

Научная статья

УДК 551.465
EDN: QJKYN

Влияние апвеллинга на распределение хлорофилла *a* в прибрежной зоне Юго-Восточной Балтики в летний период 2000–2019 годов

М. В. Капустина^{1, ✉}, А. В. Зимин^{1, 2}

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

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
✉ kapustina.mariya@ya.ru

Поступила в редакцию 10.04.2023; одобрена после рецензирования 12.01.2024;
принята к публикации 18.01.2024.

Аннотация

Цель. Получение количественных оценок влияния апвеллинга на распределение хлорофилла *a* летом в прибрежной зоне Юго-Восточной Балтики в 2000–2019 гг. – цель настоящей работы.

Методы и результаты. По данным о повторяемости и продолжительности апвеллингов за июнь – август 2000–2019 гг. и мультисенсорных спутниковых наблюдений концентрации хлорофилла *a* в прибрежной зоне Юго-Восточной Балтики получены среднемноголетние и среднемесячные значения исследуемых параметров и оценено влияние событий подъема вод на концентрацию хлорофилла *a* в поверхностном слое моря. Показано влияние апвеллингов на пространственное распределение хлорофилла *a* в прибрежной зоне моря. Установлено, что снижение его концентрации более чем на 1 мг/м³ наблюдается после подъема вод любой продолжительности и во все месяцы. Максимальные падения концентрации хлорофилла *a* отмечены после длительных апвеллингов продолжительностью > 6 дней.

Выводы. В течение недели после апвеллинга летом в прибрежной зоне Юго-Восточной Балтики наблюдаются пониженные концентрации хлорофилла *a* по сравнению со значениями, предшествующими возникновению апвеллинга.

Ключевые слова: температура поверхности моря, прибрежный апвеллинг, концентрация хлорофилла *a*, спутниковые данные, Юго-Восточная Балтика

Благодарности: работа выполнена в рамках госзадания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0025).

Для цитирования: Капустина М. В., Зимин А. В. Влияние апвеллинга на распределение хлорофилла *a* в прибрежной зоне Юго-Восточной Балтики в летний период 2000–2019 годов // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 2. С. 255–270. EDN QJKYN.

Influence of Coastal Upwelling on Chlorophyll *a* Distribution in the Coastal Zone of the Southeastern Baltic Sea in Summer Periods, 2000–2019

M. V. Kapustina^{1, ✉}, A. V. Zimin^{1, 2}

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

² Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

✉ kapustina.mariya@ya.ru

Abstract

Purpose. The study is purposed at obtaining the quantitative estimates of coastal upwelling influence on the distribution of chlorophyll *a* in the coastal zone of the southeastern Baltic Sea during the summer seasons in 2000–2019.

Methods and Results. Based on the data both on frequency and duration of upwelling events for June – August 2000–2019 and the chlorophyll *a* concentrations derived from multi-sensor satellite observations in the coastal zone of the southeastern Baltic Sea, the long-term and monthly average values of the studied parameters are obtained, and the influence of upwelling events on the chlorophyll *a* concentration in the sea surface layer is assessed. The spatial variability of chlorophyll *a* in the coastal areas is found to be related to the influence of upwelling events. On the average, the chlorophyll *a* concentration decreases by more than 1 mg/m³ after an upwelling of any duration and in all summer months. The concentration drop is most significant after the upwelling events lasting more than 6 days.

Conclusions. The reduced chlorophyll *a* concentrations (as compared to the pre-upwelling values) are observed in course of a week after a coastal upwelling event in the southeastern Baltic Sea.

Keywords: sea surface temperature, coastal upwelling, chlorophyll *a* concentration, remote sensing data, southeastern Baltic Sea

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of state assignment of IO RAS (theme No. FMWE-2024-0025).

For citation: Kapustina, M.V. and Zimin, A.V., 2024. Influence of Coastal Upwelling on Chlorophyll *a* Distribution in the Coastal Zone of the Southeastern Baltic Sea in Summer Periods, 2000–2019. *Physical Oceanography*, 31(2), pp. 231-245.

Введение

Апвеллинг – нередкое явление, которое по средним многолетним оценкам прослеживается в течение ~ 10% дней в теплый период года в мелководных районах акватории Юго-Восточной Балтики (ЮВБ) [1–3]. В среднем на акватории за летний сезон 2000–2019 гг. наблюдается четыре апвеллинга суммарной продолжительностью > 20 дней при средней площади зоны апвеллинга ~ 620 км². Соответственно, апвеллинг несомненно является важным механизмом транспорта биогенных элементов в поверхностный слой [4, 5], что оказывает влияние на биопродуктивность прибрежных районов ЮВБ, одним из индикаторов которой является концентрация основного пигмента фитопланктона – хлорофилла *a*. Отметим, что его изменчивость может быть изучена

в широком диапазоне пространственных и временных масштабов с использованием данных спутниковых наблюдений.

Прибрежный апвеллинг в летний период в первые несколько дней своего развития сгоняет поверхностные воды от берега, вследствие чего в прибрежной зоне наблюдается уменьшение содержания фитопланктона и его основной характеристики – концентрации хлорофилла a [6, 7]. Со стабилизацией процесса апвеллинга в течение нескольких дней наблюдается рост первичной продукции, связанный с развитием фитопланктонных сообществ, вызванным поднятием в эвфотическую зону биогенных веществ и повышением температуры [8–13]. Далее отмечается снижение первичной продукции, связанное с быстрым, в течение одной-двух недель, потреблением поднятых к поверхности биогенных веществ [14]. При этом в Балтийском море в результате апвеллинга может изменяться соотношение азот : фосфор, что может влиять на состав фитопланктонных сообществ [8, 15]. Иногда апвеллинг может приводить к понижению продуктивности района, например в случае, если поднятые воды замещают воду, поступающую со стоком рек или заливов [4, 6], или при устойчивом и частом его появлении в одном и том же районе [16, 17].

На концентрацию хлорофилла a в ходе апвеллинга влияют также биотические факторы и сезонный ход вертикальной структуры вод, связанный с изменением градиента и положения термоклина и нуриклина [4, 18]. Так, в ЮВБ в июне, после весеннего «цветения» воды при массовом развитии водорослей в результате обеднения поверхностных вод биогенными элементами, наступает стадия летнего минимума биомассы фитопланктона. В июле температура поверхности моря (ТПМ) становится выше, формируется ярко выраженный приповерхностный термоклон (что провоцирует массовое развитие азотфиксирующих цианобактерий) и концентрация хлорофилла a достигает пиковых значений; в августе в прибрежной зоне она снижается [19].

