

Научная статья

УДК 551.468
EDN: UTYUXF

Изменчивость характеристик апвеллинга в юго-восточной части Балтийского моря в первые два десятилетия XXI века

М. В. Капустина [✉], А. В. Зимин

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия
[✉] *kapustina.mariya@ya.ru*

Поступила в редакцию 24.03.23; одобрена после рецензирования 29.08.23;
принята к публикации 06.09.2023.

Аннотация

Цель. Систематизация региональных особенностей прибрежного апвеллинга в Юго-Восточной Балтике (ЮВБ) за летние сезоны 2000–2019 гг. в условиях меняющегося климата – цель настоящей работы.

Методы и результаты. Представлены результаты идентификации событий апвеллинга в юго-восточной части Балтийского моря как отрицательной аномалии температуры поверхности моря у берега относительно выбранного района открытого моря. Получены оценки влияния локальных и глобальных атмосферных процессов (по данным о характеристиках ветра и индексах SCAND и NAO) на характеристики (повторяемость, продолжительность, площадь) апвеллингов. В среднем на акватории наблюдалось 4 апвеллинга суммарной продолжительностью > 20 дней при средней площади зоны апвеллинга ~ 620 км². Наибольшая повторяемость апвеллингов в районе исследования отмечается вдоль северной части Куршской косы и западного побережья Калининградского п-ова. Зарегистрировано уменьшение продолжительности апвеллингов примерно на 8 дней в летние сезоны 2010–2019 гг. по сравнению с 2000–2009 гг. при уменьшении повторяемости благоприятных для их развития ветров на 4–5%. Установлена связь между количеством дней с апвеллингом в Юго-Восточной Балтике и индексом SCAND (коэффициент корреляции составил 0,65), что позволяет в дальнейшем вести работу по получению долгосрочных прогнозов вероятности развития прибрежных апвеллингов в ЮВБ.

Выводы. Показано, что устойчивое уменьшение частоты апвеллингов в ЮВБ в последние десятилетия связано с сокращением благоприятных для их развития ветровых условий, в значительной степени определяемых развитием антициклогенеза над Скандинавским п-овом.

Ключевые слова: прибрежный апвеллинг, тип апвеллинга, межгодовая изменчивость, атмосферная циркуляция, Юго-Восточная Балтика

Благодарности: работа выполнена в рамках темы госзадания ИО РАН FMWE-2021-0012.

Для цитирования: Капустина М. В., Зимин А. В. Изменчивость характеристик апвеллинга в юго-восточной части Балтийского моря в первые два десятилетия XXI века // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 6. С. 797–813. EDN UTYUXF.

Variability of Upwelling Characteristics in the Southeastern Baltic Sea in the First Two Decades of the 21st Century

M. V. Kapustina ✉, A. V. Zimin

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

✉ kapustina.mariya@ya.ru

Abstract

Purpose. The study is purposed at systematizing the regional features of coastal upwelling in the southeastern part of the Baltic Sea (SEB) during the summer seasons of 2000–2019 in a changing climate.

Methods and Results. The results of the identification of upwelling events in the southeastern Baltic Sea are presented as a negative anomaly of the coastal sea surface temperature relative to the selected area of the open sea. The estimates of influence of the local and global atmospheric processes (based on the data on wind characteristics and SCAND and NAO teleconnection indices) upon the upwelling event characteristics, (frequency, duration and area) were obtained. On average, 4 upwelling events with a total duration exceeding 20 days were observed, at the upwelling zone average area of about 620 km². The upwelling frequency in the area under study was the highest along the northern part of the Curonian Spit and the Sambia Peninsula western coast. In comparison to 2000–2009, the upwelling durations in the summer seasons of 2010–2019 were recorded to decrease by about 8 days at the decline of frequency of the winds favorable for their development by 4–5%. The correlation between the number of upwelling days in southeastern Baltic Sea and the SCAND index is established (the correlation coefficient was 0.65), that allows further attempts on obtaining the long-term forecasts of the probability of coastal upwelling development in the southeastern Baltic Sea.

Conclusions. It is shown that a steady decrease in the upwelling frequency in SEB during the recent decades is related to a declining frequency of the upwelling-favorable winds largely conditioned by the anticyclogenesis development over the Scandinavian Peninsula.

Keywords: coastal upwelling, upwelling type, interannual variability, large-scale atmospheric circulation, southeastern Baltic Sea

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of the theme of state assignment of IO RAS FMWE-2021-0012.

For citation: Kapustina, M.V., and Zimin, A.V., 2023. Variability of Upwelling Characteristics in the Southeastern Baltic Sea in the First Two Decades of the 21st Century. *Physical Oceanography*, 30(6), pp. 760-775.

Введение

Региональные особенности апвеллингов в Юго-Восточной Балтике (ЮВБ) хорошо описаны по результатам моделирования и обобщения многолетних данных [1–4]. Показано, что прибрежные апвеллинги Балтийского моря имеют два основных механизма возникновения [5–8]: экмановский перенос поверхностных вод от берега под действием вдольберегового ветра [8] (классические, или экмановские, апвеллинги) и сгон поверхностных вод ветрами, направленными с берега в сторону моря (сгонные апвеллинги) [7, 9]. Известно [10], что апвеллинги могут быть вызваны и другими причинами, например воздействием вдольберегового течения, однако в Балтийском море основными факторами, влияющими на краткосрочную изменчивость поверхностных течений, являются локальный ветер и связанный с ним экмановский перенос [11].

Считается, что отмечаемая многими исследователями изменчивость атмосферных переносов над Балтийским регионом в XXI в. [12, 13] должна отражаться в интенсивности апвеллингов на рассматриваемой акватории [14–16]. Но имеющиеся исследования апвеллингов в ЮВБ не позволяют на продолжительном интервале времени (в несколько десятилетий) описать особенности их пространственной динамики и систематизировать данные о площади температурных аномалий, а также получить оценки связи этих аномалий с характеристиками атмосферной циркуляции для определения возможностей прогнозирования событий апвеллингов. Получение и уточнение этих сведений является важным аспектом в понимании того, как влияют происходящие глобальные климатические изменения на характеристики вод у побережья активно используемой в рекреационных целях Калининградской области. Результаты исследования по изменчивости апвеллингов также могут быть использованы при изучении локальной динамики вод прибрежной зоны, которая связана с переносом загрязнений, биогенных элементов и фитопланктона. Кроме того, полученная информация может применяться для разработки научно обоснованных стратегий мониторинга и политики природопользования в прибрежной зоне.

