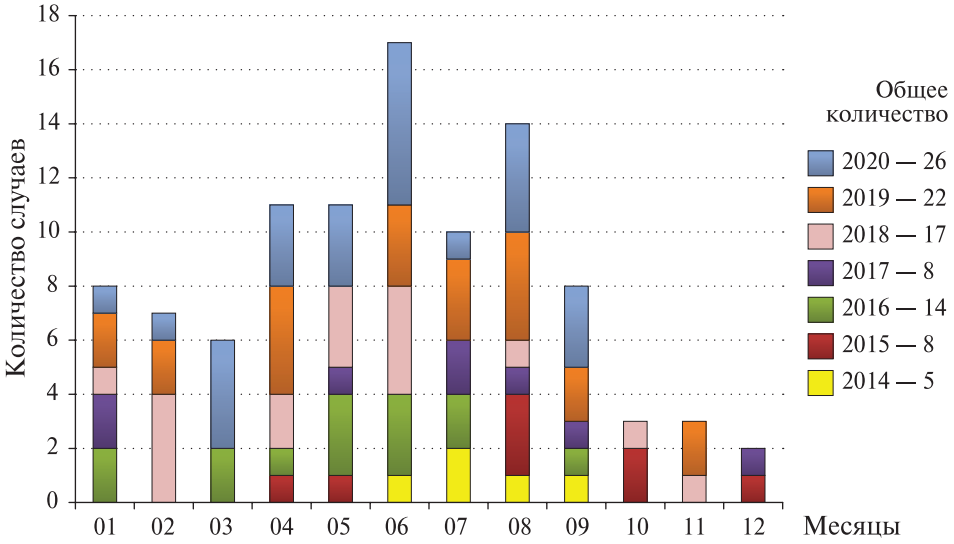


Рис. 3. Гистограмма распределения спутниковых данных, на которых проявляется поверхностный плюм по месяцам, для всего периода исследования с января 2014 г. по сентябрь 2020 г.

Каждый вынос из Калининградского залива в период с 2014 по 2020 г. был картирован (*рис. 4*, см. с. 276). Размеры, площадь распространения, форма и направление распространения плюма может существенно изменятся как от сезона к сезону, так и от года к году. Наибольшую суммарную площадь распространения вынос имел в 2020 г. — 1104,24 км^2, а наименьшую — в 2014 и в 2017 гг.: 220 и 251 км^2. На основе наблюдений было выявлено, что более чем в 80 % случаев вынос сконцентрирован в прибрежной зоне около Балтийского пролива, не превышающей в размерах 9,5 км от береговой черты и 7,5 км на запад и восток от створа Балтийского пролива. Было отмечено, что вынос из залива фиксируется на протяжении всего года, а также площадь плюмов в любое время года в течение нескольких дней может изменяться существенно (для примера, 03.06.2020 составлять 130,99 км^2, а 05.06.2020 — 10,6 км^2). В среднем в летний период вынос из канала проявляется наиболее ярко и имеет большие площади распространения по сравнению с другими месяцами.

В *таблице* представлен список наиболее крупных площадей плюма, обнаруженных за весь период исследований. Было получено, что максимальные площади выноса зафиксированы в летние месяцы при западных/западно-северо-западных ветрах (270–292,5°) или при юго-восточных/юго-юго-восточных ветрах (135–157,2°).