Необходимо отметить, что наибольшие концентрации хлорофилла a , по данным спутниковых радиометров, в исследуемом регионе наблюдаются в прибрежной зоне от м. Таран до побережья Куршской косы, где они достигают эвтрофного уровня ($> 4 \text{ мг/м}^3$) [19], что частично пересекается с областями максимальной многолетней повторяемости апвеллингов в районе плато Рыбачий и около м. Таран [2]. При этом работы, посвященные вопросу оценки влияния апвеллингов на изменчивость концентрации фитопланктона в ЮВБ, основаны преимущественно на весьма редких по пространству контактных наблюдениях [14] или на рассмотрении отдельных случаев, иллюстрирующих возможности спутниковых методов исследования [20], хотя эти сведения, обобщенные за многолетний период, важны для решения практических задач в области рекреации и оценки изменения экологического состояния прибрежной зоны.

Использование данных дистанционного зондирования позволяет проводить широкомасштабные наблюдения за распределением и изменчивостью концентрации хлорофилла a [21], в том числе под влиянием апвеллинга [6, 22, 23]. Основные преимущества последних – мгновенная съемка обширных акваторий и высокое пространственное разрешение. Тем не менее следует иметь

в виду, что среднегодовая облачность Балтийского моря составляет > 58% [24]. В присутствии облаков спутниковые данные в оптическом диапазоне, даже получаемые на регулярной основе, весьма фрагментарны. В таких условиях целесообразен мониторинг концентрации хлорофилла *a* не по всему району, а на отдельных профилях аналогично тому, как это было сделано в работах [23, 25].

Текущее исследование нацелено на получение оценок влияния прибрежного апвеллинга на распределение хлорофилла *a* в прибрежной зоне Юго-Восточной Балтики за прошедшие две декады XXI в.

Материалы и методы

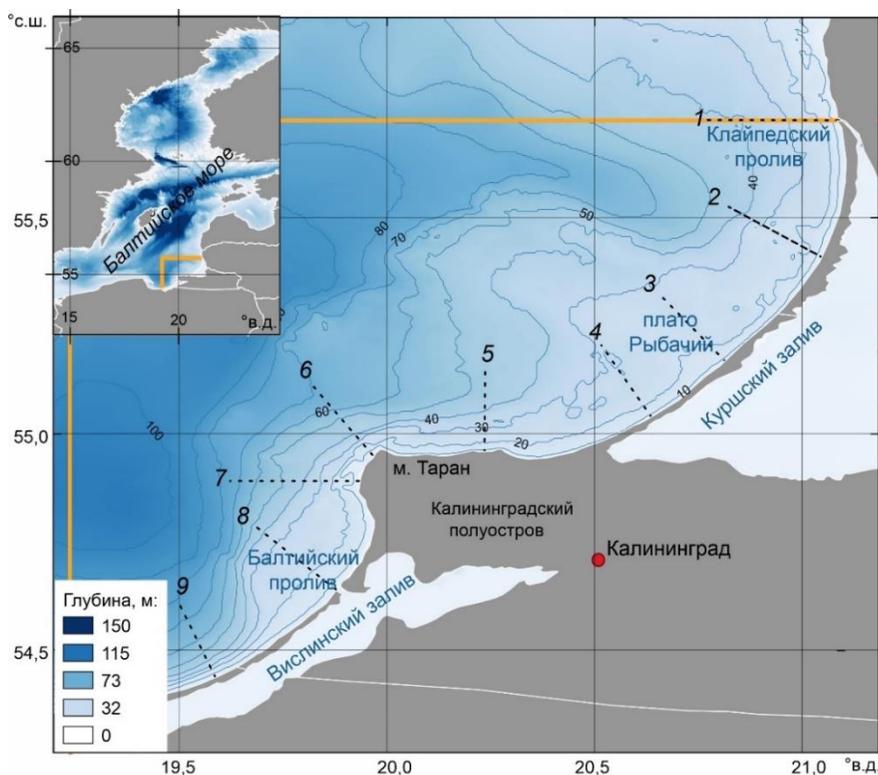
Исходными данными для анализа взаимосвязи апвеллингов и хлорофилла *a* в ЮВБ стали даты и районы апвеллингов за июнь – август 2000–2019 гг. в прибрежной зоне ЮВБ из [26] и ежесуточные данные мультисенсорных спутниковых наблюдений (объединенные данные сенсоров *MERIS/ENVISAT*, *MODIS/AQUA*, *SeaWiFS/SEASTAR* и *VIIRS/SUOMI-NPP*) концентрации хлорофилла *a* (мг/м³) на регулярной сетке с размером ячейки 1 × 1 км в поверхностном слое Балтийского моря¹.

Анализ пространственной и внутрисезонной изменчивости повторяемости апвеллингов и хлорофилла *a* в ЮВБ. Для описания внутрисезонной пространственной изменчивости повторяемости апвеллингов, ТПМ и хлорофилла *a* в ЮВБ были построены осредненные карты этих параметров за 2000–2019 гг. помесячно и за летний сезон для акватории, показанной на рис. 1. Концентрации хлорофилла *a* рассчитывались помесячно и за летний сезон в тех ячейках, в которых наблюдалось > 25% значений за рассматриваемый период. Повторяемость апвеллинга оценивалась как количество дней с наблюдаемой отрицательной температурной аномалией, полученных в заданной ячейке по методике из работы [2] за месяц или за сезон.

Влияние апвеллингов на концентрацию хлорофилла *a* в Юго-Восточной Балтике. Для каждого выделенного подъема глубинных вод с использованием программного обеспечения *Quantum GIS* были построены профили изменчивости хлорофилла *a* длиной ~ 20 км, что примерно соответствовало прибрежным изобатам от 0 до 30–75 м. Всего вдоль побережья построены 9 профилей, расположенных по нормали к берегу с интервалом (в зависимости от конфигурации берега) 7–30 км между ними (рис. 1). Выбор положения профилей был проведен с учетом районов с наибольшей повторяемостью апвеллингов из [2, 26]. Значения хлорофилла *a* на профилях были получены из ежедневных карт данных мультисенсорных спутниковых наблюдений. Для каждого события апвеллинга отбирался для анализа один из профилей, наиболее бес-

¹ Baltic Sea Reprocessed Surface Chlorophyll Concentration from Multi Satellite observations. 2012. <https://doi.org/10.48670/moi-00083>

печенный данными по хлорофиллу *a* в течение рассматриваемого периода, путем наложения на единую географическую основу обоих исследуемых параметров.



