УДК 551.468

© *М. В. Капустина*[1]*, *А. В. Зимин*[1,2], 2021

[1]Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Нахимовский пр., д. 36, г. Москва, Россия
[2]Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Университетская наб., 7–9, г. Санкт-Петербург, Россия
*E-mail: kapustina.mariya@ya.ru

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АПВЕЛЛИНГОВ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКЕ В 2010–2019 ГГ.

Статья поступила в редакцию 17.06.2021, после доработки 23.09.2021

В работе представлены результаты верификации и применения предложенного автоматического алгоритма определения апвеллинга по данным реанализа CMEMS Baltic Sea Physical Reanalysis product в юго-восточной части Балтийского моря за 2010–2019 гг. Верификация работы алгоритма выполнена по данным многомесячных наблюдений на морской ледостойкой стационарной платформе D6, судовым данным, полученным в 127-м рейсе НИС «Профессор Штокман» в 2014 г., и результатам выделения апвеллинга по температуре поверхности моря по данным спектрорадиометра MODIS Terra/Aqua. Показано, что наименьшая повторяемость апвеллингов наблюдается в августе-сентябре (5–6 дней в год), наибольшая — в мае — июне и октябре (11–15 дней в год). В период 2010–2013 гг. в исследуемом районе наблюдалось в среднем до 10 % отрицательных термических аномалий в теплый период года. С 2014 г. (за исключением 2017 г.) отмечено увеличение повторяемости апвеллингов — в среднем, около 20 % дней составляли дни с апвеллингом. Показано, что зимние индексы колебания Восточная Атлантика — Западная Россия, восточноатлантического колебания и весенний индекс скандинавского колебания могут быть использованы для оценок характеристик будущего летнего апвеллинга.

Ключевые слова: прибрежный апвеллинг, температура поверхности моря, юго-восточная часть Балтийского моря.

© *M. V. Kapustina*[1]*, *A. V. Zimin*[1,2]

[1]Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 117997, Nahimovskiy prospekt, 36, Moscow, Russia
[2]St. Petersburg State University, 199034, 7–9, Universitetskaya Nab., St. Petersburg, Russia
*E-mail: kapustina.mariya@ya.ru

UPWELLING SPATIOTEMPORAL CHARACTERISTICS IN THE SOUTHEASTERN BALTIC SEA IN 2010–2019

Received 17.06.2021, in final form 23.09.2021

The article presents the results of verification and application of the proposed automatic algorithm of upwelling detection and presents the results of its work based on the CMEMS Baltic Sea Physical Reanalysis product in the southeastern part of the Baltic Sea for 2010–2019. The algorithm was verified by using the data of observations on the offshore ice-resistant stationary platform D-6, ship data obtained in the 127th cruise of the research vessel “Professor Shtokman”, and the results of upwelling detection based on the sea surface temperature derived from measurements of the MODIS Terra/Aqua spectroradiometer. It is shown that the lowest frequency of upwellings is observed in August-September (5–6 days per year), the highest — in May — June and October (11–15 days per year). In the period 2010–2013 in the study area, on average, up to 10 % of negative thermal anomalies were observed during the warm period of the year. Since 2014 (with the exception of 2017), an increase in the frequency of upwellings has been noted — on average, about 20 % of days were days with upwelling. It is shown that the winter East Atlantic/West Russia and East Atlantic indices and the spring Scandinavia pattern index can be used to assess the characteristics of the future summer upwelling.

Key words: coastal upwelling, sea surface temperature, southeastern Baltic Sea.

Ссылка для цитирования: *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. doi: 10.7868/S2073667321040055

For citation: *Kapustina M.V.*, *Zimin A.V.* Upwelling Spatiotemporal Characteristics in the Southeastern Baltic Sea in 2010–2019. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2021, 14, 4, 52–63. doi: 10.7868/S2073667321040055

1. Введение

Акватория Калининградской области расположена в юго-восточной части Балтийского моря и включает в себя мелководное побережье Калининградского полуострова, Куршской и Балтийской кос. Разнонаправленность береговой линии и мелководность некоторых участков в этой части моря делает возможным возникновение апвеллингов при ветрах разных направлений. При этом явлении наблюдается поднятие в поверхностный слой холодных вод, насыщенных биогенными элементами, что может оказывать влияние на эксплуатацию прибрежной зоны в части возможностей хозяйственного и рекреационного использования. Кроме того, исследование особенностей мезомасштабной циркуляции является чрезвычайно актуальным, так как эти процессы в значительной степени определяют экологическое и гидродинамическое состояние прибрежных зон: перенос загрязняющих веществ, в том числе нефтяного загрязнения, биогенных элементов, а отмечающееся в последние годы увеличение повторяемости штормовых ветров и ветров северных и северо-западных румбов [1], может приводить к увеличению повторяемости апвеллингов в исследуемом районе. Соответственно, сведения о повторяемости во времени и пространстве явления апвеллинга нужны для решения широкого спектра прикладных задач, возникающих при рассмотрении вопросов рационального использования акватории Калининградской области.