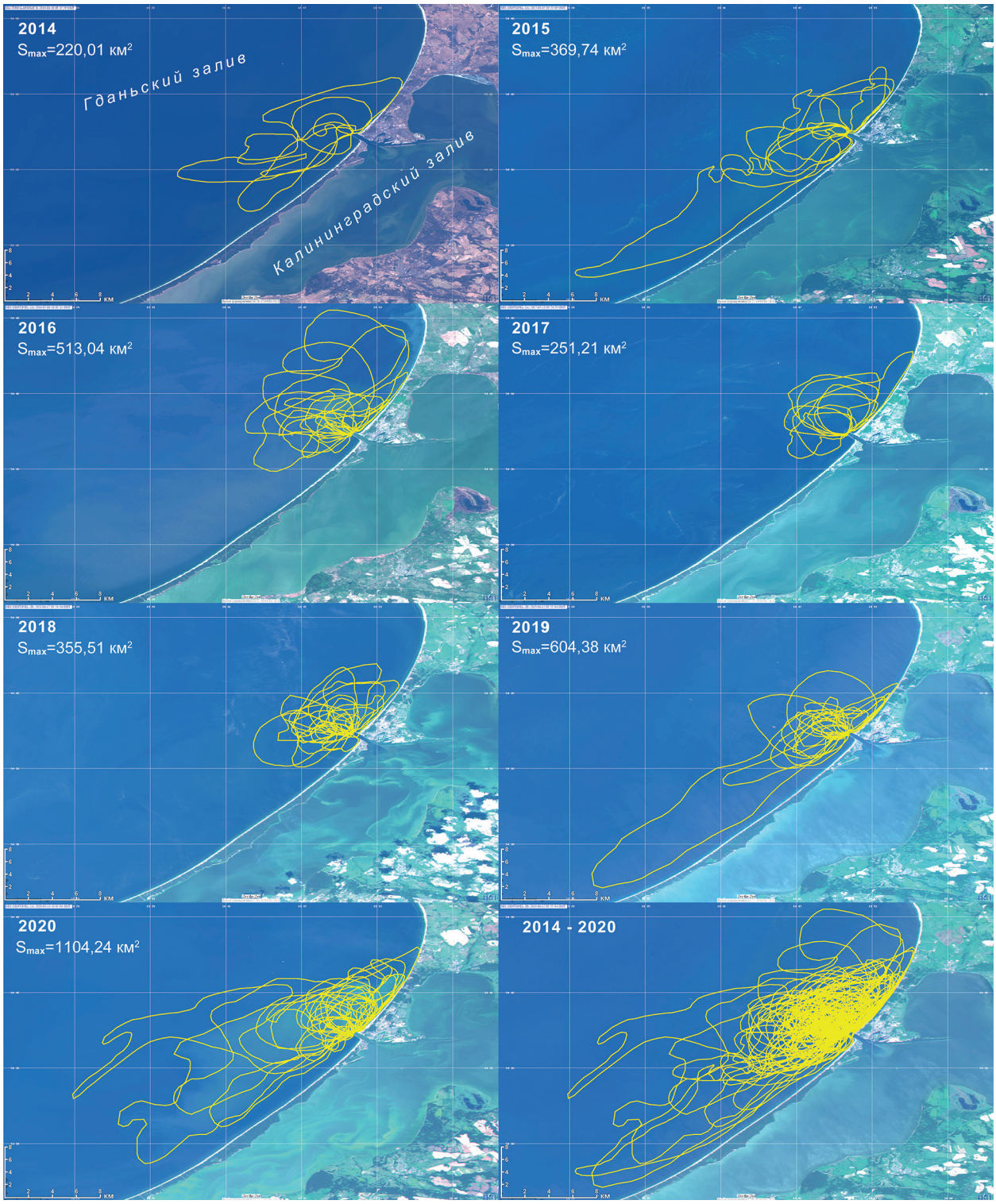


Рис. 4. Сводные карты поверхностных проявлений выноса из Калининградского залива в акваторию Гданьского залива, составленные на основе спутниковых данных за каждый год с 2014 по 2020 г.

Форма и характер распространения плюма в зависимости от ветрового режима. Водообмен между Гданьским и Калининградским заливами является высокодинамичной системой и в основном находится под влиянием ветрового режима. Помимо выноса Калининградских вод из залива встречаются случаи затока морских вод из Гданьского залива в Калининградский. Кроме однонаправленных течений (либо выноса заливных вод, либо затока морских вод в залив), которые составляют 74,9 % случаев, встречаются двухслойные течения (заток в придон-

ном слое и вынос в приповерхностном) — 13,4 % и двунаправленные — 13,4 % (Chubarenko, Margonski, 2008). Спутниковый мониторинг показал, что форма и размер плюма может сильно модифицироваться в течение суток. Несколько примеров типовых картин выноса из залива при разных метеорологических условиях продемонстрированы на *рис. 5*.

Максимальные площади выноса из Калининградского залива в период с 2014 по 2020 г. по спутниковым данным OLI Landsat-8 и MSI Sentinel-2

Дата	Прибор	Направление ветра	Площадь плюма, км^2
13.08.2020	MSI	З/ЗСЗ	219,78
04.06.2020		Ю/ЮЮВ	161,66
26.08.2019		З/ЗСЗ	160,65
03.06.2016	OLI	ЗЮЗ	130,99
20.08.2015		З/ЗСЗ	130,3
01.08.2014		В/ВЮВ	98,4
21.07.2016		ЮЮВ/ЮВ	88,55
23.05.2016	MSI	ЗСЗ/СЗ	82,65

