Дистанционный мониторинг морской площадки карбонового полигона «Росянка» (Балтийское море): первые результаты

Т. В. Буканова^{1,2}, Е. С. Бубнова^{1,2}, С. В. Александров¹

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия E-mails: tatiana.bukanova@gmail.com, bubnova.kat@gmail.com, hydrobio@mail.ru ² Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта Калининград, 236041, Россия

В рамках пилотного проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по строительству и развитию сети карбоновых полигонов в российском секторе юго-восточной части Балтийского моря в 2021 г. развёрнута морская площадка карбонового полигона (КП) «Росянка». Площадка расположена в территориальных водах РФ, где глубина составляет 64-87 м, находится под влиянием стока крупнейшей в регионе р. Вислы, а также в непосредственной близости от выноса Калининградского зал. и р. Преголи. В статье представлены результаты спутникового мониторинга концентрации хлорофилла а, концентрации взвешенного вещества и температуры поверхности моря на морской площадке КП «Росянка» в период с апреля 2021 г. по сентябрь 2022 г. Для изучения изменчивости температуры поверхности моря были проанализированы данные, полученные с помощью спутниковых сканеров MODIS/Aqua, Terra (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и VIIRS/SNPP (англ. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite/Suomi National Polar-orbiting Partnership); для оценки концентрации хлорофилла а и взвешенного вещества использовались данные мультиспектрального радиометра OLCI/Sentinel-3A/В (англ. Ocean and Land Colour Instrument) (алгоритм с применением нейронной сети). В дополнение привлекались спутниковые изображения оптического диапазона высокого разрешения сенсора MSI/Sentinel-2 (англ. Multispectral Instrument), а также судовые измерения: СТД-профили (англ. Conductivity, Temperature and Depth), концентрация общей взвеси, определённая весовым методом, и концентрация хлорофилла а, полученная спектрофотометрическим методом. Показан годовой ход и особенности сезонной динамики температуры поверхности моря, концентрации хлорофилла а и взвешенного вещества на морской площадке КП. Температурный режим поверхности моря в районе исследования подвержен сезонным изменениям и значительным межгодовым вариациям. Распределение концентрации хлорофилла а носит ярко выраженный сезонный характер и отражает периоды активной вегетации фитопланктона, характерные для центральной части Балтийского моря, концентрация взвеси максимальна в период весеннего половодья. Сопоставление спутниковых данных и измерений in situ показало полное соответствие судовых данных и спутниковых наблюдений для температуры поверхности моря, тесную взаимосвязь для концентрации взвешенного вещества и заметно более слабую связь для концентрации хлорофилла а. По спутниковым данным выявлено и описано влияние выносов Калининградского зал. и р. Вислы на морскую площадку карбонового полигона. Показано расположение морской площадки в области интенсивной гидродинамики и вихреобразования, характеризующейся максимальными концентрациями хлорофилла а и взвешенного вещества.

Ключевые слова: карбоновый полигон, температура поверхности моря, концентрация хлорофилла *a*, взвешенное вещество, измерения *in situ*, спутниковые данные, Балтийское море

> Одобрена к печати: 02.12.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-234-247

Введение

В феврале 2021 г. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации запустило пилотный проект по созданию на территории регионов России карбоновых полигонов (КП) для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса в рамках реализации национального плана мероприятий по адаптации к изменению климата. В качестве КП выбраны территории с природными и антропогенно изменёнными экосистемами, наиболее подходящими для мониторинга потоков климатических активных газов, а также для отработки технологий секвестрации углерода (https://minobrnauki.gov.ru/action/poligony). Одним из первых в России открылся КП «Росянка», расположенный в Калининградской обл. в оперативном управлении Балтийского федерального университета (БФУ) имени Иммануила Канта при участии научных организаций-партнёров. Он стал первым полигоном не только с сухопутным, но и с морским участком (http://rosyanka.kantiana.ru). В контексте оценки цикла углерода Балтийское море представляется уникальным бассейном по скорости первичного продуцирования (фотосинтеза), обусловленной высокой степенью эвтрофикации вод, в частности из-за сильного антропогенного влияния (Kudryavtseva, Aleksandrov, 2019).

Морской участок Калининградского КП площадью 1,43 км² расположен в территориальных водах РФ на восточном склоне Гданьской впадины (глубина 64–87 м) и находится под влиянием стока рек Вислы и Преголи, впадающей в Калининградский зал., связанный с морем Балтийским проливом. Именно в юго-восточной части моря, у берегов Калининградской обл., разрабатываются самые крупные региональные месторождения углеводородов, и наблюдается их эмиссия в гидросферу и атмосферу, а также зафиксирована метановая аномалия (Ulyanova et al., 2012). Содержание этого парникового газа, эффект которого в 25 раз выше, чем у углекислого газа (CO₂), в осадках на дне Гданьской впадины превышает фоновые показатели практически в 10 раз (http://rosyanka.kantiana.ru). С 2021 г. в рамках научно-исследовательской работы «Временная изменчивость потоков углерода на карбоновом полигоне в Балтийском море» регулярно с апреля по ноябрь проводятся комплексные океанологические судовые съёмки. Опорная океанологическая станция, на которой выполняются наблюдения, имеет координаты: 54°43,20' с. ш., 19°34,8' в. д. (*puc. 1*).