Представление об особенностях динамики вод в процессе развития апвеллинга в Балтийском море освещены в ряде работ, основанных как на модельных расчетах, так и на данных натурных наблюдений [2–12].

Прибрежный апвеллинг в пределах исследуемой акватории происходит довольно часто [9–10, 13]. Это явление наблюдается во время действия ветров вдольбереговых направлений: северного, северо-восточного и восточного, и сгонных ветров. Среднегодовая повторяемость сильных апвеллингов (с вертикальными скоростями подъема вод более 10^{-4} м/с) по данным гидродинамического моделирования составляет около 5–7 % [8]. В работе [10] был проведен статистический анализ повторяемости апвеллингов на основе анализа спутниковых данных за 1990–2009 гг. Повторяемость апвеллингов в Юго-Восточной Балтике (ЮВБ) составила около 5–10 %. Анализ данных трехмерной численной модели BSIOM с использованием автоматических методов идентификации апвеллингов с порогом в 2 °C показал хорошую корреляцию визуального и автоматического методов.

Однако пространственно-временные характеристики апвеллингов в описываемом регионе различаются по данным разных исследователей. Например, с 2000 по 2014 гг. по спутниковым данным [14] выявлено 135 событий апвеллинга, произошедших в данном районе в период с мая по октябрь. А в работе [11] за апрель-сентябрь 2000–2015 гг. было выделено 69 событий апвеллинга. Повторяемость подъема холодных вод вдоль польского побережья по спутниковым данным за 1990–2009 гг. [10] составила около 10–15 %, по данным моделирования [12] за май-сентябрь 2010–2016 гг.— до 20 %; около 10–15 % вдоль побережья Латвии и Эстонии [10] и около 5 % вдоль побережья Литвы и Латвии [12]. Подобные различия связаны не только с некоторыми пространственными и временными различиями анализируемых данных, но и с разницей применяемых методов.

Для автоматического выделения апвеллинговых зон по данным температуры поверхности моря (ТПМ) чаще всего применяются методы, которые сводятся к сегментации изображения (разбиение изображения на ряд однородных областей в соответствии с заданными критериями (например, [15]). В [16] была сделана попытка оценить степень проявления апвеллинга на поверхности моря на основе индекса термохалинной аномалии, который характеризует отклонения температуры и солености в данной точке от среднемноголетнего климатического состояния поверхностных вод в регионе. В Балтийском море автоматическое выделение апвеллинговых зон проводилось по данным моделирования [5, 12]. Однако простой верифицированной для ЮВБ методики автоматического выделения апвеллинговых зон пока нет.

Целью данной работы является статистическая оценка пространственно-временных масштабов апвеллингов в ЮВБ по данным реанализа в 2010–2019 гг. на основе предложенного авторами метода идентификации термических аномалий.

2. Материалы и методы

Исходные данные. Расчёт повторяемости термических аномалий в ЮВБ производился по данным реанализа CMEMS Baltic Sea Physical Reanalysis product [17] — ежесуточные данные о температуре воды на глубине 1.5 м на регулярной сетке с размером ячейки 4 × 4 км. Этот реанализ создан с использованием модели NEMO-Nordic со схемой ассимиляции данных LSEIK. В ассимиляции данных включены ТПМ (спутниковые

данные уровня L4) и профили температуры и солености. Среднее отклонение по температуре для зависимых наблюдений составляет менее 0.1 °C [18]. Были использованы данные с мая по октябрь 2010–2019 гг. для акватории ЮВБ, ограниченной координатами 19.236–21.20°в.д., 54.30–55.725°с.ш. (рис. 1, район, отмеченный заливкой), и зоны открытого глубоководного моря (расстояние до берега 70 и более км) с координатами 18.90–19.68°в.д., 55.558–56.00°с.ш. (рис. 1, заштрихованный квадрат).