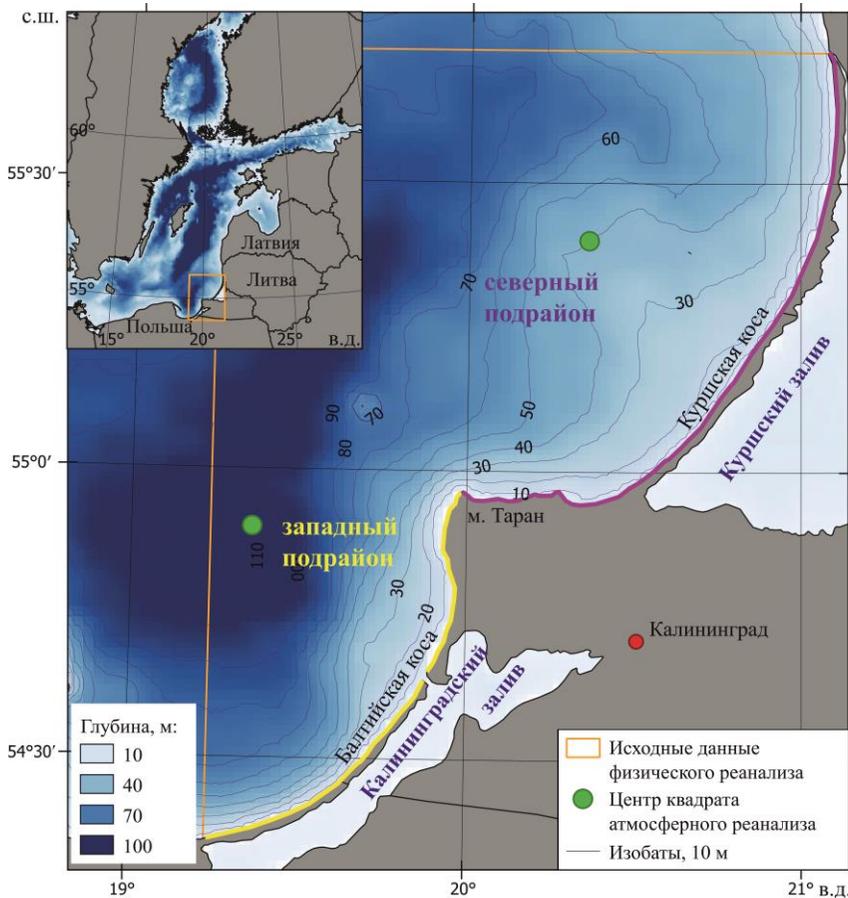
Таким образом, цель настоящего исследования – изучение региональных особенностей прибрежных апвеллингов в ЮВБ в первые два десятилетия XXI в. в условиях современного меняющегося климата. Задачи: выделение событий поверхностных проявлений апвеллингов на акватории ЮВБ, оценка их пространственно-временной изменчивости за период 2000–2019 гг., анализ влияния локальных метеоусловий и крупномасштабной атмосферной циркуляции на характеристики апвеллингов в прибрежной зоне ЮВБ.

Материалы и методы

Оценка пространственной изменчивости и количественных характеристик повторяемости температурных аномалий, идентифицируемых как поверхностное проявление апвеллингов, проводилась по среднесуточным данным о температуре воды с пространственным разрешением 4 км на глубине 1,5 м с июня по август в 2000–2019 гг. Данные получены из массива физического реанализа Балтийского моря (*CMEMS*)¹. Участки акватории в прибрежной зоне, температура в которых была на 1°C ниже фоновых значений для выделенного района открытого моря, отмечались как зоны апвеллингов (подробнее метод описан в [2]). За событие апвеллинга принималось наличие ячеек отрицательной аномалии температуры в прибрежной зоне продолжительностью от одних суток площадью от одной ячейки. С применением данной методики были идентифицированы даты и области апвеллингов для акватории ЮВБ, ограниченной координатами 19,236–21,200° в. д., 54,300–55,725° с. ш. (рис. 1) по двум подрайонам: западному (западное побережье Калининградской области и побережье Балтийской (Вислинской) косы) и северному (северное побережье Калининградской области и побережье Куршской косы).

¹ Baltic Sea Physics Reanalysis // Copernicus Marine Service. <https://doi.org/10.48670/moi-00013>
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 39 № 6 2023

Повторяемость апвеллингов была получена в днях и в событиях. Среднесуточная площадь (км²) каждого апвеллинга была рассчитана как сумма площадей ячеек, в которых отмечалась отрицательная аномалия, деленная на продолжительность апвеллинга. Средние за каждый месяц и сезон площади апвеллингов были определены как среднее значение площадей апвеллингов, отмеченных в этот месяц и сезон. Вертикальные скорости в зоне апвеллинга оценивались по вертикальному изменению положения изотерм в узлах сетки реанализа в прибрежной зоне в ходе наблюдения апвеллинга (м/день).



Р и с. 1. Район исследования. Побережье разделено на северный и западный подрайоны (фиолетовый и желтый цвет береговой линии соответственно)

Fig. 1. Area under study. Coast is divided into the northern and western subareas (purple and yellow colors of coastline, respectively)

С использованием ежечасных данных о компонентах ветра из реанализа ERA5² на высоте 10 м (аналогично [17, 18] в квадратах с координатами 55,40° с. ш., 20,36° в. д. (северный подрайон) и 54,90° с. ш., 19,36° в. д. (за-

² ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present / H. Hersbach [et al.] ; Copernicus Climate Change Service (C3S) ; Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>
800 МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 39 № 6 2023

падный подрайон)) были рассчитаны повторяемость направлений ветра по 16 румбам и его скорости за 2000–2019 гг. Кроме того, для каждого выделенного апвеллинга продолжительностью более двух дней были получены повторяемости направления ветра по 16 румбам за три дня до начала события. Они привлекались для определения благоприятных для развития апвеллингов ветров и последующего определения типа апвеллинга – сгонного, классического или смешанного. Стоит отметить, что для Балтийского моря существует несколько оценок продолжительности и скорости ветра, достаточных для развития классического апвеллинга: в [10] было показано, что для подъема воды с глубины 5 м достаточно дующего параллельно берегу в течение одного дня ветра скоростью 10 м/с; в [18] в качестве благоприятного был принят ветер скоростью 3,5 м/с, действующий не менее 2 сут, в [17] был исследован случай развития апвеллинга после 42-часового воздействия ветра скоростью до 10 м/с. В данной работе принималось, что под влиянием вдольберегового ветра формировался классический, или экмановский, апвеллинг; под влиянием ветра, направленного с берега в сторону моря, формировался сгонный апвеллинг. При этом в работе [19] глубина слоя Экмана для Балтийского моря для ветра скоростью 10 м/с была оценена в 25 м, т. е. экмановские апвеллинги даже при благоприятных ветрах будут развиваться на глубинах > 20–30 м. При этом северный и западный подрайоны ЮВБ значительно различаются по батиметрическим характеристикам: у Куршской косы изобата 30 м удаляется от берега на расстояние > 20 км, у Балтийской косы – приближается до значений ~ 3 км. Соответственно, отношение глубины моря к глубине слоя Экмана в этих акваториях при равном удалении от берега в 10 км меняется в диапазоне 0,1–2.