Р и с. 1. Район исследования (в желтой рамке), изобаты через каждые 10 м (синие кривые) ² и профили, использованные при анализе изменчивости хлорофилла *a* на поверхности моря (черные штриховые линии)

Fig. 1. Study area (yellow box), isobaths in each 10 m (blue curves) ², and profiles used in the analysis of chlorophyll *a* variability on the sea surface (dashed black lines)

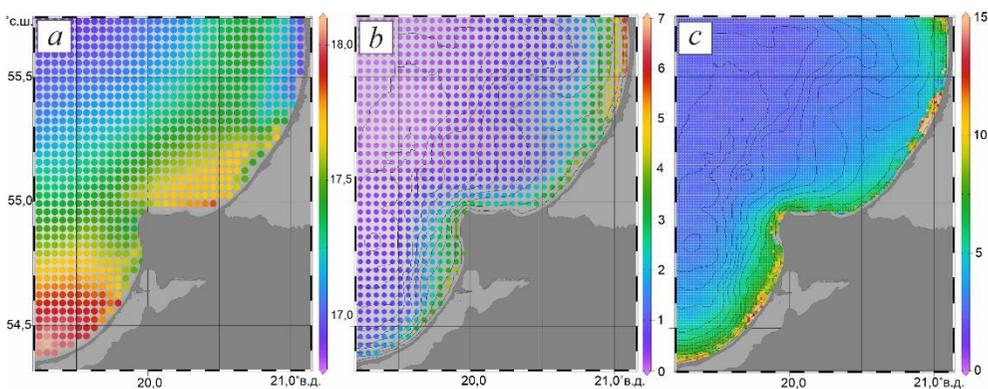
На выбранном профиле отмечались зоны апвеллинга из [2, 26], что позволило рассчитать значения концентрации хлорофилла *a* ($\text{мг}/\text{м}^3$) в этой зоне и вне ее. Дополнительно были выполнены оценки средних значений указанной характеристики по всему профилю до, во время и после апвеллинга. Для получения удовлетворительной обеспеченности данными по хлорофиллу *a* до и после апвеллинга в анализ включались данные, входящие во временной интервал до 7 дней, за исключением случаев выхода событий за рассматриваемый летний сезон или отсутствия данных. Всего был исследован 31 период с апвеллингом общей продолжительностью 590 дней (для случаев продолжительностью 1–42 дня). Оценивались влияние продолжительности апвеллингов на изменение

² The GEBCO_2022 Grid – a continuous terrain model of the global oceans and land / GEBCO Bathymetry Compilation Group 2022. NERC EDS British Oceanographic Data Centre NOC, 2022. <https://doi.org/10.5285/e0f0bb80-ab44-2739-e053-6c86abc0289c>

концентрации хлорофилла *a*, а также их вклад в ее внутрисезонный ход и многолетнюю изменчивость.

Результаты

Анализ внутрисезонной изменчивости повторяемости апвеллингов и хлорофилла *a* в ЮВБ. На карте ТПМ районы северного побережья Куршской косы и западного побережья Калининградского п-ова четко выделяются по более низким температурам (ниже на 0,5–1°C), чем в целом в прибрежной зоне (рис. 2). В зависимости от частоты апвеллингов в летний период в прибрежной акватории выделяются несколько районов: северное побережье Калининградского п-ова и западная часть Вислинской косы, где апвеллинг наблюдается до трех дней в месяц; район у м. Таран и южная часть Куршской косы, где апвеллинг наблюдается 3–4 дня в месяц; западное побережье Калининградского п-ова и северная часть Куршской косы, где апвеллинг наблюдается более четырех дней в месяц.



Р и с. 2. Средние за летний сезон 2000–2019 гг.: значения ТПМ (°С) – *a*, повторяемость апвеллингов (средне многолетнее количество дней с отрицательной температурной аномалией за месяц или за сезон в заданной ячейке) – *b* и концентрация хлорофилла *a* (до 15 мг/м³) – *c*

F i g. 2. Summer season mean values of SST (°C) – *a*, upwelling repeatability (multi-year average number of the days with negative temperature anomaly per month or season in a given cell) – *b*, and Chl *a* concentration (up to 15 mg/m³) – *c* in 2000–2019

Средняя концентрация хлорофилла *a* в прибрежной зоне в пределах 30-метровой изобаты за лето 2000–2019 гг. составила $5,3 \pm 2,7$ мг/м³, что в целом сопоставимо со средними многолетними значениями концентрации в поверхностном слое Балтийского моря, полученными как по спутниковым данным, так и по данным *in situ*^{3 4} [23, 27–30]. Однако они имеют большую дисперсию по сравнению с оценками, полученными по данным контактных наблюдений [31], где концентрация в слое 0–10 м летом 2003–2007 гг. составляла $\sim 4,3 \pm 1,6$ мг/м³.

³ Trophic status of coastal and open areas of the south-eastern Baltic Sea based on nutrient and phytoplankton data from 1993–1997 / N. Wasmund [et al.]. Warnemünde : Institut für Ostseeforschung, 2000. 83 p. (Meereswissenschaftliche Berichte ; vol. 38). <https://doi.org/10.12754/msr-2000-0038>

⁴ Bukanova T., Nizhnikovskaya O., Trushevskiy A. Assessment of eutrophication in the Baltic Sea coastal waters from satellite imagery // 2nd Student Workshop on Ecology and Optics of Coastal Zones, 2016. Kaliningrad, Russia, 2016. P. 1–4.

В целом же концентрация хлорофилла *a* в Балтийском море изменяется в широком диапазоне 0,3–130 мг/м³ [32]. В районе исследования отмечаются локальные повышения концентрации, связанные со стоком Вислы, Калининградского и Куршского заливов. На акватории четко выделяется район с глубинами < 30 м, где отмечаются повышенные повторяемость апвеллингов (не менее трех дней в месяц) и концентрация хлорофилла *a* (> 5 мг/м³).

Для оценки влияния внутрисезонной изменчивости апвеллингов на концентрацию хлорофилла *a* были построены карты среднемесячных значений этих параметров по данным 2000–2019 гг., дополненные картами ТПМ (рис. 3).