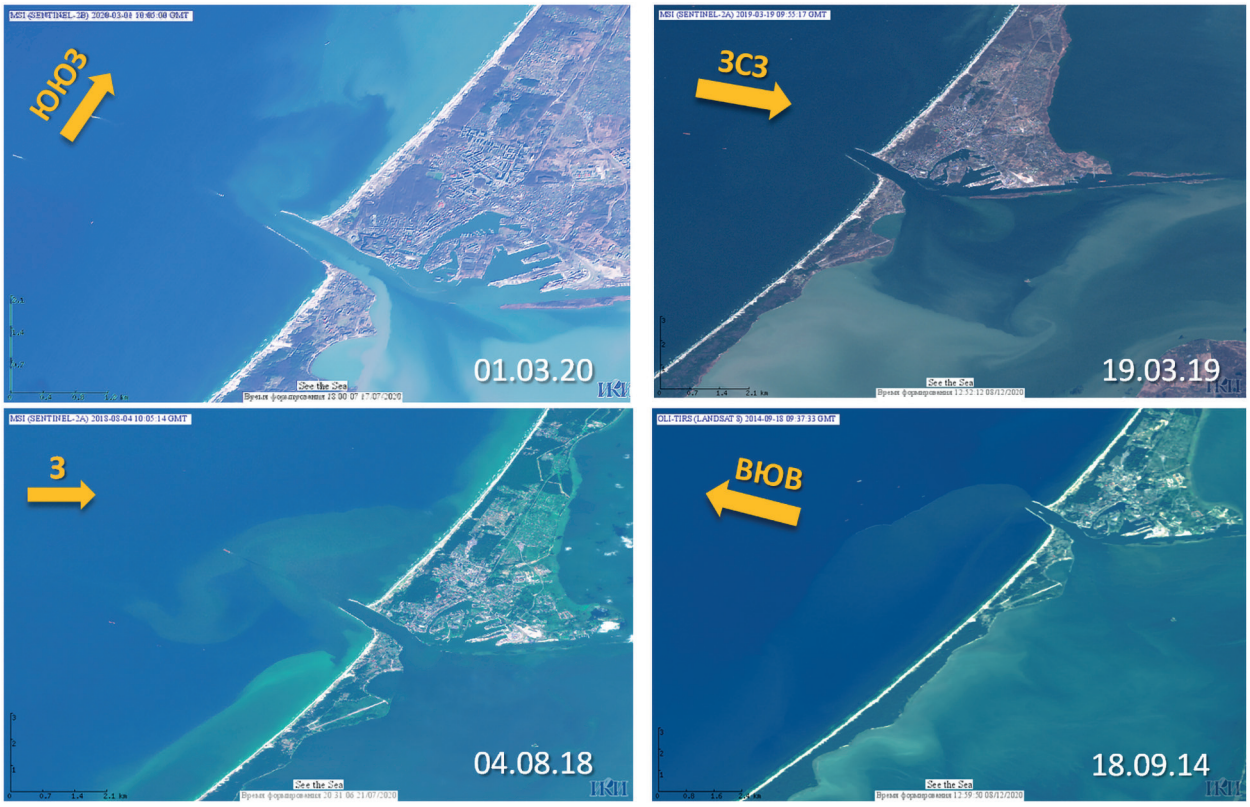


Рис. 5. Примеры разных типов выноса из Калининградского залива на фрагментах спутниковых изображений. Жёлтыми стрелками указаны преобладающие направления ветров

Наиболее часто при западных/юго-юго-западных ветрах калининградские воды из залива распространяются в северо-восточном направлении (см. *рис. 5а*), вовлекаясь в систему прибрежных течений. Взвешенные частицы при таких условиях могут распространяться на большие расстояния, вплоть до Самбийского п-ова и дальше за м. Таран (Краюшкин и др., 2018). При восточных/восточно-юго-восточных ветрах вынос распространяется в юго-западном направлении (см. *рис. 5г*). При резких сменах характера ветрового режима на западной периферии выноса могут образовываться вихревые или грибовидные структуры (см. *рис. 5в*).

Для затоков вод Гданьского залива в Калининградский залив, обнаруженных по данным дистанционного зондирования, характерны сильные устойчивые северные/северо-северо-восточные и северо-западные/западно-северо-западные ветры со средней скоростью 8–10 м/с (см. *рис. 5б*). Преимущественно данное явление встречается в весенне-зимний период. Наибольшее количество случаев затока Гданьских морских вод в Калининградский залив отмечалось в марте.

Анализ полученных данных показал, что на форму плюма оказывает влияние как ветер, так и система прибрежных течений. При отсутствии сформированной струи прибрежных течений и слабом ветре выносу ничего не препятствует для распространения и «растекания». В таком случае вынос чаще всего имеет шарообразную форму. А при сильном вдольбереговом течении (юго-западного или северо-восточного направлений) или при сильных устойчивых ветрах вынос вытягивается в виде струи, параллельной береговой линии, и направлен либо на юго-запад, либо на северо-восток (см. *рис. 5г*).

Натурные измерения. Далее будут представлены результаты экспедиционных измерений, выполненные в августе 2018, 2019 и 2020 гг.

2018 г. 8 августа 2018 г. было выполнено четыре параллельных берегу галса на траверзе Балтийска. Синхронно с измерениями акустического доплеровского измерителя течений ADCP было осуществлено 34 CTD-зондирования. В этот период преобладали ветры юго-юго-восточных направлений со скоростями 6–7 м/с. На основе гидрологической съёмки было выявлено, что 8 августа выток из Калининградского залива представлял собой небольшой факел выноса с осью, направленной на северо-восток, чему способствовали ветры западных румбов, господствующие в этом районе в предыдущие дни. Также по данным ADCP-профилирования отмечается наличие прижатой узкой вдольбереговой струи течения, которая проявлялась за счёт увеличения скорости потока на ближайших к берегу галсах (этот случай более подробно описан в статье (Краюшкин и др., 2018)). На карте приповерхностного поля солёности видно, что для плюма в этот день характерны пониженные значения солёности по сравнению с окружающими его морскими водами, которые изменялись в пределах от 5 до 6 е. п. с. (единицы практической солёности). Измеренные значения солёности для морской воды 8 августа 2018 г. составляли 6,7–6,9 е. п. с. Также в плюме отмечались повышенные значения мутности и концентрации хлорофилла *a*. Температура приповерхностного слоя воды, наоборот, была ниже температуры морских вод: 23,7 и 24,3 °С соответственно. Вертикальная мощность плюма в среднем составляла 4 м.