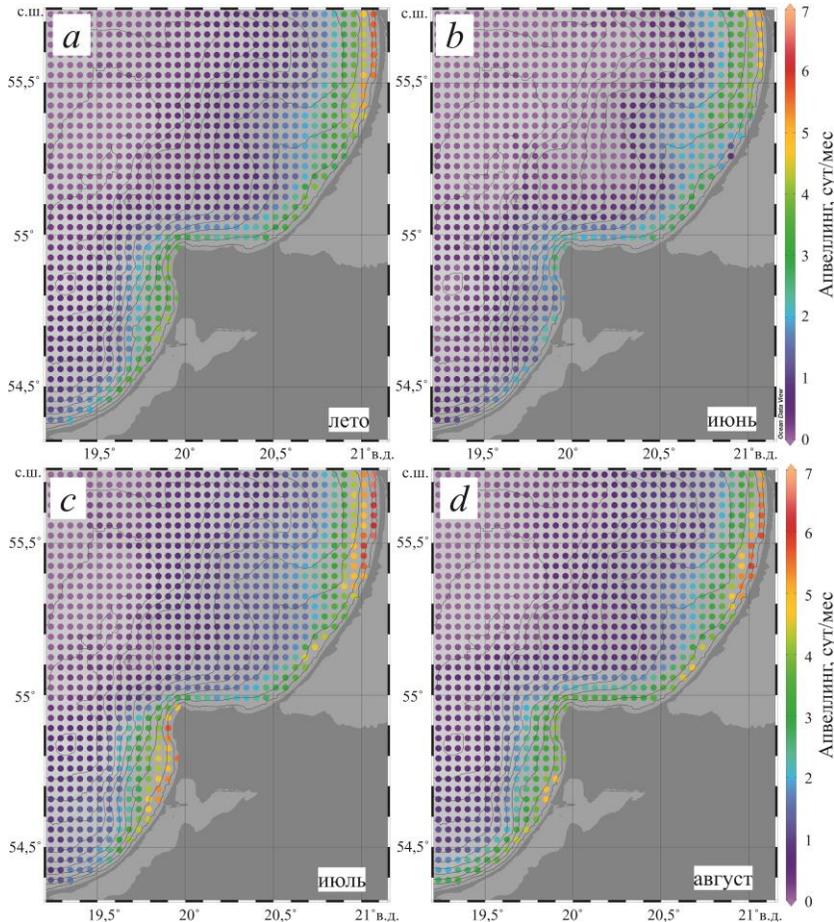
За направление берега бралась касательная вдоль береговой линии подрайонов для тех частей побережья, где апвеллинги наблюдаются чаще, чем в среднем для рассматриваемого региона. Если общая продолжительность ветров одного типа значительно превышала продолжительность ветров другого типа, апвеллинг считался сгонным или классическим. Если разница в продолжительности ветров разных типов составляла < 10%, апвеллинг отмечался как смешанный.

Анализ влияния параметров атмосферной циркуляции на характеристики апвеллингов проводился путем расчета коэффициентов линейной корреляции (среднемесячного количества дней с апвеллингом (с июня по август)) со среднемесячными (с мая по август) значениями индексов крупномасштабной атмосферной циркуляции *SCAND* (скандинавское колебание, характеризующее барический градиент между Скандинавским п-овом и югом Европы) и *NAO* (североатлантическое колебание, характеризует изменчивость меридионального градиента давления на севере Атлантического океана)³. Полученные коэффициенты оценивались по уровню значимости $\alpha = 0,05$, не соответствующие этому уровню в работе не приводились.

³ Northern Hemisphere Teleconnection Patterns / National Weather Service; Climate Prediction Center. URL: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml> (date of access: 10.06.2020).

Результаты

Проведенный анализ позволил выявить в ЮВБ за летний период 2000–2019 гг. 82 апвеллинга общей продолжительностью 546 дней. Пространственная изменчивость встречаемости отрицательных аномалий температуры, идентифицируемых как проявление апвеллингов, за летний сезон в целом и по месяцам показана на рис. 2, который отражает наличие хорошо выраженного внутрисезонного хода повторяемости апвеллингов.



Р и с. 2. Среднегодовое количество дней с отрицательной температурной аномалией в месяц за сезон и помесячно в заданной ячейке в 2000–2019 гг.

Fig. 2. Long-term average annual number of days with a negative temperature anomaly per month over a season and per month in a given cell in 2000–2019

В среднем за летний период (рис. 2, *a*) на акватории четко выделяется район с глубинами < 30 м, где отрицательные аномалии температуры встречаются не менее трех дней в месяц. Наибольшее количество апвеллингов наблюдается у выхода из Куршского залива, высокая частота апвеллингов в этом районе также отмечена в [20]. По повторяемости апвеллингов в летний период прибрежная акватория может быть разделена на несколько районов: к первому можно отнести северное побережье Калининградского п-ова и за-

падную часть Балтийской косы (два и менее дней наблюдения апвеллингов в месяц), ко второму – район у м. Таран и южную часть Куршской косы (3–4 дня наблюдения апвеллингов в месяц), к третьему – западное побережье Калининградской области и северную часть Куршской косы (апвеллинги наблюдаются > 4 дней в месяц).

В июне максимальное число отрицательных аномалий температуры прослеживается в северной части Куршской косы (рис. 2, *b*). Наибольшую площадь в это время апвеллинги достигают в районе плато Рыбачий, что связано с особенностями топографии дна, – в этой части акватории наблюдается обширное мелководное плато. Средняя площадь апвеллингов в июне у западного побережья меньше, чем у северного, что, вероятно, связано с особенностями рельефа – значительным уклоном дна.