Для валидации временной изменчивости температуры на шельфе по данным реанализа и верификации алгоритма были использованы данные термокосы, установленной на платформе D6 (рис. 1) в прибрежной зоне Балтийского моря (глубина в месте установки 29 м) [19, 20]. Термодатчики с точностью ±0.025 °C располагались на горизонтах –1, 0, 1, 3, 5, 8, 10, 13, 24 и 28 м; были использованы данные наблюдений, выполненных с августа 2015 г. по август 2019 г.

Для пространственной верификации результатов работы алгоритма использовались судовые данные, полученные в 127-м рейсе НИС «Профессор Штокман» 26 июля 2014 г. на станциях гидрологического разреза через Гданьскую впадину вдоль польской границы ИЭЗ в российской зоне. Зондирования проводились гидрологическим комплексом Oseanscience UnderwayCTD.

Для анализа локальных ветровых условий в исследуемом регионе были использованы данные метеостанций Балтийск и Пионерский [21, 22] за период май — октябрь 2010–2019 гг. Дополнительно для исследования связи характеристик апвеллинга в регионе с глобальными колебаниями в системе океан-атмосфера привлекались индексы крупномасштабной атмосферной циркуляции внетропической зоны Северного полушария: NAO (североатлантическое колебание) [23], SCAND (Скандинавия) [24], EA/WR (Восточная Атлантика/Западная Россия) [25] и EA (Восточная Атлантика) [26]. Индексы использовались с осреднением по сезонам: зима — декабрь–февраль, весна — март–май.

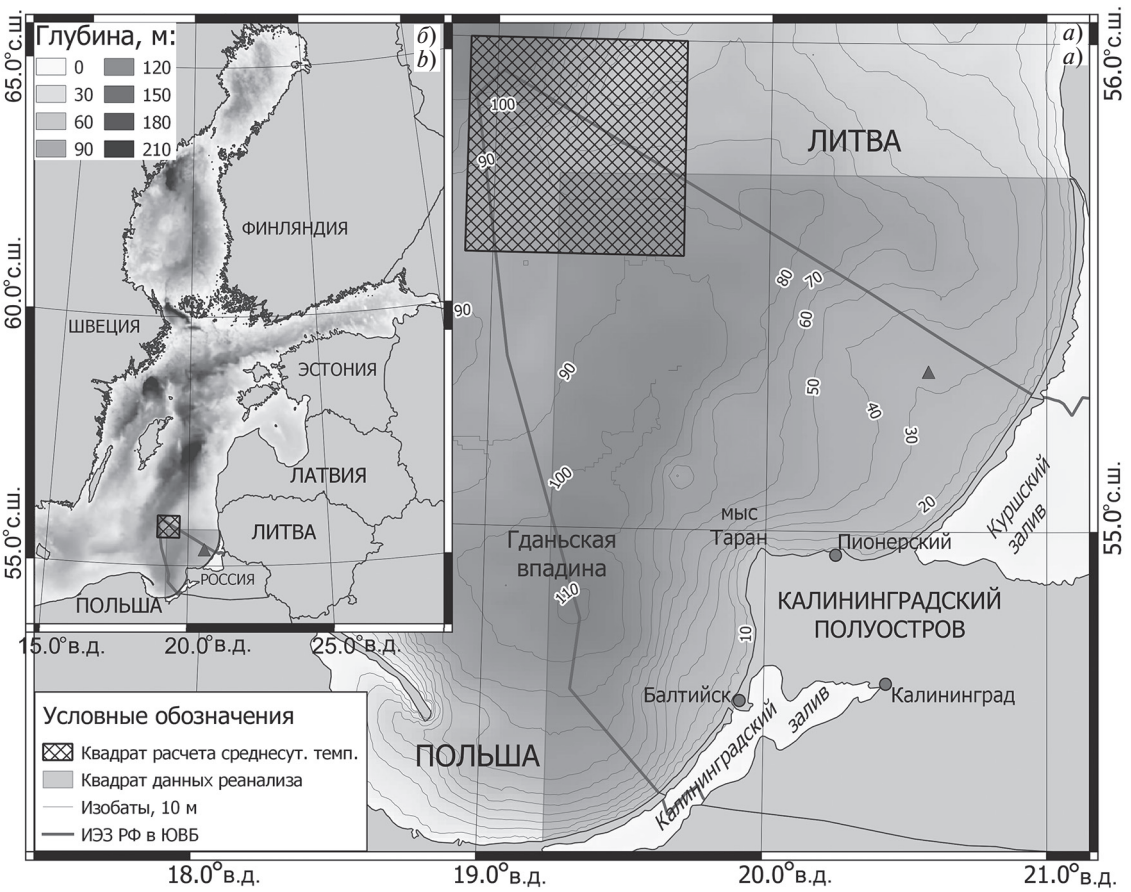

Рис. 1. Карта глубин ЮВБ (*а*), на врезке карта Балтийского моря (*б*). Район исследований обозначен прямоугольником. Треугольником показано расположение МЛСП D6, на которой установлена термокоса.