В **2019 г.** были выполнены две серии натурных измерений в районе вытока из Калининградского канала — 1 и 7 августа. К сожалению, на даты проведений измерений мы не имеем данных дистанционного зондирования в силу плотной кучево-дождевой облачности над исследуемым районом. Было выполнено две съёмки профилографом течений ADCP и сделано 48 гидрологических станций. По данным измерений *in situ*, 1 августа вынос из Калининградского залива распространялся в юго-западном направлении, что является статистически наиболее часто встречающимся сценарием, как показал анализ архивных данных дистанционного зондирования за предыдущие годы. В этот день отмечался слабый северный/северо-западный ветер 3–4 м/с, который, судя по всему, не оказывал существенного влияния на динамику плюма. Весьма отчётливо можно провести границу плюма на основе карт поверхностного распределения мутности морской воды, построенных по данным CTD-зондирований. Изолиния со значениями 2 NTU (*англ*. Nephelometric Turbidity Unit — единица мутности) является граничной и отделяет условно чистые морские воды от замутнённых вод залива, поступающих через Балтийский канал в море. Максимальные значения мутности отмечаются в непосредственной близости к самому каналу и 1 августа соответствовали 22 NTU. Минимум солёности морской воды также характерен для зоны, наиболее близкой к каналу, — ~6,3 е. п. с. Далее при постепенном смешении с морскими водами солёность плавно увеличивалась до 7,3 е. п. с.

7 августа была выполнена вторая аналогичная съёмка. По результатам обработки полученных данных можно сделать вывод, что ярко выраженного выноса из залива уже не наблюдалось. Ветер был слабый (1–2 м/с), неустойчивый и разнонаправленный. Система припо-

верхностных течений свидетельствует о наличии вдольберегового течения северо-восточного направления, что блокировало распространение выноса от береговой линии. Значения мутности морской воды не превышали 5–6 NTU в приповерхностном слое, на горизонте 1 м составляли ⩽1 NTU. Воды залива тонкой линзой, прижатой к берегу, распространялись симметрично от створа Балтийского канала (т. е. плюм имел шарообразную форму) и отличались слегка пониженными значениями солёности (6,7 е. п. с.) и температуры воды (20 °С) по сравнению с окружающей морской водой.

2020 г. В рамках очередной ежегодной экспедиции в 2020 г. были выполнены две гидрологические съёмки (18 и 21 августа) на траверзе Балтийска. Суммарно было сделано 47 CTD-зондирований. 18 августа вынос из Калининградского залива имел ровную шарообразную форму небольшого диаметра (отдаление от берега — не более двух миль) при преобладающих ветрах северо-восточных румбов со скоростями 4–5 м/с. Лучше всего плюм проявлялся в поверхностном распределении солёности и мутности морской воды.

Минимальные значения солёности соответствовали области, наиболее приближённой к створу канала, и составляли 6,6 е. п. с. Морские воды характеризовались значениями солёности, равными 7,5 е. п. с., и температурой поверхностного слоя 17,4 °С. Максимальные значения мутности морской воды в поверхностном слое составляли 18 NTU, а на горизонте 0,6 м — уже не более 9 NTU (у самого канала).

Вторая серия измерения была выполнена 21 августа. К сожалению, на момент проведения измерений спутниковые данные также отсутствуют. План работ был выстроен на основе спутникового изображения от 20 августа (*рис. 6*).