В июле (рис. 2, *c*) на акватории отмечается рост повторяемости событий апвеллингов. Наблюдается существенно большее количество апвеллингов вдоль западного побережья области, чем в другие исследуемые месяцы. По максимальной повторяемости апвеллингов четко выделяются два подрайона: Куршская коса и западное побережье Калининградской области с северной частью Балтийской косы, при этом северное побережье области, как и южная часть Балтийской косы, отличаются низкими повторяемостями апвеллингов, что, вероятно, связано с особенностями ветрового режима.

В августе (рис. 2, *d*) площадь апвеллингов вдоль побережья Куршской косы и западного побережья Калининградского п-ова уменьшается. Вероятно, это связано с развитием области прогрева на широком мелководье. При этом максимальное уменьшение повторяемости отрицательных аномалий отмечается в западном подрайоне.

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

**Повторяемость и площадь апвеллингов разной продолжительности
в ЮВБ в июне – августе 2000–2019 гг.
Frequency and area of upwellings of different duration in SEB
in June – August, 2000–2019**

Продолжительность апвеллинга, сут / Upwelling duration, day	Количество апвеллингов, всего (июнь/июль/август) / Number of upwellings, total (June/July/August)	Среднесуточная площадь апвеллингов (размах вариации), км ² / Average daily area of upwellings (range of variation), km ²
1–5	52 (20/16/16)	181 (1139)
6–10	14 (2/6/6)	761 (1876)
11 и более / 11 and more	16 (5/8/3)	1949 (4487)

Наибольшая повторяемость в ЮВБ отмечена для апвеллингов продолжительностью до 5 дней (табл. 1), их средняя площадь на порядок ниже, чем у продолжительных апвеллингов (> 11 дней). При этом изменчивость площади относительно средних оценок максимальна у самых коротких (продолжительностью до 5 дней) из рассматриваемых событий. Короткие апвеллинги чаще наблюдаются в июне, длинные – в июле.

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Основные характеристики апвеллингов в ЮВБ в июне – августе 2000–2019 гг.
Main upwelling characteristics in SEB in June – August, 2000–2019

Год / Year	Количество апвеллингов / Number of upwellings	S_{\max} в ЮВБ, км ² / S_{\max} in SEB, км ²	Количество дней с апвеллингом (июнь, июль, август) / Number of upwelling days (June, July, August)		Среднесуточная площадь, км ² / Average daily area km ²	
			Подрайоны / Subareas			
			северный / northern	западный / western	северный / northern	западный / western
2000	6	720	8 (0,0,8)	8 (0,2,6)	195	89
2001	4	4992	30 (1,19,10)	33 (0,27,6)	819	791
2002	4	6560	51 (12,8,31)	47 (11,5,31)	1330	453
2003	2	3760	34 (4,16,14)	24 (4,16,4)	595	566
2004	2	2528	19 (0,5,14)	13 (0,3,10)	830	411
2005	5	2912	20 (4,10,6)	10 (1,9,0)	223	292
2006	2	9584	62 (2,30,30)	56 (0,26,30)	2045	1053
2007	4	3136	21 (14,0,7)	18 (10,0,8)	303	227
2008	5	8016	26 (12,10,4)	31 (11,11,9)	1307	522
2009	5	3648	28 (2,9,17)	24 (7,8,9)	378	168
2010	6	6640	24 (9,14,1)	19 (3,16,0)	282	249
2011	2	528	9 (0,3,6)	4 (0,1,3)	219	64
2012	6	112	6 (4,0,2)	4 (2,2,0)	42	40
2013	6	1920	14 (10,4,0)	11 (8,3,0)	228	253
2014	6	4528	36 (12,16,8)	32 (3,17,12)	632	409
2015	3	1904	14 (0,1,13)	14 (0,2,12)	128	181
2016	5	5104	21 (18,3,0)	16 (12,4,0)	690	292
2017	1	16	0 (0,0,0)	1 (1,0,0)	0	16
2018	3	4992	45 (15,28,2)	33 (13,19,1)	1738	512
2019	5	896	17 (5,4,8)	6 (1,1,4)	278	41

Межгодовая изменчивость характеристик апвеллингов показана в табл. 2. В среднем за весь временной период на акватории ЮВБ наблюдалось 4 апвеллинга в летний период суммарной продолжительностью > 20 дней. При этом среднесуточная площадь зоны апвеллинга в ЮВБ составляла ~ 620 км². Большое количество дней с апвеллингами и их бóльшая площадь характерны для северного подрайона (см. рис. 1): там за летний сезон наблюдалось в среднем 24 дня с апвеллингами в год, их среднесуточная площадь составляла ~ 560 км²; в западном подрайоне – ~ 20 дней со среднесуточной площадью ~ 315 км².

В ЮВБ за летний сезон отмечалось от одного (в 2017 г.) до 6 (в 2000, 2010, 2012–2014 гг.) апвеллингов. Продолжительность одного апвеллинга в среднем составляла < 7 дней, но чаще всего они продолжались в течение одного – двух дней. Наибольшая продолжительность апвеллингов наблюдалась в 2006 г. (60 дней) и в 2002 г. (32 дня). Сходные оценки для восточного побережья Балтийского моря были получены в [20]. Наименьшее количество дней апвеллинг наблюдался в 2017 г. (один день).

Наибольшие площади апвеллингов (до 80% акватории подрайона) прослеживались в 2002 г. (в северном подрайоне), в 2006, 2008 и 2014 гг. (в западном); наименьшие – в 2000, 2011–2012 и 2017 гг. Максимальные площади (> 5000 км²) были отмечены в ходе наблюдения апвеллингов в июне 2008 и 2016 гг., в июле 2010 г. и в июле – августе 2002 и 2006 гг.

Скорость подъема изотерм в районе к северу от плато Рыбачий в узле сетки реанализа на горизонте 9 м в ходе апвеллинга средней интенсивности (13–14 июля 2018 г.) составила ~ 4 м/день. Во время интенсивного апвеллинга, который сопровождался значительным понижением температуры, в прибрежной зоне на станции глубиной > 30 м к западу от м. Таран скорость подъема изотерм 15–16 июля 2006 г. составила ~ 8 м/день.