Рис. 1. Схема расположения морской площадки карбонового полигона «Росянка» и мониторинговой станции в юго-восточной части Балтийского моря. Красной рамкой показана граница морской площадки, чёрной точкой — станция судового мониторинга; голубые линии — изобаты с шагом 10 м; чёрной звездой отмечен Балтийский пролив; серой линией показаны: сухопутная граница РФ — на суше, граница исключительной экономической зоны РФ — в море

В настоящей статье представлены результаты дистанционного (спутникового) мониторинга ключевых океанологических характеристик: концентрации хлорофилла *a*, концентрации взвешенного вещества и температуры поверхности моря (ТПМ) за первый год исследований на морской площадке КП в Балтийском море в период с апреля 2021 г. по сентябрь 2022 г., а также сравнение их с натурными данными, полученными в экспедициях.

Материалы и методы

Спутниковые данные

Концентрация хлорофилла *а* и взвешенного вещества рассчитана по данным сканера OLCI (*англ.* Ocean and Land Colour Instrument) на спутниках Sentinel-3A/В алгоритмом с применением нейронной сети (Brockmann et al., 2016), пространственное разрешение 300 м, уровень обработки 2, программное обеспечение SNAP 8.0. Спутниковые данные получены с сайта https://data.eumetsat.int. За период наблюдения с апреля 2021 г. по сентябрь 2022 г. было обработано 132 безоблачных, репрезентативных с точки зрения наличия данных снимка сканера OLCI. Для расчёта концентрации хлорофилла *а* и взвеси спутниковые данные осреднялись по площади КП в окне 3×3 пикселя, что соответствует акватории размером приблизительно 1×1 км в пределах КП.

Оптические изображения морской поверхности получены обработкой данных мультиспектрального сканера MSI (*анел*. Multispectral Instrument) со спутников Sentinel-2A/B (пространственное разрешение 10 м, уровни обработки 1 и 2, программное обеспечение SNAP 8.0), взятых с сайта https://scihub.copernicus.eu, а также по данным сканера OLCI со спутников Sentinel-3A/B (пространственное разрешение 300 м, уровень обработки 2, программное обеспечение SNAP 8.0). Всего обработано четыре цветосинтезированных изображения со сканера MSI/Sentinel-2A/B и одно изображение OLCI/Sentinel-3A.

Температура поверхности моря получена по данным инфракрасного диапазона радиометров MODIS (*англ*. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) на спутниках Aqua, Terra и VIIRS (*англ*. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) на спутнике Suomi NPP (*англ*. Suomi National Polar-orbiting Partnership), пространственное разрешение 1 км, уровень обработки 2, программное обеспечение SeaDAS 8.2. Спутниковые данные взяты с сайта https://oceancolor.gsfc.nasa.gov. За период наблюдения было обработано 275 безоблачных репрезентативных снимков сканеров MODIS и VIIRS. Спутниковые данные по ТПМ экспортировались для одного пикселя размером 1×1 км в пределах морской площадки КП без осреднения.

Экспедиционные данные

В период с апреля 2021 г. по сентябрь 2022 г. выполнено 12 комплексных судовых съёмок параметров мониторинга на станции в пределах морской площадки КП (см. *рис. 1*) на научно-исследовательских судах (НИС) Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН. Экспедиции проводились 30 июня и 14 июля 2021 г. (на пассажирском судне (ПС) «Академик Сергей Вавилов», рейс 51), 29 августа 2021 г., 2 и 30 октября 2021 г., 1 марта 2022 г. и 28 апреля 2022 г. (на НИС «Норд-3»), 1 июня 2022 г. (на ПС «Академик Борис Петров», рейс 49), 28 июня и 12 июля 2022 г. (на ПС «Академик Иоффе», рейс 61), 3 июля 2022 г. и 29 сентября 2022 г. (на НИС «Норд-3»).

Отбор проб воды выполнялся батометром Hydro-Bios системы Нискина (объём 5 л) из поверхностного и придонного, а также промежуточных горизонтов (2,5; 5; 7,5; 10; 15; 20; 25 м; над и под термоклинном, над галоклином и в 4-метровом над дном). Слои скачка определены по данным СТD-зондирований (*анел*. Conductivity, Temperature and Depth).

Концентрацию взвешенного вещества в воде определяли фильтрационным методом. Пробы воды пропускали через ядерные фильтры (диаметр 47 мм, размер пор 0,4 мкм) при давлении 0,4 бар. После фильтрации ядерные фильтры высушивались в чашках Петри при 50 °C.

Пробы воды для определения концентрации хлорофилла *а* фильтровали объёмом 0,3– 0,7 л через мембранные фильтры МФАС-МА-6 (диаметр пор 0,3 мкм) с последующим измерением оптической плотности ацетоновой вытяжки на четырёх длинах волн (750, 664, 647, 630 нм) на спектрофотометре LEKI SS 2109 UV (ГОСТ..., 1990).

Измерения температуры воды (датчик SST Pt 10, диапазон измерений –2...36 °C, точность 0,005 °C) и электропроводности (датчик SST/893, диапазон измерений 0–65 мС/см, точность 0,002 мС/см; с пересчётом на солёность) были выполнены с помощью гидрофизического зонда Sea and Sun CTD 90M.