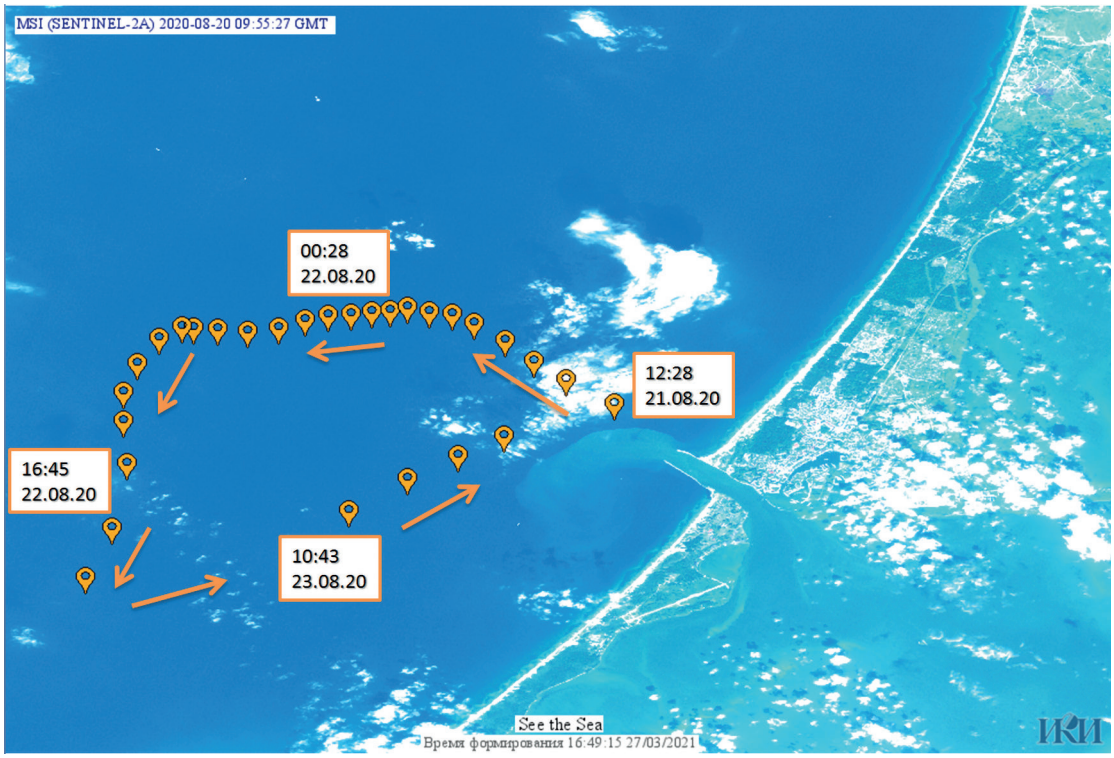


Рис. 6. Фрагмент спутникового изображения, полученного со спутника Sentinel-2A (MSI) 20 августа 2020 г. Оранжевыми метками нанесена часть траектории движения поверхностного дрифтера, запущенного 21 августа 2020 г. во время судовых измерений. Стрелками указано основное направление движения дрифтера. Подписи соответствуют времени приёма координат

Как видно на спутниковом изображении, 20 августа вынос из Калининградского залива имел небольшую площадь и распространялся в юго-западном направлении. На его западной границе можно отметить начало формирования циклонической завихренности. На *рис. 6*

были нанесены данные, полученные при запуске поверхностного дрифтера (глубина паруса 2 м) 21 августа 2020 г. во время проведения судовых измерений. Дрифтер был выпущен в 12:00 по местному времени на траверзе Балтийского пролива. В тот момент место запуска дрифтера соответствовало восточной периферии внутренней части плюма.

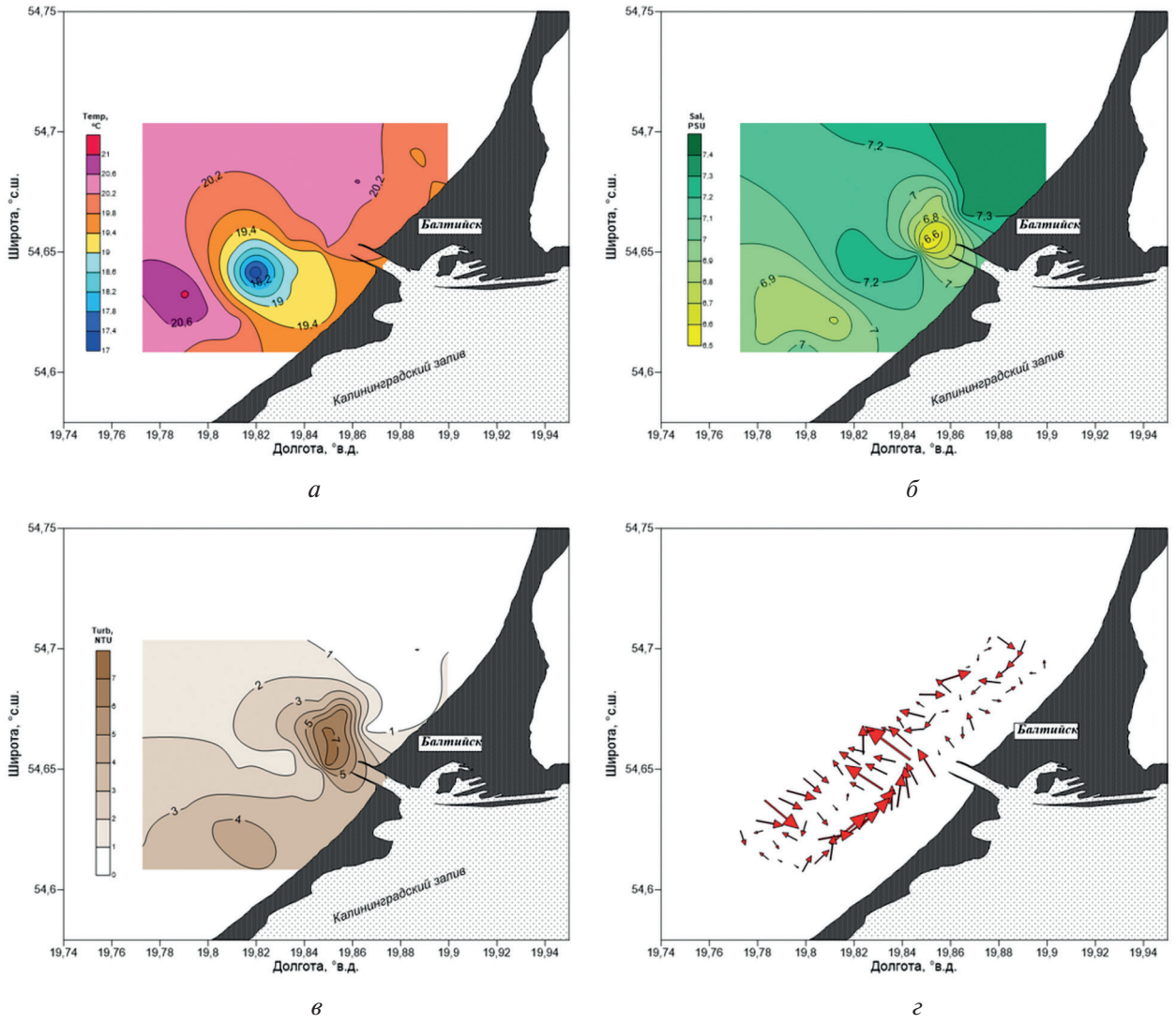


Рис. 7. Карты поверхностного распределения температуры (*а*), солёности (*б*), мутности морской воды (*в*) и поверхностные течения (*г*) на 21 августа 2020 г.