Наблюдается высокая степень связи между количеством дней с термической аномалией летом и средней (коэффициент корреляции 0,85) и максимальной площадью апвеллингов (коэффициент корреляции 0,87), при этом между количеством событий и их продолжительностью и площадью значимых статистических связей не прослеживается. В целом в акватории ЮВБ большее количество дней с апвеллингом, как и большие площади, наблюдались в северном подрайоне, что связано как с большей площадью мелководья в этом подрайоне, так и с общей протяженностью береговой линии и, возможно, с ее ориентацией относительно наиболее повторяющихся ветров.

Отметим изменение по годам внутрисезонной повторяемости апвеллингов: в 2000–2006 гг. большее количество дней с апвеллингом наблюдалось в июле – августе, с 2006 г. распределение дней с апвеллингом было более равномерно в течение летнего сезона. В северном подрайоне летом наблюдалось увеличение количества дней с апвеллингом (от 6,2 дня в июне до 9 дней в июле – августе). В западном подрайоне наименьшее количество дней с апвеллингом было отмечено в июне (4,4 дня), наибольшее – в июле (8,6 дня), в августе – понижение до 7,3 дня. Внутрисезонная изменчивость среднесуточной площади зоны апвеллингов в ЮВБ в двух районах демонстрирует рост от июня к июлю и уменьшение к августу.

Зарегистрировано увеличение количества апвеллингов в 2010–2019 гг. при общем уменьшении их продолжительности: в первом десятилетии – 39 апвеллингов общей продолжительностью 327 дней, во втором – 43 апвеллинга продолжительностью 221 день. Среднесуточная площадь апвеллингов в двух районах во втором десятилетии также уменьшилась (более чем в два раза), что могло найти отражение в изменении экологического состояния прибрежных вод: прибрежный апвеллинг является важным механизмом транспорта биогенных элементов в поверхностный слой и переноса загрязняющих веществ из прибрежной зоны в район открытого моря.

**Среднегодовая продолжительность и повторяемость апвеллингов
в июне – августе 2000–2019 гг. по декадам в ЮВБ***
**Average annual upwelling duration and frequency in SEB
in June – August, 2000–2019 by decades**

Месяц / Month	Годы / Years	Количество апвеллингов / Number of upwellings			Количество дней с апвеллингом / Number of upwelling days			Площадь (размах вариации), тыс. км ² / Area (range of variation), thousand km ²		
		Район и подрайоны / Region and subareas								
		ЮВБ / SEB	запад- ный / western	север- ный / northern	ЮВБ / SEB	запад- ный / western	север- ный / northern	ЮВБ / SEB	запад- ный / western	север- ный / northern
Июнь / June	2000– 2009	1,00	0,70	0,90	5,7	4,4	5,1	0,9 (4,04)	0,33 (1,57)	0,61 (2,59)
	2010– 2019	1,90	1,30	1,50	8,2	4,3	7,3	0,72 (3,01)	0,21 (0,57)	0,64 (2,58)
Июль / July	2000– 2009	1,40	1,30	1,10	12,1	10,7	10,7	1,32 (5,16)	0,45 (1,17)	1,08 (4,35)
	2010– 2019	1,70	1,30	1,40	8,7	6,5	7,3	0,45 (1,55)	0,22 (0,92)	0,29 (1,03)
Август / August	2000– 2009	1,50	1,10	1,20	14,9	11,3	14,1	1,23 (4,64)	0,48 (1,05)	0,92 (3,48)
	2010– 2019	<u>0,70</u>	<u>0,50</u>	<u>0,50</u>	5	3,2	4	<u>0,27</u> <u>(1,43)</u>	<u>0,17</u> <u>(1,19)</u>	<u>0,15</u> <u>(0,54)</u>

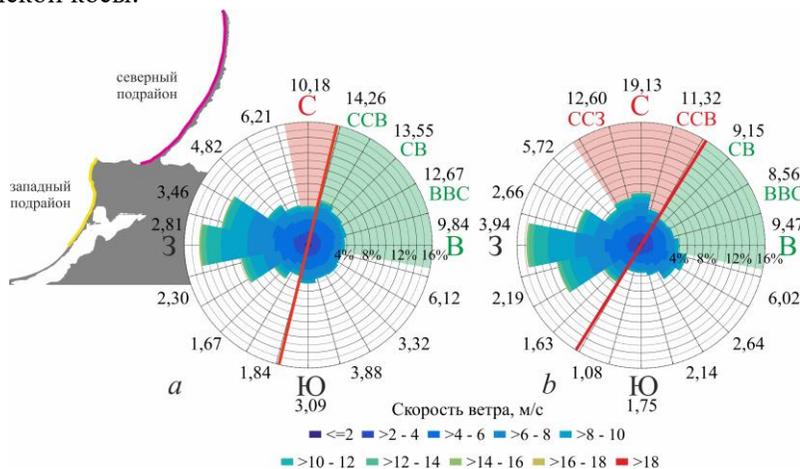
* минимальные значения параметра подчеркнуты, максимальные обозначены полужирным шрифтом.

* the minimum parameter values are underlined, the maximum ones are in bold.

В целом повторяемость апвеллингов летом 2000–2019 гг. в ЮВБ можно разделить на три 6-летних периода: рост повторяемости по 2006 г., падение – по 2012 г. и последующий рост. При этом в 2000–2009 гг. апвеллинги происходили существенно чаще, чем в 2010–2019 гг.: в среднем > 30 дней с апвеллингом за лето первого десятилетия и 22 дня – за лето второго десятилетия. Значительное уменьшение в 2010–2019 гг. как количества дней, так и площади апвеллингов отмечалось в июле и августе (табл. 3). Кроме того, во втором десятилетии наблюдалось резкое уменьшение изменчивости площадей апвеллингов, особенно в северном подрайоне. В июне же в западном подрайоне количество дней с апвеллингом уменьшилось незначительно, а в северном

подрайоне наблюдалось их увеличение. Отмечаемые внутрисезонные вариации характеристик апвеллингов могут быть вызваны изменениями характера крупномасштабной атмосферной циркуляции, которые в регионе отражаются в том числе в сезонном смещении повторяемости максимальных ветров [21].

В большинстве случаев понижение температуры (интерпретируемое как проявление апвеллинга) возникало в каждой из выделенных зон независимо друг от друга при определенных ветровых условиях. Наибольшую повторяемость в трехдневный период до апвеллинга демонстрируют северо-северо-восточный (ССВ) ветер для западного подрайона и северный (С) – для северного подрайона (рис. 3). Самую низкую повторяемость в этих подрайонах в указанный период показывают западные и южные ветры. Направления ветра, показавшие повторяемость выше средней (6,25%), следующие: ветры СВ для западного подрайона и ССЗ – В – для северного. Более 70% апвеллингов в западном подрайоне и ~ 80% в северном вызваны ветрами этих румбов; оставшаяся доля апвеллингов вызвана южными ветрами, которые являются сгонными для северного побережья Калининградского п-ова и южной части Балтийской косы.