Результаты и обсуждение

Годовой ход температуры поверхности моря

Изменчивость ТПМ на полигоне носит ярко выраженный сезонный характер (*puc. 2*). С января по март (гидрологическая зима в Южной Балтике по работе (Берникова и др., 2007)) наблюдаются самые низкие в году значения среднемесячной ТПМ: годовой минимум ТПМ приходится на февраль и составляет 3,2±1,6 °C. В апреле, с началом весеннего прогрева, TПМ варьирует от 3,8 до 7,8 °C при среднем значении $5,2\pm1,1$ °C за двухлетний период (межгодовые вариации выражены слабо). Далее в мае ТПМ возрастает в диапазоне 6,6–12,2 °С (среднее 9,3 \pm 1,8 °C), а в июне температура увеличивается почти в два раза (от 11,1 до 23,6 °C), при этом среднемесячная ТПМ в июне 2021 г. заметно превысила среднее значение в 2022 г. — на 3,2 °С. Годовой максимум, равный 23,1±0,6 °С, зафиксирован в июле 2021 г., что на 4,2 °C превышает значение в 2022 г.; вариации ТПМ в течение июля лежат в диапазоне 17,3–24,0 °С. В августе разница среднемесячных ТПМ между двумя прошедшими годами сокращается до 0,5 °C, ТПМ в этом месяце колеблется от 17,5 до 21,9 °C, при этом годовой максимум ТПМ в 2022 г. приходится на август. В сентябре отмечено начало сезонного охлаждения и относительно плавное снижение ТПМ в диапазоне от 14,6 до 19,4 °C при среднемесячной ТПМ 16,9±0,7 °C. В октябре и ноябре 2021 г. наблюдается значительное снижение температуры от 14,5 до 9,7 °С (средняя ТПМ 12,4±1,9 °С) и от 11,7 до 9,4 °С (средняя ТПМ 10,7 \pm 1,8 °C) соответственно. В декабре 2021 г. ТПМ падает до средней отметки 6,7 \pm 0,9 °C со слабыми вариациями в диапазоне 5,5–7,6 °С (см. *рис. 2, 3*, см. с. 238).

В период с 1 апреля 2021 г. по 30 сентября 2022 г. максимальные значения ТПМ зафиксированы в летний период (июнь, июль, август) — 23,6; 24 и 21,7 °С соответственно, а минимальные — с конца февраля до первой декады апреля (3,1–3,5 °С) (см. *рис. 3*).

Спутниковые значения ТПМ и контактные измерения температуры воды CTD-зондом в поверхностном горизонте полностью согласуются: достоверность аппроксимации $R^2 = 0,99$ и стандартная ошибка регрессии $S_{reg} = 0,1$ °C для 11 пар измерений (см. *рис. 3*).



Рис. 2. Распределение среднемесячных значений ТПМ на морской площадке КП по спутниковым данным радиометров MODIS, VIIRS в 2021 г. (синие столбцы) и в 2022 г. (зелёные столбцы). Треугольниками представлены минимальные и максимальные значения ТПМ в течение месяца. В процентах показана обеспеченность данными, 100 % — ежедневное покрытие морской площадки КП спутниковыми данными в течение месяца



Рис. 3. Временной ряд ТПМ на морской площадке КП с 1 апреля 2021 г. по 30 сентября 2022 г. по данным спутниковых радиометров MODIS, VIIRS. Красными треугольниками показана температура воды на поверхности по данным СТД-зонда

В целом 2021 г. в районе исследования оказался теплее 2022 г.: с апреля по сентябрь среднемесячная ТПМ в 2021 г. стабильно превышала значения 2022 г. на 0,5–4,2 °С (см. *рис. 2*). В 2021 г. температурный режим поверхности моря в пределах морской площадки КП с июня по сентябрь и с ноября по декабрь превышал среднемноголетние значения за 15-летний климатический полупериод с 2005 по 2019 г. на 1,0–4,0 °С (Стонт и др., 2020), в то время как средняя ТПМ мая и октября оставалась на уровне среднемноголетних значений. В 2022 г. наблюдается обратная картина: зимние месяцы (январь – март) демонстрируют повышенные значения средней ТПМ относительно среднемноголетних на 0,8–1,1 °С, при этом май оказался холоднее на 0,7 °С, а остальные месяцы были равны среднемноголетней ТПМ.

Годовой ход концентрации хлорофилла а и взвешенного вещества по спутниковым данным

Распределение концентрации хлорофилла *а* на морской площадке КП, так же как ТПМ, носит выраженный сезонный характер, демонстрируя три максимума: в апреле $(6,3\pm1,7 \text{ мг/m}^3 \text{ в } 2021 \text{ г. и } 4,7\pm1,1 \text{ мг/m}^3 \text{ в } 2022 \text{ г.})$, в июне/июле $(4,9\pm0,9 \text{ мг/m}^3 \text{ в июне } 2021 \text{ г. и } 4,0\pm0,6 \text{ мг/m}^3 \text{ в } 2022 \text{ г.})$ и в октябре $(4,8\pm1,6 \text{ мг/m}^3 \text{ в } 2021 \text{ г.})$ (*рис. 4a*, см. с. 239), что отражает периоды активной вегетации фитопланктона, характерные для центральной части Балтийского моря (Gasiunaite et al., 2005; Hallfors, Niemi, 1981; Kudryavtseva, Aleksandrov, 2019; Kudryavtseva et al., 2011, 2019; Wasmund, Uhlig, 2003).

В 2021 г. среднемесячная концентрация хлорофилла *а* была заметно выше значений 2022 г. почти во все месяцы, за исключением сентября, когда показатели оказались равны. Вариации максимальных и минимальных значений указывают на значительное превышение максимумов концентрации хлорофилла *а* в 2021 г. по сравнению с 2022 г., что и обусловило гораздо более высокие среднемесячные значения. Более высокая среднемесячная ТПМ в 2021 г. по сравнению с 2022 г., зафиксированная во все рассмотренные месяцы, вероятно, создала благоприятные условия для развития фитопланктона и в результате могла внести определённый вклад в повышение среднемесячной концентрации хлорофилла *а* в 2021 г. (см. *puc. 2, 4a*). В апреле концентрация хлорофилла *a* по спутниковым данным на морской площадке КП максимальна и варьирует в диапазоне от 2,0 до 9,5 мг/м³ в 2021 г. и от 2,4 до 5,1 мг/м³ в 2022 г. Также зафиксированы пиковые концентрации хлорофилла *a* в июле (7,7 мг/м³, 18.07.2021) и октябре 2021 г. (7,0 мг/м³, 01.10.2021, и 7,2 мг/м³, 16.10.2021) (*puc. 5a*, см. с. 240).