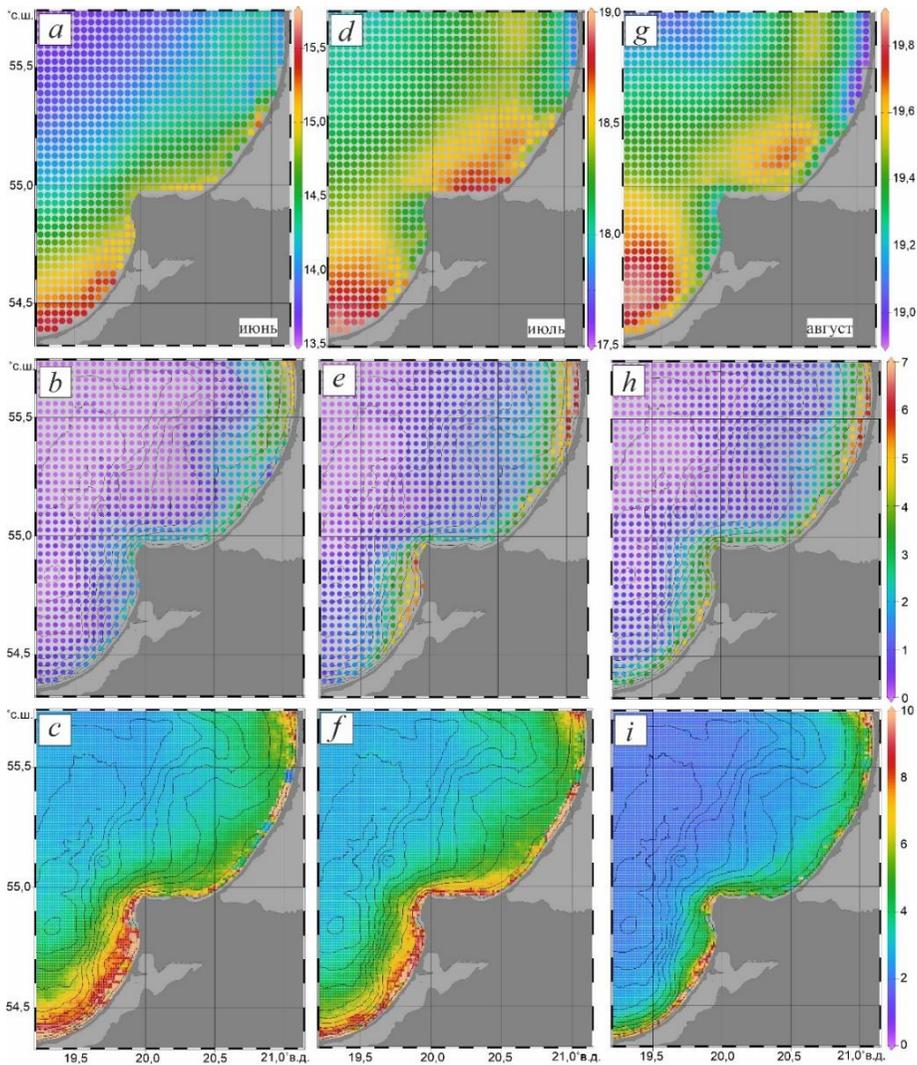


Рис. 3. Внутрисезонная изменчивость: ТПМ (°C) в июне (a), июле (d) и августе (g); повторяемость апвеллингов (среднегодовое количество дней с отрицательной температурной аномалией за месяц или за сезон в заданной ячейке) в июне (b), июле (e) и августе (h); концентрации хлорофилла *a* (мг/м³) в июне (c), июле (f) и августе (i) 2000–2019 гг.

Fig. 3. Intra-seasonal variability of SST (°C) in June (a), July (d) and August (g); upwelling repeatability (multi-year average number of the days with negative temperature anomaly per month or season in a given cell) in June (b), July (e) and August (h); Chl *a* concentration (mg/m³) in June (c), July (f) and August (i) in 2000–2019

В прибрежной зоне в июне ТПМ изменялась в пределах от 13,5°C в открытой части моря до 15,5°C в районе западной части Вислинской косы; вдоль северного побережья области температура составляла ~ 15°C. К северу от плато Рыбачий наблюдалось локальное повышение температуры (до 15,3°C), в северной части Куршской косы температура составляла ~ 14,1°C, что соответствовало максимальной повторяемости отрицательных аномалий температуры в этой части прибрежной зоны (рис. 3, *a*). Наибольшей площади в июне апвеллинг достигал в районе плато Рыбачий, что связано с особенностями топографии дна – в этой части акватории наблюдается обширное мелководное плато. Средняя площадь апвеллинга в июне у западного побережья Калининградского п-ова была значительно меньше площади у северного, что связано с большим уклоном дна (рис. 3, *b*). В июне самые высокие концентрации хлорофилла *a* отмечались севернее плато Рыбачий. Около Вислинской косы концентрации были выше, чем вдоль северного побережья Калининградского п-ова и южной части Куршской косы, что, вероятно, связано с более высокой ТПМ в этом районе (рис. 3, *c*).

Отметим, что в Балтийском море доминантами фитопланктонных сообществ летом являются цианобактерии *Nodularia spumigena*, *Anabaena* spp. и *Aphanizomenon* sp.⁵ [33], первые два вида наблюдаются на глубинах 10 м и менее [34], последний обнаруживается на больших глубинах. Вероятно, повышенные концентрации хлорофилла *a* в южной части района исследования в июне связаны с оптимальными для развития цианобактерий условиями [35]. В среднем в пределах 30-метровой изобаты концентрация составляет ~ 6,88 мг/м³, что сопоставимо с полученными ранее оценками^{3, 4} [27, 28].

Пространственная изменчивость ТПМ в июле несколько отлична от июньской: наиболее высокая температура наблюдается в южной части района и вдоль северного побережья области (до 19°C). Минимальная температура прослеживается в северной части Куршской косы и составляет ~ 17,8°C, в открытой части моря – до 18°C (рис. 3, *d*). От июня к июлю наблюдается рост количества отрицательных температурных аномалий. В июле возникает еще одна область частой встречаемости отрицательных аномалий в районе западного побережья Калининградской области (рис. 3, *e*). В этом же месяце наблюдается существенно большее количество апвеллингов вдоль западного побережья области по сравнению с другими месяцами (~ 6 дней в месяц в июле против 3–4 дней в июне и августе). Наблюдаемое в июле «цветение» воды, связанное с массовым развитием цианобактерий и увеличением температуры воды в прибрежной зоне, отражается в увеличении концентрации хлорофилла *a* в прибрежной зоне вдоль северного побережья Калининградского п-ова (рис. 3, *f*). В то же время в южной части региона концентрация рассматриваемого параметра уменьшается по сравнению с июнем, что может быть связано

⁵ Neumann T., Schernewski G. Will algal blooms in the Baltic Sea increase in future? Model simulations with different eutrophication combat strategies // Low-lying coastal areas – hydrology and integrated coastal zone management : International symposium on Low-lying coastal areas. Hydrology and integrated coastal zone management. Bremerhaven, Federal Republic of Germany, 9–12 September 2002. Koblenz, 2002. P. 139–145. (ИНР/ОНР-Berichte ; sonderheft 13).

с истощением запаса биогенных элементов в этом районе в связи с более ранним «цветением» воды. В среднем в прибрежной зоне концентрация хлорофилла *a* составляет ~ 7 мг/м³.

В прибрежной зоне в августе ТПМ до изобат 20–40 м несколько ниже, чем в районах с большими глубинами (рис. 3, *g*). Максимальная температура также наблюдается в южной части ЮВБ, в районе 70-метровой изобаты (до 19,9°C), минимальная – в северной части Куршской косы (до 19°C). В августе прослеживается незначительное снижение количества апвеллингов по сравнению с июлем (рис. 3, *h*). В августе площадь частого проявления апвеллинга вдоль побережья Куршской косы и западного побережья области уменьшается. Вероятно, это связано с прогревом на широком мелководье и увеличением глубины залегания сезонного термоклина. Наибольшее количество апвеллингов в августе, как и в июне – июле, наблюдается у выхода из Куршского залива, что также отмечено в [20]. В августе средние значения концентрации хлорофилла *a* несколько ниже, чем в июне и июле (< 5 мг/м³), что отмечается и в [36, 37]. Наиболее высокие значения наблюдаются к западу от м. Таран и в районе выходов из заливов (рис. 3, *i*).