Натурные измерения 21 августа помогли установить, что плюм имел чёткую восточную границу и размытый факел выноса, направленный на юго-запад. Максимальные значения мутности в приповерхностном слое не превышали 7–8 NTU. Значения солёности морской воды у канала составляли 6,5 е. п. с., а температура поверхностного слоя была 19–20 °С. На картах поверхностного распределения мутности, солёности и температуры морской воды западнее от канала отмечаются двойные экстремумы (*рис. 7*). При сопоставлении с картой поверхностных течений, измеренных профилографом ADCP, можно предположить, что на периферии выноса из канала образовался слабый циклонический вихрь (данное явление также встречалось ранее при мониторинге района исследования средствами дистанционного зондирования, но ни разу не было измерено *in situ*). Вероятно, этому могла способствовать резкая смена направления ветра: с более сильного юго-восточного (4–5 м/с) на слабые юго-западные румбы (1–2 м/с). Центральная часть вихря характеризовалась пониженными значе-

ниями температуры морской воды (17 °С), меньшей мутностью (2–3 NTU) и более высокими значениями солёности (7,2–7,4 е. п. с.) по сравнению с окружающими водами. Выпущенный в этот день дрифтер, как видно на *рис. 6*, не был вовлечён в вихревую структуру, а ушёл строго на запад.

Заключение

Район юго-восточной части Балтийского моря характеризуется повышенной вихревой активностью и сложными прибрежными динамическими процессами, что неоднократно отмечалось в работах, основанных на данных дистанционного зондирования (Гинзбург и др., 2015; Лаврова, Митягина, 2016). В последнее десятилетие с появлением спутниковых данных высокого пространственного разрешения стало возможным более детально изучать мелкомасштабные процессы в прибрежной зоне, одними из которых являются поверхностные плюмы (Краюшкин и др., 2020; Лаврова и др., 2015; Lavrova et al., 2016, 2018).

В результате многолетнего спутникового мониторинга на основе оптических данных высокого пространственного разрешения в период с января 2014 г. по сентябрь 2020 г. были проанализированы межгодовая и сезонная изменчивость плюма в районе выноса вод Калининградского залива через Балтийский пролив. Также были определены площади поверхностных плюмов, образовавшихся при попадании вод Калининградского залива в Гданьский залив. Полученный материал позволил произвести статистические оценки основных видимых на спутниковых данных особенностей водообмена через Балтийский пролив.

В результате спутникового мониторинга было получено, что на 60 % спутниковых данных район исследования покрыт сплошной облачностью. Наилучший показатель безоблачных дней (50–60 % от общего количества данных) наблюдается в весенне-летний период: с апреля по июль. Только на половине безоблачных сцен вынос проявляется в виде плюма, при этом его наличие в той или иной степени фиксируется на протяжении всего года.

Исследование показало, что размеры, площадь распространения, форма и направление распространения плюма могут существенно изменяться как от сезона к сезону, так и от года к году. Также отмечена высокая динамическая вариативность формы и размера плюма в течение нескольких суток. Более чем в 80 % случаев вынос сконцентрирован в прибрежной зоне около Балтийского пролива, не превышающей в размерах 9,5 км от береговой зоны и 7,5 км на запад и восток от створа пролива. Было получено, что максимальные площади выноса, при которых он распространяется вдоль береговой черты на большие расстояния, были зафиксированы в летние месяцы при западных/западно-северо-западных ветрах или при преобладании юго-восточных/юго-юго-восточных ветров. За весь период исследований максимальная площадь распространения выноса была зафиксирована 13 августа 2020 г. и единовременно составила 219,78 км^2.

Были выявлены основные особенности характера распространения плюма в зависимости от ветрового воздействия. При западных/юго-юго-западных ветрах калининградские воды из залива распространяются в северо-восточном направлении. При восточных/восточно-юго-восточных ветрах вынос распространяется в юго-западном направлении. При резких сменах характера ветрового режима на западной периферии выноса могут образовываться вихревые или грибовидные структуры. Для затоков, обнаруженных по данным дистанционного зондирования, характерны сильные устойчивые северные/северо-северо-восточные и северо-западные/западно-северо-западные ветры со средней скоростью 8–10 м/с.

Была исследована тонкая вертикальная структура плюма и получены данные об основных характеристиках гидрологического режима прибрежной зоны, находящегося под влиянием выноса из Балтийского пролива. Плюм характеризуется пониженными значениями солёности: в среднем на 1–2 единицы меньше, чем морские воды, и наоборот, повышенными значения мутности морской воды. Вертикальная мощность выноса может варьироваться от 1 до 4 м. Это подтверждают данные CTD-зондирования и данные обратного рассеивания, полученные при ADCP-профилировании.