Пониженные значения среднемесячной концентрации хлорофилла a (от 3,2 до 3,5 мг/м³) отмечены в мае, августе и сентябре (см. *рис. 4a*). Минимальная концентрация хлорофил-

ла *а* зафиксирована весной: в начале апреля 2021 г. (2,0 мг/м³, 06.04.2021), в начале марта (1,7 мг/м³, 01.03.2022) и в мае 2022 г. (1,9 мг/м³, 02.05.2022), а также осенью: 2,0 мг/м³, 30.09.2022 (см. *рис. 5а*). С ноября по февраль, в течение периода исследования, данные отсутствуют из-за плотного облачного покрова над морской площадкой КП.



Рис. 4. Распределение среднемесячных значений концентрации хлорофилла *a* (*a*) и взвешенного вещества (*б*) на морской площадке КП по данным спутникового радиометра OLCI/Sentinel-3A/В в 2021 г. (синие столбцы) и в 2022 г. (зелёные столбцы). Треугольниками представлены минимальные и максимальные значения в течение месяца. В процентах показана обеспеченность данными, 100 % — ежедневное покрытие морской площадки КП спутниковыми данными в течение месяца

Сопоставление спутниковых значений и натурных данных по концентрации хлорофилла *а* в поверхностном горизонте 0 м и в слое 0–5 м (средняя относительная прозрачность воды в районе исследования) показывает следующее: спутниковые данные завышают концентрацию хлорофилла *a* (см. *рис. 5a*). Однако наблюдается гораздо более тесная связь между спутниковыми и судовыми данными в горизонте 0 м (достоверность аппроксимации составляет $R^2 = 0,59$, $S_{reg} = 0,9$), чем в среднем для слоя 0–5 м ($R^2 = 0,13$, $S_{reg} = 1,4$) для девяти пар измерений. Кроме того, разница в концентрации более чем в два раза между спутниковыми и натурными данными периодически обусловлена большим временным интервалом (иногда в 1–2 дня) между пролётом спутника и судовой съёмкой.

С апреля 2021 г. по сентябрь 2022 г. концентрация взвешенного вещества на морском участке КП демонстрирует значительную изменчивость и отчётливый сезонный характер (*puc. 46*, *56*) — отмечен годовой максимум в весенний период: в апреле 2021 г. (4,9±2,2 мг/л) и марте 2022 г. (4,3±2,3 мг/л). Далее среднемесячная концентрация взвеси в поверхностном слое в период с мая по октябрь не превышает 3,0 мг/л, за исключением 2021 г., когда отчётливо наблюдаются ещё два максимума: в июне (4,3±1,7 мг/л) и октябре (2,6±0,9 мг/л). Абсолютный максимум концентрации взвешенного вещества (8,2 мг/л) зафиксирован 22 марта 2022 г., минимум (0,6 мг/л) — 2 мая и 12 сентября 2022 г. (см. *puc. 56*).



Рис. 5. Временной ряд концентрации хлорофилла *a* (*a*) и взвешенного вещества (*б*) на морской площадке КП с апреля 2021 г. по сентябрь 2022 г. по данным спутникового радиометра OLCI/Sentinel-3A/B. Синие квадраты — натурные данные по концентрации хлорофилла *a* и взвеси на поверхности; красные треугольники — средняя концентрация хлорофилла *a* в слое 0–5 м

Распределение взвеси в юго-восточной части Балтийского моря зависит от нескольких факторов (иногда в совокупности): источников поступления взвешенного вещества, гидрометеорологических условий и антропогенной активности. Основные источники взвешенного вещества для исследуемой акватории: абразия берегового склона (до 1,8 млн т/год в береговой зоне Калининградской обл., согласно исследованию (Блажчишин, 1984)), речной сток (вынос рек Вислы (от 0,66 до 2,23 млн т/год, согласно работам (Емельянов, 1986; Лукашин и др., 2017; Andrulewicz, Witek, 2002)), Преголи и Калининградского зал. (0,32 млн т/год, по (Chubarenko, 2008)), а также развитие фитопланктона. Таким образом, наиболее высокая среднемесячная концентрация взвеси в апреле указывает на выраженное влияние весеннего половодья и повышенного речного стока, наблюдаемого в этот сезон (Лукашин и др., 2017). Кроме того, апрельский и октябрьские максимумы концентрации взвеси, вероятно, могут быть связаны с увеличением биологического компонента взвеси, так как именно в эти периоды, особенно в конце марта и апреле, в центральной части моря наблюдается интенсивное весеннее и осеннее развитие фитопланктона и повышенные концентрации хлорофилла *a* (Кудрявцева, 2017; Kudryavtseva, Aleksandrov, 2019; Kudryavtseva et al., 2019). Локальные максимумы концентрации хлорофилла *a* или взвеси могут быть связаны и с динамическими структурами — вихрями, меандрами прибрежного течения и струями, которые могут, например, случайным образом заносить в акваторию КП более мутные прибрежные воды, что не связано ни с половодьем, ни с другими описанными выше факторами. В дальнейшем исследовании такие факты необходимо проверять по спутниковым картам распределения концентрации хлорофилла *a* и взвешенного вещества.