Повышенные значения концентрации хлорофилла *a* закономерно наблюдаются в районах выходов из заливов. В районе, близком к Клайпедскому проливу, зона с повышенными концентрациями в июне и июле имеет меньшую площадь, чем в районе Балтийского пролива. Повышенные значения концентрации в южной части акватории могут быть связаны с влиянием выноса р. Висла, в северной части – с распространением вод Куршского залива на север. Вероятно, это можно объяснить тем, что в целом Куршский залив характеризуется более высоким уровнем продуктивности фитопланктона по сравнению с Калининградским заливом [38].

Описанная пространственная изменчивость хлорофилла *a* в прибрежной зоне ЮВБ указывает на наличие не только внутрисезонных колебаний, но и региональных особенностей распределения, возможно, вызванных влиянием мезомасштабных процессов (таких как апвеллинг), развивающихся в прибрежной зоне.

Для количественной оценки влияния апвеллингов на концентрацию хлорофилла *a* в прибрежной зоне был проведен анализ наиболее обеспеченных спутниковыми данными апвеллингов.

Количественная оценка влияния апвеллингов на концентрацию хлорофилла *a* в Юго-Восточной Балтике. В табл. 1 приведены средние значения концентрации хлорофилла *a* на профиле до, во время и после апвеллинга за 2000–2019 гг. Прочерки соответствуют периодам, за которые данных не было.

Из табл. 1 следует, что пониженные концентрации хлорофилла *a* в прибрежной зоне после апвеллинга по сравнению со значениями концентрации до него проявляются независимо от его продолжительности. В среднем за весь период исследования после начала апвеллинга хлорофилл *a* падает на 0,4 мг/м³, после его окончания – на 1,42 мг/м³ (27%). Наибольшее снижение концентрации ($\sim 4,5$ мг/м³, или 67%) после апвеллинга наблюдалось в июне 2016 г. При этом в 9 случаях из 31 понижение концентрации после апвеллинга

составило $> 3 \text{ мг/м}^3$ (падение на 37–67%), в 11 случаях – $> 1 \text{ мг/м}^3$. Концентрация хлорофилла *a* во время апвеллинга в среднем на профиле чаще была ниже, чем в зоне апвеллинга. Вероятно, это связано с повышенными значениями концентрации в целом в прибрежной зоне (см. рис. 2, с).

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Концентрация хлорофилла *a* до, во время и после апвеллинга
Chlorophyll *a* concentration before, during and after upwelling

Даты апвеллинга на профиле / Upwelling dates on profile	Номер профиля / Profile number	Длительность апвеллинга, дни / Upwelling duration, days	Средняя концентрация хлорофилла <i>a</i> , мг/м^3 / Mean concentration of chlorophyll <i>a</i> , mg/m^3		
			до апвеллинга / before upwelling	во время апвеллинга / during upwelling	после апвеллинга / after upwelling
04–10.07.2001	3	7	6,26	5,22	2,57
23–31.07.2001	3	9	2,72	3,27	5,70
23–26.08.2001	3	4	3,22	4,33	3,03
17–19.07.2002	4	3	6,12	5,67	2,84
04–31.08.2002	4	27	5,19	4,51	–
02–05.06.2003	6	4	1,22	1,98	1,67
16.07–14.08.2003	1	30	4,34	7,31	4,52
07–15.08.2004	4	9	4,55	3,59	3,83
09–13.07.2005	9	5	8,95	7,56	5,66
03–09.07.2006	4	7	6,36	3,92	3,35
12.07–22.08.2006	4	42	3,35	3,78	1,52
07–12.06.2007	6	6	9,59	7,27	–
15–16.06.2007	6	1	–	7,66	6,96
01–10.06.2008	7	10	–	3,78	5,31
13–15.07.2008	8	3	7,62	8,50	7,57
27.07–03.08.2008	8	8	7,50	6,88	3,54
30.06–05.07.2009	8	6	–	5,76	6,72
30.06–08.07.2009	2	9	5,13	4,52	4,85
08–11.08.2009	8	4	6,18	8,68	2,05
15–20.07.2010	8	6	9,66	8,92	8,79
04–06.08.2011	4	3	3,79	5,36	3,07
23–27.07.2014	2	5	6,63	3,46	2,57
23–29.07.2014	4	7	5,39	3,78	2,74
09.08.2014	2	1	2,54	2,76	2,53
15–25.08.2015	9	11	5,78	4,70	2,69
05–09.06.2016	5	5	6,70	4,57	2,21
01–05.07.2018	6	5	3,33	5,26	3,86
16–21.07.2018	6	6	4,45	2,76	5,27
25–29.07.2018	6	5	5,27	3,12	–
31.07.2018	6	1	–	2,67	2,72
01–08.08.2019	4	8	3,32	2,46	2,51
Среднее за 2000–2009 гг. / Mean value for 2000–2009			5,52	5,48	4,22
Среднее за 2010–2019 гг. / Mean value for 2010–2019			5,17	4,15	3,54
Среднее за 2000–2019 гг. / Mean value for 2000–2019			5,38	4,97	3,95

В период 2000–2009 гг. рост хлорофилла *a* после апвеллинга был отмечен три раза: в конце июля 2001 г., начале июня 2003 г. и в середине июля – августа 2003 г. (см. табл. 1); в 2010–2019 гг. после апвеллинга рост отмечался только в июле 2018 г.

Среднее снижение концентрации хлорофилла *a* после апвеллинга во втором десятилетии несколько больше, чем в первом. Это может быть связано как с изменением характеристик исследуемых апвеллингов (изменение их продолжительности и повторяемости по месяцам), так и с влиянием сезонного хода концентрации хлорофилла *a*: во второй половине июля – августе наблюдается естественное снижение, что может быть связано с истощением запаса биогенных элементов в этом районе, при этом во втором десятилетии большую долю из всех рассматриваемых составляли апвеллинги июля и августа.

Большая часть из исследуемых (см. табл. 1) приходилось на апвеллинги продолжительностью до 5 дней (14 из 31). При этом в среднем в первую декаду продолжительность включенных в анализ апвеллингов составляет ~ 10 дней, во вторую – чуть более 5. После коротких апвеллингов (продолжительность 5 дней и менее) концентрация хлорофилла *a* падает в среднем на 1,24 мг/м³, после более длительных – на 1,89 мг/м³.

В качестве иллюстрации влияния апвеллинга на концентрацию хлорофилла *a* в прибрежной зоне на рис. 4 приведены карты ее изменения в июне 2007 г.