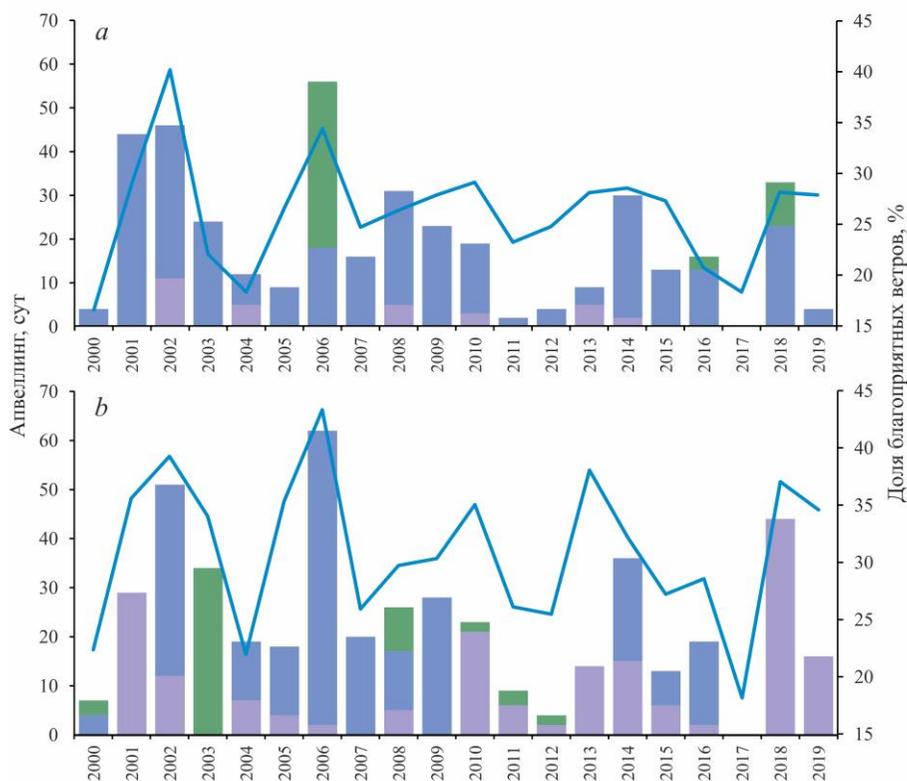


Р и с. 3. Ветровой режим в 2000–2019 гг. в западном (а) и северном (б) подрайонах ЮВБ. Розовой заливкой обозначены направления ветра, приводящие к экмановскому апвеллингу, светло-зеленой – к сгонному. Красные прямые – среднее направление береговой линии в области наибольшей повторяемости апвеллингов (участки побережья показаны слева). Цифрами по румбам подписана средняя повторяемость ветров за три дня до апвеллингов

F i g. 3. Wind regime in the western (a) and northern (b) subareas of SEB in 2000–2019. Pink shading indicates wind directions leading to the Ekman upwelling, light green one – wind directions leading to a surge upwelling. Red straight lines show the coastline average direction in the region of the highest upwelling frequency (coastline parts are given in the inset). Numbers on the direction points indicate the average frequency of winds three days before the upwellings occurred

Значительная межгодовая изменчивость апвеллингов (рис. 4) связана с изменчивостью благоприятных для их развития ветров. В целом за период отмечается уменьшение как среднегодового количества дней с апвеллингом, так и повторяемости благоприятных ветров. В 2000–2009 гг. доля благоприятных ветров составила в среднем 26,6% для западного подрайона и 31,8% – для северного, во втором десятилетии она уменьшилась до 25,6% и 30,2%

соответственно. Количество дней с апвеллингом уменьшилось во втором десятилетии на 47% в западном подрайоне и на 38% – в северном.



Р и с. 4. Межгодовая изменчивость повторяемости экмановских (сиреневые столбики), сгонных (синие столбики) и смешанных (зеленые столбики) апвеллингов и благоприятных ветров (синяя кривая) в западном (*a*) и северном (*b*) подрайонах

Fig. 4. Interannual variability in frequency of the Ekman (lilac columns), surge (blue columns) and mixed (green columns) upwellings and favorable winds (blue curve) in the western (*a*) and northern (*b*) subareas

Согласно рис. 4, наибольшее количество дней с апвеллингом в западном подрайоне в 2002 и 2006 гг. связано с меньшей долей (< 40%) повторяемости неблагоприятных ветров ЮЗ-З-СЗ направлений. При этом большая повторяемость ветров этих направлений, отмеченная в 2000 и 2017 гг. (~ 60%), нашла отражение в меньшем количестве дней с апвеллингом в эти годы. В отдельные годы, например в 2013 г., несмотря на большую повторяемость благоприятных ветров в июле, количество дней с апвеллингом не превышало среднегодовое значение. Существенная межгодовая изменчивость повторяемости апвеллингов также отмечается в других работах [18, 20, 22].

Сгонные апвеллинги, преобладающий тип апвеллингов в западном подрайоне (~ 80% всех случаев), там длились в среднем 8 дней, в северном подрайоне – > 11 дней. В северном подрайоне экмановские (т. е. возникающие во время воздействия вдольбереговых ветров) и сгонные апвеллинги

наблюдались одинаково часто – в 45% случаев, остальные 10% апвеллингов – смешанного типа. В [9] по данным по ветровому режиму за 5–7 дней до начала апвеллинга было показано, что сгонные апвеллинги в Юго-Восточной Балтике наблюдаются в 4–6% случаев, экмановские – в 93–96%.

При этом разделение апвеллингов на сгонные и экмановские зависит не только от того, какие метеоусловия будут признаны благоприятными для развития сгонного апвеллинга, а какие – для развития классического, но и также от топографических характеристик района исследования. Глубина прибрежной зоны, где апвеллинги наблюдаются наиболее часто, в северном подрайоне простирается до 30–50 м, в западном – до 20–30 м (см. рис. 2). Таким образом, отношение глубины моря к глубине слоя Экмана меняется в районах частых появлений отрицательных аномалий температуры в диапазоне 0,1–1,5, что подтверждает возможность развития апвеллингов разных типов.