Выявлено периодическое завышение спутниковых значений концентрации взвеси относительно данных судовых измерений для горизонта 0 м на 0,5–1,1 мг/л (для 5 пар измерений из 10), тем не менее найдена тесная взаимосвязь между спутниковыми и натурными значениями $R^2 = 0.84$, $S_{reg} = 0.3$ (см. *puc. 56*).



Рис. 6. Зависимость между концентрацией хлорофилла *а* и концентрацией взвешенного вещества по данными спутниковых (*a*) и натурных (*б*) наблюдений в 2021–2022 гг.

Сопоставление спутниковых значений концентрации хлорофилла *a* и взвеси показывает хорошую степенную зависимость: величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,47$ для 124 пар измерений (*puc. 6a*), в то время как связь между натурными наблюдениями этих параметров крайне слаба: $R^2 = 0,22$ для 10 пар измерений (*puc. 6b*). Это указывает на то, что алгоритм с применением нейронной сети обеспечивает более точный расчёт значений концентрации взвеси в районе морской площадки КП, чем для концентрации хлорофилла *a*, — вероятно, в связи с большим количеством взвешенного материала терригенного и органического происхождения, поступающего от различных источников. По-видимому, в дальнейшем для расчёта концентрации хлорофилла *a* необходима региональная коррекция этого алгоритма, в том числе с учётом опыта выполнения таких работ в юго-восточной части Балтийского моря (Буканова и др., 2011).

Воздействие речного выноса на распределение концентрации хлорофилла а и взвешенного вещества

Расположение морской площадки КП «Росянка» на траверзе выхода из Калининградского морского канала предполагает влияние на неё выноса из Калининградского зал., относящегося к лагунам «полуоткрытого» типа и в большой степени подверженного воздействию антропогенных факторов (поступление биогенных элементов со стоком р. Преголи, а также промышленных и бытовых сточных вод Калининграда), что оказывает прямое влияние на первичную продукцию и эвтрофирование вод. Калининградский зал. оценивается как эвтрофный водоём, приближающийся к гиперэфтрофному по среднемноголетним величинам первичной продукции (316–512 гС·м⁻²·год⁻¹) и содержанию хлорофилла *а* (32–52 мг/м³) (Александров, Горбунова, 2012).

Морская площадка КП также расположена в акватории Гданьского зал., где доминирующей речной системой является р. Висла — вторая по величине река всего региона Балтийского моря, годовой сток которой составляет 33 км³ (Лукашин и др., 2017). Весеннее половодье, вызванное таянием снега и льда, происходит в конце марта – апреле, а паводки, провоцируемые дождями, характерны для лета (Andrulewicz, Witek, 2002). Факелы выноса мутных распреснённых речных вод и вод Калининградского зал. распространяются по всему Гданьскому зал. под действием прибрежных струйных течений, испытывая существенное влияние циркуляционных процессов, что нередко фиксируется на спутниковых изображениях (Лаврова и др., 2014, 2016).

Для анализа непосредственного влияния речного стока на морскую площадку КП получены спутниковые цветосинтезированные изображения поверхности моря, а также концентрация хлорофилла *a*, иллюстрирующая пространственное распространение выноса мутных вод (*puc.* 7, см. с. 243). Во многих случаях именно в эти дни наблюдались пиковые или заметно повышенные значения концентраций хлорофилла *a* и взвеси (см. *puc.* 5).

28 апреля 2021 г. морская площадка КП находилась в зоне интенсивного влияния выноса р. Вислы. Распространение взвешенного вещества из устья р. Вислы наблюдалось в восточной части Гданьского зал., более чем в 100 км от источника. Концентрация хлорофилла *а* в области плюма речных вод достигала 15 мг/м³, концентрация взвеси — 6,4 мг/л, а ТПМ — 10 °С. КП оказался в центре дипольной структуры, сформированной грибовидным течением и имеющей диаметр около 30 км, что отчётливо фиксируется в поле ТПМ, концентрации хлорофилла *a*, а также на оптическом изображении моря (см. *puc. 7a*).

29 июня 2021 г. КП располагался в струйной части грибовидного течения, направленного с северо-востока на юго-запад и формирующего дипольную структуру в центре Гданьского зал. с диаметром около 20 км (см. *рис. 76*). Таким образом, морская площадка, находясь в области интенсивной гидродинамики и эпицентре вихреобразования, характеризуется максимальными значениями как температуры поверхности и моря ($24\pm0,2$ °C), так и концентрации хлорофилла *a* ($5,1\pm0,2$ мг/м³) и взвеси (8 мг/л).

Распространение вод Калининградского зал. в направлении полигона хорошо прослеживается на оптическом изображении от 14 июля 2021 г. (см. *рис. 7в*). Концентрация хлорофилла *а* на полигоне составляла $3,8 \text{ мг/м}^3$, взвеси — 1,9 мг/л под воздействием выноса высокопродуктивных вод через Балтийский пролив. Интенсивный вынос вод Калининградского зал., распространяющийся на 20–30 км от источника, наблюдался вплоть до 24 июля, в этот период концентрация хлорофилла *а* на морской площадке КП варьировала от 3,5 до 7,7 мг/м³, а взвеси — от 1,5 до 5,5 мг/л.

22 марта 2022 г. морская площадка КП вновь оказалась под влиянием выноса из Калининградского зал. и одновременно в зоне активности вихревой структуры (диполя): концентрация хлорофилла *а* достигала 5,6 мг/м³, взвеси — 8,2 мг/л (см. *рис. 7г*).