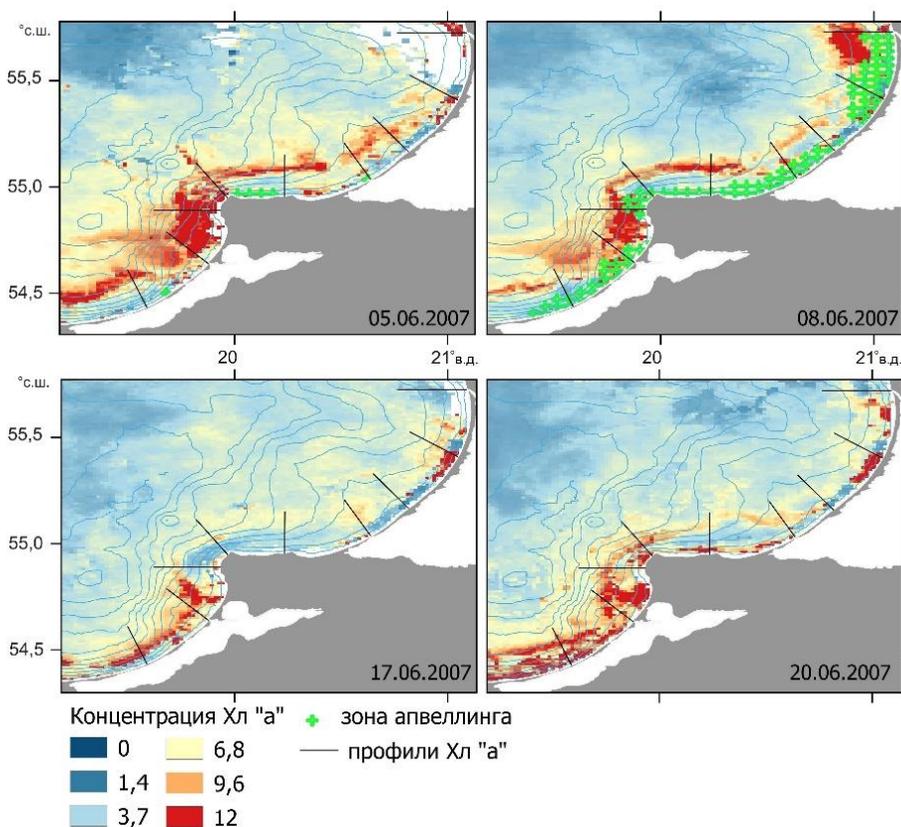


Рис. 4. Изменение концентрации хлорофилла *a* во время и после апвеллинга 4–16 июня 2007 г.
Fig. 4. Changes in Chl *a* concentration during and after the upwelling event on June 4–16, 2007

Апвеллинг, наблюдавшийся в период 4–16 июня 2007 г., привел к следующему изменению концентрации хлорофилла *a*: в первый день (5 июня) ее среднее значение в зоне апвеллинга снизилось до ~ 3 мг/м³, при этом вне зон апвеллинга оно составляло ~ 10 мг/м³ (рис. 4). На профиле б (рис. 1, район м. Таран) 8 июня на границе апвеллинга на расстоянии ~ 9 км от берега был отмечен фронт хлорофилла *a*, характеризующийся падением концентрации в два раза, с 7–8 до 4 мг/м³ (в [25] было показано падение концентрации на 40–50%). После окончания апвеллинга (17 июня) концентрация в прибрежной зоне района исследования шириной ~ 7 км по-прежнему была понижена, ее рост в прибрежной зоне был отмечен только с 20 июня – на четвертый день после окончания апвеллинга.

Ранее для Балтийского моря было показано, что в прибрежных районах между ростом фитопланктона и поступлением биогенов в поверхностный слой в результате апвеллинга существует задержка во времени [8, 23, 39]. Например, в Финском заливе и у о. Готланд увеличение биомассы фитопланктона наступало с задержкой на 2–3 недели после апвеллинга. В работе [11] роста фитопланктона после окончания апвеллинга вообще отмечено не было, что авторы связывают с тем, что через 10 дней после окончания одного апвеллинга начался следующий. При этом продолжительность временного промежутка между поступлением биогенных элементов и ростом фитопланктона зависит не только от характеристик апвеллинга, но и от видового состава фитопланктона в его области апвеллинга, а также от соотношения питательных веществ и температуры поднятой в поверхностный слой воды. Важным фактором также является продолжительность периода адаптации поднятых в поверхностный слой фитопланктонных сообществ к температуре, свету и концентрации биогенов [7].

Отметим, что ввиду наличия сезонного хода концентрации хлорофилла *a*, связанного с абиотическими факторами и сукцессией фитопланктонного сообщества, также важно знать количественный вклад апвеллингов в изменчивость его концентрации в течение летнего сезона на исследуемых профилях (см. рис. 1). Он представлен в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Table 2

Изменение средней концентрации хлорофилла *a* в летние месяцы в результате апвеллинга
Changes in mean chlorophyll *a* concentration in summer months due to upwelling

Месяц / Month	Средняя концентрация хлорофилла <i>a</i> , мг/м ³ / Mean concentration of chlorophyll <i>a</i> , mg/m ³	Средняя продолжительность апвеллинга, дни / Upwelling mean duration, days	Средняя концентрация хлорофилла <i>a</i> , мг/м ³ / Mean concentration of chlorophyll <i>a</i> , mg/m ³	
			до апвеллинга / before upwelling	после апвеллинга / after upwelling
Июнь / June	5,27	5,20	5,84	4,04
Июль / July	5,33	7,18	5,98	4,58
Август / August	3,78	12,11	4,21	2,65

Средние значения хлорофилла *a* на профилях примерно равны в июне и июле, при этом наибольшая средневзвешенная концентрация отмечалась в июне. Вероятно, эта разница отражает внутрисезонное изменение влияния апвеллингов на концентрацию. При этом их средняя продолжительность составляла 5,2–7,18 дней в июне – июле и значительно возросла к августу. Концентрация хлорофилла *a* в течение недели после апвеллинга демонстрирует пониженные значения во все месяцы и составляет ~ 1,4–1,8 мг/м³. По сравнению со среднемноголетними данными ее наибольшее снижение отмечается в июне. При этом наибольшее количество раз значительное снижение концентрации после апвеллинга наблюдалось в июле (6 раз из 9 отмеченных за весь период исследования – более чем на 3 мг/м³ и 8 раз из 11 – более чем на 1 мг/м³).

Совместный анализ спутниковых данных хлорофилла *a* и ТПМ показывает, что вызванное апвеллингом снижение его концентрации приводит к положительному влиянию на качество вод в прибрежной зоне [39]. Стоит отметить, что в работах, исследующих «цветение» вод при массовом развитии водорослей, указывается, что в большинстве случаев «цветение» наблюдается уже на расстоянии от берега, сопоставимом с шириной апвеллинга [40].

Проведенный анализ подтверждает необходимость учета внутри-сезонного хода концентрации хлорофилла *a* при рассмотрении влияния на него событий апвеллинга, что важно для корректных оценок изменения экологического состояния прибрежной зоны.