Наблюдаемая межгодовая изменчивость характеристик апвеллингов отмечается и в декадном осреднении: в первом десятилетии дней с апвеллингом больше, во втором десятилетии большая доля апвеллингов приходится на экмановские за счет значительного увеличения их повторяемости в северном подрайоне – 71% во втором десятилетии против 20% в первом. В западном подрайоне доля экмановских апвеллингов не изменилась, незначительно увеличилась доля сгонных и уменьшилась доля смешанных апвеллингов. Внутри летнего сезона декадная изменчивость в западном подрайоне представлена следующим образом: в июне отмечен рост доли смешанных апвеллингов и уменьшение доли сгонных, в июле – наоборот, в августе изменений не наблюдалось. В северном подрайоне в июне и июле наблюдается значительное увеличение доли экмановских и уменьшение доли сгонных апвеллингов, в августе – увеличение доли экмановских и смешанных апвеллингов.

Для благоприятных ветров также отмечается внутрисезонная изменчивость: в западном подрайоне в июне – июле первого десятилетия вдольбереговой ветер наблюдается чаще, чем в августе, при этом он прослеживается значительно реже (в 3–4 раза) сгонного. В августе чаще, чем в другие месяцы, наблюдаются ветры сгонных направлений. Во втором десятилетии отмечено смещение максимальной повторяемости сгонных ветров на июль. В северном подрайоне в первом десятилетии преобладают вдольбереговые ветры в июне – июле и сгонные – в августе, во втором десятилетии также отмечено смещение максимума повторяемости сгонных ветров на июль. Декадная изменчивость внутри летнего сезона в западном подрайоне представлена следующим образом: в июне – уменьшение повторяемости сгонных ветров и увеличение – вдольбереговых, в июле – увеличение повторяемости ветров обоих типов, в августе – их уменьшение и значительно – сгонных. В северном подрайоне в июне и августе отмечено снижение повторяемости благоприятных ветров обоих типов, в июле – увеличение их повторяемости.

Значительное увеличение доли благоприятных для развития апвеллингов ветров в июле связано с очень высокими повторяемостями направлений в отдельные годы: например, в северном подрайоне в июле 2013 г. на вдольбереговые ветры (ССЗ – С) приходилось 34%; в 2014 г. на ветры ВСВ – В направлений – > 25%; в 2018 и 2019 гг. в этом месяце было отмечено > 30% вдоль-

береговых ветров и ~ 30% – сгонных. При этом повторяемость апвеллингов в июле снижалась.

Как отмечалось ранее [12], изменение ветрового режима в регионе Балтийского моря может быть связано с изменчивостью индексов крупномасштабной циркуляции. В частности, индекс *SCAND* отражает интенсивность развития антициклонической деятельности над Скандинавским п-овом, блокирующей зональный перенос, что в его положительной фазе приводит к усилению ветров северных румбов над акваторией Балтийского моря и, соответственно, – к увеличению количества апвеллингов в ЮББ. В период 2000–2019 гг. индекс изменяется в пределах $-2,33 \dots 2,48$, при этом в 2010–2019 гг. его отрицательная фаза наблюдается чаще.

Индекс *NAO* является показателем интенсивности зональной циркуляции во внетропической зоне Евразии, и в его положительную фазу наблюдается усиление западных ветров над акваторией. Этот индекс в период 2000–2019 гг. изменяется в пределах $-3,14 \dots 2,55$; в рассматриваемый период положительный индекс чаще наблюдается в июне (в половине случаев), реже всего – в августе.

Оценки коэффициентов корреляции показали, что связь средней силы отмечена у повторяемости апвеллингов юго-восточной части Балтийского моря в июне с индексом *SCAND* в мае ($r = 0,65$ для ЮББ и $r = 0,62$ для северного подрайона); при этом сильная связь прослеживается для западного подрайона ($r = 0,72$). Наглядно связь индекса *SCAND* в мае с количеством дней с апвеллингом в июне показана на графике (рис. 5).



Р и с. 5. Временная изменчивость значений индекса *SCAND* в мае (синяя кривая) и аномалии дней с апвеллингом в июне (розовые столбики) в 2000–2019 гг.

F i g. 5. Temporal variability of the *SCAND* index values in May (blue curve), and the anomalies of the upwelling days in June (pink columns) in 2000–2019

Повторяемость апвеллингов в июле не имела четко выраженных связей с атмосферными переносами. Максимальные связи отмечены между июньским индексом *NAO* и аномалией дней с апвеллингом (коэффициент корреляции составил 0,46). Вероятно, эта связь, возникающая в положительную фазу *NAO*, обуславливается увеличением количества циклонов (образующихся над Атлантическим океаном) над акваторией Балтийского моря, в тыловой части

которых усиливаются северные ветры, что приводит к увеличению частоты появления апвеллингов.

В августе коэффициент корреляции между аномалией дней с апвеллингом и индексом *SCAND* составил 0,6 (для ЮВБ и северного подрайона) и 0,66 (для западного подрайона), характеризую связь средней силы.

В работе [3] была отмечена слабая, но статистически значимая связь повторяемости апвеллингов с индексом *SCAND* на польском побережье для апреля – сентября 1982–2010 гг., а в работе [6] по данным для июня – августа 1982–2017 гг. было показано, что этот индекс оказывает наиболее сильное влияние по сравнению с другими на апвеллинги в Южной Балтике. Разница в оценке связи индекса *SCAND* с характеристиками апвеллингов в южной части Балтийского моря может свидетельствовать о том, что роль процессов, описываемых этим индексом, меняется во времени, что может быть связано с изменением климата [23]. Соответственно, крупномасштабная циркуляция воздействует на повторяемость апвеллингов в ЮВБ. Важным фактором, влияющим на интенсивность проявления апвеллингов в июне и августе, является повторяемость блокирующих западный перенос антициклонов, что подтверждает предположение о значительной роли глобальных процессов в развитии температурных аномалий в ЮВБ.

Заключение

Всего в ЮВБ за летний период 2000–2019 гг. было выделено 82 апвеллинга общей продолжительностью 546 дней: от одного дня в 2017 г. до 60 дней в 2006 г. Наиболее часто (~ 70%) апвеллинги длятся до 5 дней, при этом короткие апвеллинги чаще наблюдаются в июне – июле. В целом за период исследования отмечается уменьшение как среднегодового количества дней с апвеллингом, так и его среднесуточной площади. Количество дней с апвеллингом уменьшилось в 2010–2019 гг. по сравнению с 2000–2009 гг. на 47% в западном подрайоне и на 38% – в северном; среднесуточная площадь апвеллингов уменьшилась в двух подрайонах более чем в два раза.