26 апреля 2022 г. отчётливо виден плюм, выходящий из Калининградского зал. и полностью охватывающий морскую площадку КП (см. *puc*. 7*d*): концентрация хлорофилла *a* достигала 3,6 мг/м³, взвеси — 3,2 мг/л, ТПМ — 7,1 °С. Кроме того, в акватории Гданьского зал. отчётливо виден обширно простирающийся сток р. Вислы, с высокой степенью вероятности достигающий границ КП.

Таким образом, морская площадка КП периодически находится под влиянием выноса насыщенных взвешенным органическим и неорганическим веществом вод из Калининградского зал. и р. Вислы, особенно весной в период паводка, а также в области интенсивной гидродинамики и вихреобразования, что проявляется в заметном повышении концентраций хлорофилла *a* и взвешенного вещества.





Рис. 7. Фрагменты цветосинтезированных изображений поверхности Балтийского моря в видимом диапазоне: по данным спутникового сканера OLCI/Sentinel-3A от 28 апреля 2021 г. (*a*), по данным сканера MSI-Sentinel-2 от 29 июня 2021 г. (*b*), 14 июля 2021 г. (*b*) и 22 марта 2022 г. (*c*); концентрация хлорофилла *a* по данным OLCI/Sentinel-3A от 26 апреля 2022 г. (*b*). Трапецией обозначена морская площадка КП «Росянка»

Заключение

Анализ спутниковых данных инфракрасного и видимого диапазонов позволил выявить особенности динамики температуры поверхности моря, концентрации хлорофилла *a* и взвешенного вещества на морском участке КП в 2021–2022 гг.: распределение концентрации хлорофилла *a* носит ярко выраженный сезонный характер и отражает периоды активной вегетации фитопланктона, характерные для центральной части Балтийского моря; концентрация взвеси имеет годовой максимум в период весеннего половодья и повышенные значения в фазы активного развития фитопланктона; температурный режим поверхности моря подвержен значительным межгодовым вариациям.

Морская площадка КП находится под влиянием речного стока — выносов Калининградского зал. и р. Вислы, особенно чётко проявляющегося в период весеннего половодья, а также в области интенсивной гидродинамики и вихреобразования, характеризующейся повышенными концентрациями хлорофилла *а* и взвешенного вещества: зафиксированы многочисленные динамические структуры — вихри, диполи и речные плюмы с линейными размерами от 20 до 100 км.

Сопоставление спутниковых данных и натурных наблюдений показало очень высокую степень соответствия для ТПМ и температуры моря *in situ* для горизонта 0 м по данным CTD-зонда ($R^2 = 0.99$), тесную взаимосвязь между спутниковыми данными и измерениями *in situ* концентрации взвешенного вещества ($R^2 = 0.84$), а для концентрации хлорофилла a более слабую связь с судовыми данными ($R^2 = 0.59$). По-видимому, понадобится региональная коррекция алгоритма с применением нейронной сети, используемого для данных радиометра OLCI/Sentinel-3A/B, поскольку выявлено систематическое завышение спутниковых значений концентрации хлорофилла a.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FZWM-2021-0015.

Литература

- 1. Александров С. В., Горбунова Ю.А. Продукция фитопланктона и содержание хлорофилла в эстуариях различного типа // Вестн. Балтийского федерального ун-та им. И. Канта. 2012. № 1. С. 90–98.
- 2. *Берникова Т.А., Дубравин В.Ф., Нагорнова Н.Н., Стонт Ж.И.* Климатические сезоны Южной Балтики // 5-я Международ. науч. конф. «Инновации в науке и образовании 2007»: сб. тр. Калининград: Изд-во КГТУ, 2007. Ч. 1. С. 53–55.
- 3. *Блажчишин А. И*. Баланс осадочного материала в Гданьском бассейне Балтийского моря // Литология и полезные ископаемые. 1984. № 5. С. 67–76.
- 4. Буканова Т. В., Вазюля С. В., Копелевич О. В., Буренков В. И., Григорьев А. В., Храпко А. Н., Шеберстов С. В., Александров С. В. Региональные алгоритмы оценки концентрации хлорофилла и взвеси в юго-восточной Балтике по данным спутниковых сканеров цвета // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 64–73.
- 5. ГОСТ 17.1.04.02-90. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *а*. М.: Изд-во стандартов, 1990. 15 с.
- 6. *Емельянов Е. М.* Геохимия взвеси и осадков в Гданьском бассейне и процессы седиментации // Геохимия осадочного процесса в Балтийском море. М.: Наука, 1986. С. 57–114.
- 7. *Кудрявцева Е.А.* Первичная продукция фитопланктона // Система Балтийского моря. М.: Науч. мир, 2017. С. 214–241.
- 8. 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.
- 9. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 335 с.
- 10. Лукашин В. Н., Кречик В. А., Клювиткин А. А., Стародымова Д. П., Конченкова А. И. Речной сток и маргинальные фильтры рек // Система Балтийского моря. М.: Науч. мир, 2017. С. 189–214.