Заключение

По данным о повторяемости и продолжительности апвеллингов за июнь – август 2000–2019 гг. и мультисенсорных спутниковых наблюдений концентрации хлорофилла *a* в прибрежной зоне Юго-Восточной Балтики получены среднемноголетние и среднемесячные значения исследуемых параметров. Высокие концентрации отмечаются в районе выходов из Калининградского и Куршского заливов, наибольшие – севернее плато Рыбачий. При этом в северной части Куршской косы, в районе наибольшей повторяемости апвеллингов, зона с повышенными концентрациями хлорофилла *a* имеет меньшую площадь, чем в районе Балтийского пролива. В июне в районе плато Рыбачий зона апвеллинга имеет наибольшую площадь, при этом концентрация хлорофилла *a* в этом районе ниже, чем к северу и к югу от плато. Это указывает на возможную связь пространственной изменчивости хлорофилла *a* с повторяемостью апвеллингов.

В районе исследования были проанализированы 9 20-километровых профилей от берега в сторону моря, на которых рассчитаны значения концентрации хлорофилла *a* в течение недели до, во время и после апвеллинга, что позволило оценить их влияние на концентрацию. Показано, что снижение концентрации отмечается после апвеллингов любой продолжительности и во все месяцы, в среднем после апвеллинга концентрация падает более чем на 1 мг/м³ (27%). После коротких апвеллингов (продолжительность менее 5 дней) концентрация хлорофилла *a* в среднем снижается на 1,24 мг/м³, после более длительных – на 1,89 мг/м³. В среднем в июне – августе концентрация после апвеллинга падает примерно на 1,4–1,8 мг/м³, чаще всего ее значительное сниже-

ние наблюдалось в июле. Отмеченная разница отражает наличие внутрисезонного хода влияния апвеллингов на концентрацию хлорофилла *a* на рассматриваемой акватории, связанного как с абиотическими факторами, так и с успешней фитопланктонного сообщества.

Анализ временной изменчивости концентрации хлорофилла *a* показал, что через несколько дней после апвеллинга начинается ее рост, который, вероятно, связан с развитием фитопланктонных сообществ, вызванным поступлением биогенных веществ в фотический слой и часто стимулируемым повышением температуры воды.

Снижение концентрации хлорофилла *a* после апвеллинга во второе десятилетие текущего века несколько больше, чем в первое, что, вероятно, связано с изменением характеристик событий, включенных в анализ. Во втором десятилетии наблюдалось уменьшение продолжительности апвеллингов, наиболее значительное в июле и августе. В среднем в 2000–2009 гг. апвеллинг на всей территории ЮВБ длился около недели (7,1 дней), в 2010–2019 гг. – 4,66 дней. Большая часть из исследуемых приходилась на апвеллинги продолжительностью меньше 5 дней (14 из 31, по 7 в каждом десятилетии) и 6–10 дней (13 апвеллингов). При этом в среднем в первую декаду XXI в. продолжительность апвеллингов составляет ~ 10 дней, во вторую – ~ 5.

В дальнейшем требуется проведение целенаправленных наблюдений в зонах апвеллинга и вне их с целью анализа видового состава фитопланктонных сообществ. Это позволит выявить влияние апвеллингов на экологическое состояние вод Балтийского моря, в том числе – на «цветение» воды при массовом развитии потенциально токсичных цианобактерий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lehmann A., Myrberg K., Höfllich K.* A statistical approach to coastal upwelling in the Baltic Sea based on the analysis of satellite data for 1990–2009 // *Oceanologia*. 2012. Vol. 54, iss. 3. P. 369–393. <https://doi.org/10.5697/oc.54-3.369>
2. *Капустина М. В., Зымин А. В.* Пространственно-временные характеристики апвеллингов в Юго-Восточной Балтике в 2010–2019 гг. // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14, № 4. С. 52–63. EDN ZNQKIX. <https://doi.org/10.7868/S2073667321040055>
3. *Bednorz E., Pótrolniczak M., Tomczyk A. M.* Regional circulation patterns inducing coastal upwelling in the Baltic Sea // *Theoretical and Applied Climatology*. 2021. Vol. 144, iss. 3–4. P. 905–916. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03539-7>
4. *Kowalewski M.* The influence of the Hel upwelling (Baltic Sea) on nutrient concentrations and primary production – the results of an ecohydrodynamic model // *Oceanologia*. 2005. Vol. 47, iss. 4. P. 567–590.
5. *Lips I., Lips U., Liblik T.* Consequences of coastal upwelling events on physical and chemical patterns in the central Gulf of Finland (Baltic Sea) // *Continental Shelf Research*. 2009. Vol. 29, iss. 15. P. 1836–1847. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.06.010>
6. Influence of coastal upwelling on chlorophyll *a* concentration in the surface water along the Polish coast of the Baltic Sea / A. Krezel [et al.] // *Oceanologia*. 2005. Vol. 47, iss. 4. P. 433–452.
7. *Zalewski M., Ameryk A., Szymelfenig M.* Primary production and chlorophyll *a* concentration during upwelling events along the Hel Peninsula (the Baltic Sea) // *Oceanological and Hydrobiological Studies*. 2005. Vol. 34, Suppl. 2. P. 97–113.
8. Effect of upwelling on the pelagic environment and bloom-forming cyanobacteria in the western Gulf of Finland, Baltic Sea / E. Vahtera [et al.] // *Journal of Marine Systems*. 2005. Vol. 58, iss. 1–2. P. 67–82. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2005.07.001>