В дальнейшем исследовании следует более тщательно рассмотреть механизм образования вихревых структур на периферии выноса, а также изучить связь между процессами, влияющими на концентрацию взвешенного вещества в самом плюме. И безусловно, дополнить полученные первичные результаты о морфометрических характеристиках плюма могут проведённые в будущем синхронные подспутниковые измерения.

Авторы благодарят Ольгу Юрьевну Лаврову за помощь и ценные советы при работе над статьёй.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 01.20.0.2.00164 (тема «Мониторинг»). Обработка и анализ спутниковых данных проводились с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-мониторинг» с помощью инструментария информационной системы See the Sea.

Литература

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 3. Балтийское море. Вып. 2. СПб.: Гидрометеоиздат, 1994. 436 с.
2. *Гинзбург А. И.*, *Булычева Е. В.*, *Костяной А. Г.*, *Соловьев Д. М.* Вихревая динамика в Юго-Восточной Балтике по данным спутниковой радиолокации // Океанология. 2015. Т. 55. № 6. С. 893–902. DOI: 10.7868/S0030157415060064.
3. *Голенко Н. Н.*, *Голенко М. Н.*, *Щука С. А.* Наблюдение и моделирование апвеллинга в юго-восточной Балтике // Океанология. 2009. Т. 49. № 1. С. 20–27.
4. *Голенко М. Н.*, *Краюшкин Е. В.*, *Лаврова О. Ю.* Исследование особенностей прибрежных поверхностных течений в Юго-Восточной Балтике по результатам подспутниковых дрифтерных экспериментов и численного моделирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 7. С. 280–296. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-280-296.
5. *Краюшкин Е. В.*, *Лаврова О. Ю.*, *Назирова К. Р.*, *Алферьева Я. О.*, *Соловьев Д. М.* Формирование и распространение вихревого диполя за мысом Таран в Юго-Восточной Балтике // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 214–221. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-214-221.
6. *Краюшкин Е. В.*, *Назирова К. Р.*, *Лаврова О. Ю.*, *Князев Н. А.* Субмезомасштабный циклонический вихрь за мысом Гвардейский в Юго-Восточной Балтике: спутниковые наблюдения и подспутниковые измерения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 290–299. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-290-299.
7. *Лаврова О. Ю.*, *Митягина М. И.* Особенности проявления на спутниковых изображениях гидродинамических процессов в областях интенсивного цветения фитопланктона // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 145–160. DOI: 10.7868/S0205961416010085.
8. *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. 470 с.
9. *Лаврова О. Ю.*, *Краюшкин Е. В.*, *Соловьев Д. М.*, *Голенко М. Н.*, *Голенко Н. Н.*, *Калашникова Н. А.*, *Демидов А. Н.* Влияние ветрового воздействия и гидродинамических процессов на распространение вод Калининградского залива в акватории Балтийского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 76–99.
10. *Лаврова О. Ю.*, *Митягина М. И.*, *Сабинин К. Д.*, *Серебряный А. Н.* Изучение гидродинамических процессов в шельфовой зоне на основе спутниковой информации и данных подспутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 98–129.
11. *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.
12. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А.*, *Кашницкий А. В.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С. А.*, *Константинова А. М.*, *Кобец Д. А.*, *Мазуров А. А.*, *Марченков В. В.*, *Матвеев А. М.*, *Радченко М. В.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.* Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.

13. *Стонт Ж. И.*, *Буканова Т. В.*, *Крек Е. В.* Изменчивость климатических характеристик прибрежной части Юго-Восточной Балтики в начале XXI века // Вестн. Балтийского федерального ун-та им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2020. № 1. С. 81–94.
14. *Blumberg A. F.*, *Mellor G. L.* A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model // Three-Dimensional Coastal Ocean Model. V. 4 / ed. N. S. Heaps. Washington: American Geophysical Union, 1987. P. 1–16.
15. *Chubarenko B.*, *Margonski P.* The Vistula Lagoon // Ecology of Baltic Coastal Waters. Ecological Studies. V. 197 / ed. U. Sshiewer. Springer-Verlag, 2008. P. 167–195.
16. *Krayushkin E. V.*, *Lavrova O. Yu.*, *Nazirova K. R.* Distinctive features of the Vistula lagoon outflow by remote sensing and oceanographic experiments data // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2019: Proc. Conf. 2019. V. 111500W. URL: https://doi.org/10.1117/12.2533024.
17. *Lavrova O.*, *Krayushkin E.*, *Golenko M.*, *Golenko N.* Effect of wind and hydrographic conditions on the transport of Vistula Lagoon waters into the Baltic Sea: results of a combined experiment // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016. V. 9. Iss. 9. P. 5193–5201. DOI 10.1109/JSTARS.2016.25806022016.
18. *Lavrova O. Yu.*, *Krayushkin E. V.*, *Nazirova K. R.*, *Strochkov A. Ya.* Vortex structures in the Southeastern Baltic Sea: satellite observations and concurrent measurements // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2018: Proc. Conf. 2018. V. 10784. 1078404. DOI: 10.1117/12.2325463.