Наблюдалась внутрисезонная изменчивость повторяемости апвеллингов на междекадном масштабе. Наибольшее количество дней с апвеллингом отмечалось в июле и августе 2000–2009 гг. Во втором десятилетии в эти месяцы было отмечено значительное – в 2–3 раза – уменьшение как продолжительности, так и площади апвеллингов, при этом уменьшение повторяемости благоприятных ветров составило ~ 4–5%.

В среднем в 2000–2009 гг. в районе исследования наблюдалось ~ 50% апвеллингов при сгонных ветрах, 25% – при вдольбереговых ветрах и 25% – при ветрах как вдольбереговых, так и сгонных направлений. Показана связь дней с апвеллингом в июне и августе с индексом *SCAND*, который описывает динамику блокировки зонального переноса и в положительной фазе приводит к увеличению повторяемости северных ветров. В 2010–2019 гг. отрицательная фаза индекса *SCAND* наблюдается чаще, что, возможно, и обуславливает уменьшение повторяемости апвеллингов.

Последующие работы будут направлены на расширенный анализ связи повторяемости апвеллингов с индексами крупномасштабной атмосферной циркуляции, что позволит в дальнейшем получить важные в практическом плане прогностические зависимости для оценки будущих характеристик апвеллингов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Голенко Н. Н., Голенко М. Н., Шука С. А.* Наблюдение и моделирование апвеллинга в Юго-Восточной Балтике // *Океанология*. 2009. Т. 49, № 1. С. 20–27. EDN IWDML0.
2. *Капустина М. В., Зимин 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. <https://doi.org/10.7868/S2073667321040055>
3. *Bednorz E., Pótrolniczak M., Czernecki B.* Synoptic conditions governing upwelling along the Polish Baltic coast // *Oceanologia*. 2013. Vol. 55, iss. 4. P. 767–785. <https://doi.org/10.5697/oc.55-4.767>
4. Мезомасштабная изменчивость апвеллинга в Юго-Восточной Балтике: ИК-изображения и численное моделирование / В. М. Журбас [и др.] // *Океанология*. 2004. Т. 44, № 5. С. 660–669. EDN OWLNWR.
5. *Есюкова Е. Е., Чубаренко И. П., Стоит Ж. И.* Апвеллинг или дифференциальное выхолаживание? Анализ спутниковых ТПМ-изображений юго-восточной части Балтийского моря // *Водные ресурсы*. 2017. Т. 44, № 1. С. 28–37. <https://doi.org/10.7868/S0321059617010047>
6. Atmospheric forcing of coastal upwelling in the southern Baltic Sea basin / E. Bednorz [et al.] // *Atmosphere*. 2019. Vol. 10, iss. 6. 327. <https://doi.org/10.3390/atmos10060327>
7. 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. 101707. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101707>
8. *Lehmann A., Myrberg K.* Upwelling in the Baltic Sea – A review // *Journal of Marine Systems*. 2008. Vol. 74, suppl. P. S3–S12. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.02.010>
9. *Есюкова Е. Е., Стоит Ж. И., Чубаренко И. П.* Характерные проявления прибрежного апвеллинга и каскадинга по данным космического зондирования юго-восточной части Балтийского моря // *Известия КГТУ*. 2014. № 35. С. 21–31. EDN SZGITX.
10. *Hela I.* Vertical velocity of the upwelling in the sea // *Commentationes Physico-Mathematicae*. 1976. Vol. 46, iss. 1. P. 9–24.
11. Observations of surface drift and effects induced by wind and surface waves in the Baltic Sea for the period 2011–2018 / N. Delpeche-Ellmann [et al.] // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2021. Vol. 249. 107071. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.107071>
12. Climate change in the Baltic Sea region: a summary / H. E. M. Meier [et al.] // *Earth System Dynamics*. 2022. Vol. 13, iss. 1. P. 457–593. <https://doi.org/10.5194/esd-13-457-2022>
13. Recent Change – Atmosphere / A. Rutgersson [et al.] // *Second assessment of climate change for the Baltic Sea basin* / Eds. The BACC II Author Team. Cham : Springer, 2015. P. 69–97. (Regional Climate Studies). https://doi.org/10.1007/978-3-319-16006-1_4
14. *Бычкова И. А., Викторов С. В., Шумахер Д. А.* О связи крупномасштабной атмосферной циркуляции и процессов возникновения прибрежного апвеллинга в Балтийском море // *Метеорология и гидрология*. 1988. № 10. С. 91–98.
15. *Bednorz E., Pótrolniczak M., Tomczyk A. M.* Regional circulation patterns inducing coastal upwelling in the Baltic Sea // *Theoretical and Applied Climatology*. 2021. Vol. 144. P. 905–916. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03539-7>
16. *Lehmann A., Krauss W., Hinrichsen H.-H.* Effects of remote and local atmospheric forcing on circulation and upwelling in the Baltic Sea // *Tellus A*. 2002. Vol. 54, iss. 3. P. 299–316. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0870.2002.00289.x>
17. *Myrberg K., Andrejev O., Lehmann A.* Dynamic features of successive upwelling events in the Baltic Sea – a numerical case study // *Oceanologia*. 2010. Vol. 52, iss. 1. P. 77–99. <http://dx.doi.org/10.5697/oc.52-1.077>
18. *Lehmann A., Myrberg K., Höflich 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>

19. *Gidhagen L.* Coastal upwelling in the Baltic – a presentation of satellite and in situ measurements of sea surface temperatures indicating coastal upwelling. Sweden : Norrköping, 1984. P. 1–37. (SMHI Reports Hydrology and Oceanography ; nr. 37).
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. *Lehmann A., Getzlaff K., Harlaß J.* Detailed assessment of climate variability in the Baltic Sea area for the period 1958 to 2009 // *Climate Research*. 2011. Vol. 46, no. 2. P. 185–196. <https://doi.org/10.3354/cr00876>
22. *Myrberg K., Andrejev O.* Main upwelling regions in the Baltic Sea – a statistical analysis based on three-dimensional modelling // *Boreal Environment Research*. 2003. Vol. 8, no. 2. P. 97–112.
23. Three Eurasian teleconnection patterns: spatial structures, temporal variability, and associated winter climate anomalies / Y. Liu [et al.] // *Climate Dynamics*. 2014. Vol. 42. P. 2817–2839. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2163-z>

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**, 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**, zimin2@mail.ru