- 11. 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. 2020. № 1. С. 81–94.
- Andrulewicz E., Witek Z. Anthropogenic Pressure and Environmental Effects on the Gulf of Gdansk: Recent Management Efforts // Baltic Coastal Ecosystems. Central and Eastern European Development Studies. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. P. 119–139. DOI: 10.1007/978-3-662-04769-9_9.
- Brockmann C., Doerffer R., Peters M., Stelzer K., Embacher S., Ruescas A. Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters // Living Planet Symp.: Proc. Conf. 9–13 May 2016, Prague, Czech Republic / ed. L. Ouwehand. European Space Agency (Special Publication). ESA SP. 2016. V. SP-740. 6 p.
- 14. *Chubarenko B*. The Vistula Lagoon // Transboundary Waters and Basins in the South-East Baltic. Kaliningrad: Terra Baltica, 2008. P. 37–57.
- Gasiunaite Z. R., Cardoso A. C., Heiskanen A. S., Henriksen P., Kauppila P., Olenina I., Pilkaityte R., Purina I., Razinkovas A., Sagert S., Schubert H., Wasmund N. Seasonality of coastal phytoplankton in the Baltic Sea: influence of salinity and eutrophication // Estuarine Coastal and Shelf Science. 2005. V. 65. P. 239–252. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.05.018.
- 16. *Hallfors G.A., Niemi A.* Biological oceanography // The Baltic Sea. Elsevier Oceanogr. Ser. / ed. A Voipio. Amsterdam: Elsevier, 1981. V. 30. P. 219–238.
- 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. V. 59. No. 1. P. 49–65. DOI: 10.1134/S0001437019010077.
- 18. *Kudryavtseva E.A.*, *Pimenov N.V.*, *Aleksandrov S.V.*, *Kudryavtsev V.M.* Primary Production and Chlorophyll Content in the Southeastern Baltic Sea in 2003–2007 // Oceanology. 2011. V. 51(1). P. 27–35. DOI: 10.1134/S0001437011010103.
- Kudryavtseva E., Aleksandrov S., Bukanova T., Dmitrieva O., Rusanov I. Relationship between seasonal variations of primary production, abiotic factors and phytoplankton composition in the coastal zone of the south-eastern part of the Baltic Sea // Regional Studies in Marine Science. 2019. V. 32. Art. No. 100862. 15 p. https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100862.
- 20. Ulyanova M., Sivkov V., Kanapatskij T., Sigalevich P., Pimenov N. Methane fluxes in the southeastern Baltic Sea // Geo-Marine Letters. 2012. V. 5(32). P. 535–544. https://doi.org/10.1007/s00367-012-0304-0.
- Wasmund N., Uhlig S. Phytoplankton trends in the Baltic Sea // ICES J. Marine Science. 2003. V. 60. Iss. 2. P. 177–186. https://doi.org/10.1016/S1054-3139(02)00280-1.

Remote monitoring of the offshore site of the Rosyanka carbon polygon (the Baltic Sea): First results

T. V. Bukanova^{1,2}, E. S. Bubnova^{1,2}, S. V. Aleksandrov¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia E-mails: tatiana.bukanova@gmail.com, bubnova.kat@gmail.com, hydrobio@mail.ru ² Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad 236041, Russia

The offshore site of the Rosyanka carbon polygon (CP) in the southeastern part of the Baltic Sea was deployed in 2021 as part of a pilot project of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the construction and development of a network of carbon polygons. The marine site is located in the Russian sector of economy zone, where the depth varies from 64 to 87 m, and is influenced by the outflow of the Vistula River, the largest in the region, as well as in close proximity to the runoff from the Kaliningrad Lagoon and the Pregolya River. The article presents the results of satellite monitoring of the main marine characteristics (chlorophyll *a* concentration, suspended matter concentration and the sea surface temperature) at the CP offshore marine site in the Baltic Sea in the period from April 2021 to September 2022. To study the variability of the sea surface temperature we analyzed the data obtained from satellite scanners MODIS/Aqua, Terra (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) and VIIRS/SNPP (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite/Suomi National Polar-orbiting Partnership); to estimate the concentration of chlorophyll *a* and suspended

matter we used the data from the multispectral radiometer OLCI/Sentinel-3A/B (Ocean and Land Colour Instrument) (algorithm using a neural network). In addition, high-resolution optical satellite data of MSI/Sentinel-2 (Multispectral Instrument) sensor were used, as well as in situ data: CTD (Conductivity, Temperature and Depth) profiles, the concentration of total suspended matter, determined by the weight method, and the concentration of chlorophyll a obtained by the spectrophotometric method. The annual cycle and the seasonal dynamics features of the sea surface temperature, the concentration of chlorophyll *a* and suspended matter at the offshore site of the CP are shown. The temperature regime of the sea surface in the study area is subjected to seasonal change and significant interannual variations. The distribution of chlorophyll a concentration has a noticeable seasonal character and reflects the periods of active phytoplankton vegetation, which are typical for the central part of the Baltic Sea, the total suspended matter concentration is maximum during the spring flood. Comparison of satellite data and *in situ* measurements showed a complete agreement between ship data and satellite observations for sea surface temperature, a close relationship for the total suspended matter concentration, and notably weaker relationship for the chlorophyll a concentration. Based on satellite data, the influence of runoff from the Kaliningrad Lagoon and the Vistula River on the marine site of the CP was identified and described. It was shown that the marine site is located in the area of the intense hydrodynamics and eddy formation, characterized by maximum concentrations of chlorophyll *a* and suspended matter are shown.