Monitoring the spread of the Kaliningrad Bay waters in the Gulf of Gdansk (South-East Baltic)

K. R. Nazirova, E. V. Krayushkin

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

The results of long-term outflow monitoring from Kaliningrad Bay are presented based on high spatial resolution optical data for the period from January 2014 to September 2020, with the subsequent verification with data from field expedition measurements performed in the summer period in 2018–2020. The work analyzed the prevailing wind speeds and directions and their relationship with the shape and direction of the outflow spreading. The main interannual and seasonal morphometric features of the plume are considered. On the basis of remote sensing data, the areas of surface plumes were digitized and calculated, the results are presented in the form of summary annual maps for the entire study period. Based on the data of field measurements, a high dynamic variability of the plume was shown for several days. The fine vertical structure of the plume was investigated.

Keywords: outflow from bay, wind forcing, coastal dynamics, suspended matter transport, *in situ* measurements, satellite monitoring, Landsat-8 OLI, Sentinel-2 MSI, South-East Baltic

Accepted: 09.04.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-271-284

References

1. *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei. Baltiiskoe more* (Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. Baltic Sea), Vol. 8, No. 2, Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1994, 436 p. (in Russian).
2. Ginzburg A. I., Bulycheva E. V., Kostyanoy A. G., Soloviev D. M., Vortex dynamics in the Southeastern Baltic Sea from satellite radar data, *Oceanology*, 2015, Vol. 55(6), pp. 805–813, DOI: 10.1134/S0001437015060065.
3. Golenko N. N., Golenko M. N., Shchuka S. A., Observation and modeling of upwelling in the Southeastern Baltic, *Oceanology*, 2009, Vol. 49, No. 1, pp. 15–21, DOI: 10.1134/S0001437009010020.

4. Golenko M. N., Krayushkin E. V., Lavrova O. Yu., Investigation of coastal surface currents in the South-East Baltic based on concurrent drifter and satellite observations and numerical modeling, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14(7), pp. 280–296 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-280-296.
5. Krayushkin E. V., Lavrova O. Yu., Nazirova K. R., Alferyeva Ya.O., Soloviev D. M., Formation and propagation of an eddy dipole at Cape Taran in the southeast Baltic Sea, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15(4), pp. 214–221 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-214-221.
6. Krayushkin E. V., Nazirova K. R., Lavrova O. Yu., Knyazev N. A., Submesoscale cyclonic vortex structure behind Cape Gvardeisky in the SouthEastern part of the Baltic Sea: satellite observations and concurrent measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17(4), pp. 290–299 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-290-299.
7. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Manifestation specifics of hydrodynamic processes in satellite images of intense phytoplankton bloom areas, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 1–2, pp. 145–160 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961416010085.
8. Lavrova O. Yu., Kostyanoi A. G., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., *Complex Satellite Monitoring of the Russian Seas*, Moscow: IKI RAN, 2011, 480 p. (in Russian).
9. Lavrova O. Yu., Krayushkin E. V., Soloviev D. M., Golenko M. N., Golenko N. N., Kalashnikova N. A., Demidov A. N., Influence of wind abd hydrodynamic processes on propagation of the Vistula lagoon waters into the Baltic Sea, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11(4), pp. 76–99 (in Russian).
10. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Sabinin K. D., Serebryanyi A. N., Study of hydrodynamic processes in the shelf zone on the basis of satellite information and data from subsatellite measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 98–129 (in Russian).
11. 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, Vol. 16, No. 3, pp. 266–287 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
12. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Mazurov A. A., Marchenkov V. V., Matveev A. M., Radchenko M. V., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
13. Stont Zh.I., Bukanova T. V., Krek E. V., Variability of climatic characteristics over the south-east Baltic coastal waters in the early XXI century, *Vestnik Baltiiskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta*, *Ser.: Estestvennye i meditsinskie nauki*, 2020, No. 1, pp. 81–94 (in Russian).
14. Blumberg A. F., Mellor G. L., A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model, In: *Three-Dimensional Coastal Ocean Models Coastal and Estuarine Sciences*, *Vol. 4.*, N. S. Heaps (ed.), Washington: American Geophysical Union, 1987, pp. 1–16.
15. Chubarenko B., Margonski P., The Vistula Lagoon, In: *Ecology of Baltic Coastal Waters*, *Ecological Studies*, *Vol. 197*, U. Sshiewer (ed.), Springer-Verlag, 2008, pp. 167–195.
16. Krayushkin E. V., Lavrova O. Yu., Nazirova K. R., Distinctive features of the Vistula lagoon outflow by remote sensing and oceanographic experiments data, *Remote Sensing of the Ocean*, *Sea Ice*, *Coastal Waters*, *and Large Water Regions 2019*, Proc. Conf., 2019, Vol. 111500W
17. Lavrova O., Krayushkin E., Golenko M., Golenko N., Effect of wind and hydrographic conditions on the transport of Vistula Lagoon waters into the Baltic Sea: results of a combined experiment, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, Vol. 9, Issue 9, pp. 5193–5201, DOI: 10.1109/JSTARS.2016.25806022016.
18. Lavrova O. Yu., Krayushkin E. V., Nazirova K. R., Strochkov A. Ya., Vortex structures in the Southeastern Baltic Sea: satellite observations and concurrent measurements, *Remote Sensing of the Ocean*, *Sea Ice*, *Coastal Waters*, *and Large Water Regions 2018*, Proc. Conf., 2018, Vol. 10784, 1078404, DOI: 10.1117/12.2325463.