9. Phosphorus input by upwelling in the eastern Gotland Basin (Baltic Sea) in summer and its effects on filamentous cyanobacteria / M. Nausch [et al.] // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2009. Vol. 83, iss. 4. P. 434–442. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2009.04.031>
10. *Lips I., Lips U.* Phytoplankton dynamics affected by the coastal upwelling events in the Gulf of Finland in July–August 2006 // *Journal of Plankton Research*. 2010. Vol. 32, iss. 9. P. 1269–1282. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbq049>
11. The influence of a coastal upwelling event on chlorophyll *a* and nutrient dynamics in the surface layer of the Gulf of Finland, Baltic Sea / N. Kuvaldina [et al.] // *Hydrobiologia*. 2010. Vol. 639, iss. 1. P. 221–230. <https://doi.org/10.1007/s10750-009-0022-4>
12. Long-term trends in phytoplankton composition in the western and central Baltic Sea / N. Wasmund [et al.] // *Journal of Marine Systems*. 2011. Vol. 87, iss. 2. P. 145–159. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2011.03.010>
13. *Кудрявцева Е. А., Александров С. В.* Гидролого-гидрохимические основы первичной продуктивности и районирование российского сектора Гданьского бассейна Балтийского моря // *Океанология*. 2019. Т. 59, № 1. С. 56–71. EDN LWPEQE. <https://doi.org/10.31857/S0030-157459156-71>
14. The role of upwellings in the coastal ecosystem of the Southeastern Baltic Sea / A. V. Krek [et al.] // *Regional Studies in Marine Science*. 2021. Vol. 44, iss. 1. 101707. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101707>
15. *Zhurbas V., Laanemets J., Vahtera E.* Modeling of the mesoscale structure of coupled upwelling/downwelling events and the related input of nutrients to the upper mixed layer in the Gulf of Finland, Baltic Sea // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2008. Vol. 113, iss. C5. C05004. <https://doi.org/10.1029/2007JC004280>
16. *Huntsman S. A., Barber R. T.* Primary production off northwest Africa: the relationship to wind and nutrient conditions // *Deep Sea Research*. 1977. Vol. 24, iss. 1. P. 25–33. [https://doi.org/10.1016/0146-6291\(77\)90538-0](https://doi.org/10.1016/0146-6291(77)90538-0)
17. Case studies on phytoplankton blooms in coastal and open waters of the Baltic Sea using Coastal Zone Color Scanner data / H. Siegel [et al.] // *International Journal of Remote Sensing*. 1999. Vol. 20, iss. 7. P. 1249–1264. <https://doi.org/10.1080/014311699212713>
18. *Janssen F., Neumann T., Schmidt M.* Inter-annual variability in cyanobacteria blooms in the Baltic Sea controlled by wintertime hydrographic conditions // *Marine Ecology Progress Series*. 2004. Vol. 275. P. 59–68. <https://doi.org/10.3354/meps275059>
19. *Гоголев Д. Г., Буканова Т. В., Кудрявцева Е. А.* Концентрация хлорофилла «а» в юго-восточной части Балтийского моря летом 2018 года по спутниковым данным // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки*. 2020. № 4. С. 83–91. EDN RUSNPF.
20. Remote sensing of coastal upwelling in the south-eastern Baltic Sea: Statistical properties and implications for the coastal environment / T. Dabuleviciene [et al.] // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, iss. 11. 1752. <https://doi.org/10.3390/rs10111752>
21. Remote sensing of chlorophyll in the Baltic Sea at basin scale from 1997 to 2012 using merged multi-sensor data / J. Pitarch [et al.] // *Ocean Science*. 2016. Vol. 12, iss. 2. P. 379–389. <https://doi.org/10.5194/os-12-379-2016>
22. *Kratzer S., Brockmann C., Moore G.* Using MERIS full resolution data to monitor coastal waters – A case study from Himmerfjärden, a fjord-like bay in the northwestern Baltic Sea // *Remote Sensing of Environment*. 2008. Vol. 112, iss. 5. P. 2284–2300. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.10.006>
23. Monitoring the effect of upwelling on the chlorophyll *a* distribution in the Gulf of Finland (Baltic Sea) using remote sensing and in situ data / R. Uiboupin [et al.] // *Oceanologia*. 2012. Vol. 54, iss. 3. P. 395–419. <https://doi.org/10.5697/oc.54-3.395>
24. *Paszruta M., Zapadka T., Krężel A.* Assessment of cloudiness for use in environmental marine research // *International Journal of Remote Sensing*. 2019. Vol. 40, iss. 24. P. 9439–9459. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1633697>
25. *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, iss. 21. 3661. <https://doi.org/10.3390/rs12213661>

26. Капустина М. В., Зимин А. В. Повторяемость апвеллингов в Юго-Восточной Балтике в 2000-2019 гг. // Морские исследования и образование. Сборник трудов X Международной научно-практической конференции. Т. I (III). Тверь, 2021. С. 152–156. EDN CALXNT.
27. Nakonieczny J., Renk H., Wiktor J. Chlorophyll *a* concentration and distribution in the Southern Baltic in the years 1979–1983 // *Oceanologia*. 1991. No. 30. P. 77–91.
28. 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 / E. Kudryavtseva [et al.] // *Regional Studies in Marine Science*. 2019. Vol. 32. 100862. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100862>
29. Копелевич О. В., Салинг И. В. Межгодовые изменения биооптических характеристик поверхностного слоя морей, окружающих западную часть России, по данным спутниковых сканеров цвета // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13, № 2. С. 16–24. EDN KVOSRN. <https://doi.org/10.7868/S2073667320020021>
30. Comparisons of satellite and modeled surface temperature and chlorophyll concentrations in the Baltic Sea with in situ data / M. Stramska [et al.] // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, iss. 15. 3049. <https://doi.org/10.3390/rs13153049>
31. Александров С. В., Кудрявцева Е. А. Хлорофилл «а» и первичная продукция фитопланктона // *Нефть и окружающая среда Калининградской области* / Отв. ред. В. В. Сивков. Калининград : Терра Балтика, 2012. Т. 2 : Море. С. 358–371. EDN QCKJSO.
32. Kratzer S., Moore G. Inherent optical properties of the Baltic Sea in comparison to other seas and oceans // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, iss. 3. 418. <https://doi.org/10.3390/rs10030418>
33. Kahru M., Horstmann U., Rud O. Satellite detection of increased cyanobacteria blooms in the Baltic Sea: Natural fluctuation or ecosystem change? // *Ambio*. 1994. Vol. 23, iss. 8. P. 469–472.
34. Hajdu S., Högländer H., Larsson U. Phytoplankton vertical distributions and composition in Baltic Sea cyanobacterial blooms // *Harmful Algae*. 2007. Vol. 6, iss. 2. P. 189–205. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2006.07.006>
35. Ennet P., Kuosa H., Tamsalu R. The influence of upwelling and entrainment on the algal bloom in the Baltic Sea // *Journal of Marine Systems*. 2000. Vol. 25, iss. 3–4. P. 359–367. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(00\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(00)00027-0)
36. Евтушенко Н. В., Шеберстов С. В. Использование данных спутникового сканера MODIS-Aqua для исследования циклов цветения фитопланктона в Балтийском море // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13, № 3. С. 114–124. EDN WDNTLV. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-3-114-124>
37. Буканова Т. В., Бубнова Е. С., Александров С. В. Дистанционный мониторинг морской площади карбонового полигона «Росянка» (Балтийское море): первые результаты // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19, № 6. С. 234–247. EDN KVBQWQ. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-6-234-247>
38. Александров С. В., Горбунова Ю. А. Продукция фитопланктона и содержание хлорофилла в эстуариях различного типа // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки*. 2012. Вып. 1. С. 90–98. EDN ОРМУКХ.
39. Wasmund N., Nausch G., Voss M. Upwelling events may cause cyanobacteria blooms in the Baltic Sea // *Journal of Marine Systems*. 2012. Vol. 90, iss. 1. P. 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2011.09.001>
40. Löptien U., Dietze H. Retracing cyanobacteria blooms in the Baltic Sea // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. 10873. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14880-w>

Об авторах:

Капустина Мария Владимировна, младший научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), **ORCID ID: 0000-0002-7507-3170**, **ResearcherID: L-2625-2016**, **Scopus Author ID: 57201388973**, **SPIN-код: 5287-1100**, kapustina.mariya@ya.ru

Зимин Алексей Вадимович, главный научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), доктор географических наук, доцент, **ORCID ID: 0000-0003-1662-6385**, **ResearcherID: C-5885-2014**, **Scopus Author ID: 55032301400**, **SPIN-код: 9833-3460**, zimin2@mail.ru