Keywords: carbon polygon, sea surface temperature, chlorophyll *a* concentration, suspended matter concentration, *in situ* measurements, satellite data, Baltic Sea

Accepted: 02.12.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-234-247

References

- 1. Aleksandrov S.V., Gorbunova Yu.A., Phytoplankton production and chlorophyll content in estuaries of various types, *Vestnik of Immanuel Kant Russian State University*, 2012, Issue 1, pp. 90–98 (in Russian).
- Bernikova T. A., Dubravin V. F., Nagornova N. N., Stont Zh. I., Climatic seasons of the Southern Baltic, 5-ya Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya "Innovatsii v nauke i obrazovanii – 2007 (5th Intern. Scientific Conf. "Innovation in Science and Education – 2007), Proc. Conf., Kaliningrad: KGTU, 2017, Vol. 1, pp. 53–55 (in Russian).
- 3. Blazhchishin A. I., Sedimentary material balance in the Gdansk basin of the Baltic Sea, *Litologiya i poleznye iskopaemye*, 1984, No. 5, pp. 67–76 (in Russian).
- 4. Bukanova T. V., Vazyulya S. V., Kopelevich O. V., Burenkov V. I., Grigor'ev A. V., Khrapko A. N., Sheberstov S. V., Aleksandrov S. V., Regional algorithms for analysis of chlorophyll a and suspended matter concentration in the south-eastern Baltic Sea using the satellite ocean color scanner, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 64–73 (in Russian).
- GOST 17.1.04.02-90. Voda. Metodika spektrofotometricheskogo opredeleniya khlorofilla a (GOST 17.1.04.02-90. Water. Spectrophotometric determination of chlorophyll a), Moscow: Standartinform, 1990, 15 p. (in Russian).
- 6. Emelyanov E. M., Geochemistry of suspended matter and sediments in the Gdansk basin and sedimentation processes, In: *Geokhimiya osadochnogo protsessa v Baltiiskom more* (Geochemistry of the sedimentary process in the Baltic Sea), Moscow: Nauka, 1986, pp. 57–114 (in Russian).
- 7. Kudryavtseva E.A., Primary production of phytoplankton, In: *Sistema Baltiiskogo morya* (System of the Baltic Sea), Moscow: Nauchnyi mir, 2017, pp. 214–241 (in Russian).
- Lavrova O. Yu., Krayushkin E. V., Soloviev D. M., Golenko M. N., Golenko N. N., Kalashnikova N. A., Demidov A. N., Influence of wind and hydrodynamic processes on propagation of the Vistula Lagoon waters into the Baltic Sea, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4. pp. 76–99 (in Russian).
- 9. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostyanoi A. G., *Sputnikovye metody vyyavleniya i monitoringa zon ekologicheskogo riska morskikh akvatorii* (Satellite Methods for Detecting and Monitoring Marine Zones of Ecological Risk), Moscow: IKI RAN, 2016, 335 p. (in Russian).
- Lukashin V. N., Krechik V. A., Klyuvitkin A. A., Starodymova D. P., Konchenkova A. I., River runoff and marginal filters of rivers, In: *Sistema Baltiiskogo morya* (System of the Baltic Sea), Moscow: Nauchnyi mir, 2017, pp. 189–214.
- 11. Stont Zh. I., Bukanova T. V., Krek E. V., Variability of climatic characteristics of the coastal part of the south-eastern Baltic at the beginning of the XXI century, *Vestnik of Immanuel Kant Russian State University*, 2020, Issue 1, pp. 81–94 (in Russian).

- 12. Andrulewicz E., Witek Z., Anthropogenic Pressure and Environmental Effects on the Gulf of Gdansk: Recent Management Efforts, In: *Baltic Coastal Ecosystems, Central and Eastern European Development Studies*, Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2002, pp. 119–139, DOI: 10.1007/978-3-662-04769-9_9.
- Brockmann C., Doerffer R., Peters M., Stelzer K., Embacher S., Ruescas A., Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters, *Living Planet Symp.: Proc. Conf*, 9–13 May 2016, Prague, Czech Republic, L. Ouwehand (ed.), European Space Agency (Special Publication), ESA SP, 2016, Vol. SP-740, 6 p.
- 14. Chubarenko B., The Vistula Lagoon, In: *Transboundary Waters and Basins in the South-East Baltic*, Kaliningrad: Terra Baltica, 2008, pp. 37–57.
- Gasiunaite Z. R., Cardoso A. C., Heiskanen A. S., Henriksen P., Kauppila P., Olenina I., Pilkaityte R., Purina I., Razinkovas A., Sagert S., Schubert H., Wasmund N., Seasonality of coastal phytoplankton in the Baltic Sea: influence of salinity and eutrophication, *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2005, No. 65, pp. 239–252, doi.org/10.1016/j.ecss.2005.05.018.
- 16. Hallfors G.A., Niemi A., Biological oceanography, In: *The Baltic Sea*, *Elsevier Oceanography Ser*., Amsterdam: Elsevier, 1981, No. 30, pp. 219–238
- 17. 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(1), pp. 49–65, DOI: 10.1134/S0001437019010077.
- Kudryavtseva E. A., Pimenov N. V., Aleksandrov S. V., Kudryavtsev V. M., Primary Production and Chlorophyll Content in the Southeastern Baltic Sea in 2003–2007, *Oceanology*, 2011, Vol. 51(1), pp. 27–35, DOI: 10.1134/S0001437011010103.
- 19. Kudryavtseva E., Aleksandrov S., Bukanova T., Dmitrieva O., Rusanov I., Relationship between seasonal variations of primary production, abiotic factors and phytoplankton composition in the coastal zone of the south-eastern part of the Baltic Sea, *Regional Studies in Marine Science*, 2019, Vol. 32, Art. No. 100862, 15 p., https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100862.
- Ulyanova M., Sivkov V., Kanapatskij T., Sigalevich P., Pimenov N., Methane fluxes in the southeastern Baltic Sea, *Geo-Marine Letters*, 2012, Vol. 5(32), pp. 535–544, https://doi.org/10.1007/s00367-012-0304-0.
- 21. Wasmund N., Uhlig S., Phytoplankton trends in the Baltic Sea, *ICES J. Marine Science*, 2003, No. 60, pp. 177–186, https://doi.org/10.1016/S1054-3139(02)00280-1.