Fig. 1. Bathymetry of the southeastern part of the Baltic Sea (*a*), in the inset map of the Baltic Sea (*b*). The study area is marked with a shaded rectangle. The triangle shows the location of the D6 platform with installed thermistor chain.

Независимая валидация данных реанализа осуществлялась для оценки качества воспроизведения реанализом температуры воды в исследуемом регионе. Она выполнялась на основе сопоставления (расчета корреляции) температуры воды по данным реанализа в ячейке с координатами центра 55.325°с.ш. и 20.570°в.д. на глубине 1.5 м с температурой воды на глубине 1 м по данным термокосы, установленной на платформе D6, с суточным усреднением результатов наблюдений за май–октябрь 2016 г. При оценке силы связи коэффициентов корреляции использовалась шкала Чеддока: сила связи между переменными более 0.9 считалась очень высокой.

Метод идентификации термических аномалий был разработан для идентификации областей пониженной температуры в прибрежной зоне ЮВБ. Методика расчета была следующей: для зоны открытого глубоководного моря (черный квадрат на рис. 1) рассчитывалась средняя суточная температура поверхности моря, затем полученные значения вычитались из температуры воды в каждой ячейке массива данных. Полоса воды у берега, в которой отмечалось значение температуры меньше средней температуры воды области открытого моря на пороговое значение (отрицательная аномалия), отмечалась как зона апвеллинга. Пороговым значением было выбрано значение 1 °C, в соответствии с оценками разницы температуры воды между зоной апвеллинга и окружающими водами, представленными в [14, 20]. Наличие зоны отрицательной аномалии хотя бы в одну ячейку температуры воды отмечалось как наличие апвеллинга в эту дату.

По приведенному алгоритму оценивалась продолжительность и повторяемость апвеллингов для двух районов, разделенных мысом Таран (рис. 1): западное побережье Калининградского полуострова совместно с побережьем Балтийской косы (район «Западный»), побережье Куршской косы совместно с северным побережьем Калининградской области (район «Северный»). Отдельно повторяемость рассчитывалась для всей ЮВБ для тех случаев, когда апвеллинг наблюдался в обоих районах одновременно, и для тех дней, когда апвеллинг наблюдался в любом из районов. Повторяемость апвеллингов для каждого района рассчитывалась в днях, когда наблюдался апвеллинг в один из месяцев и в теплый период заданного года; в событиях — наблюдаемое наличие ячеек апвеллинга в прибрежной зоне одного из районов продолжительностью от одного дня; в процентах — доля дней теплого периода года, когда в заданном районе прибрежной зоны шириной в одну ячейку реанализа наблюдался апвеллинг. Для тех же районов оценивались средние за каждый месяц (для периода 2010–2019 гг.) и средние за каждый год площади апвеллингов. Они рассчитывались как сумма площадей ячеек, в которых наблюдалась отрицательная аномалия за рассматриваемый период, деленная на количество дней с апвеллингом за исследуемый период.

Верификация алгоритма автоматической идентификации апвеллингов. Выполнялась по разным наборам данных: пространственная картина верифицировалась путем сопоставления дат апвеллингов в 2014 г., выделенных визуально по спутниковым данным ТПМ уровня L2 (MODIS Terra/Aqua) [27] с датами, полученными методом автоматической идентификации. Характер вертикальной структуры вод в ситуации апвеллинга по данным реанализа верифицировался путем прямого сопоставления с данными наблюдений за 2015–2019 гг. на платформе D6 и в 127-м рейсе НИС «Профессор Штокман». Зона апвеллинга по этим данным определялась по подъёму холодных вод и сгущению изотерм на разрезе.

Анализ метеорологических условий. Было проведено сопоставление повторяемости и площади апвеллингов с процессами разного масштаба в атмосфере. Для анализа особенностей местных условий привлекались данные метеостанций Балтийск и Пионерский, по которым были построены розы ветров, на основании которых были получены оценки повторяемости (%) и средней скорости (м/с) вдольбереговых и сгонных ветров для разных районов на месячных и годовых интервалах осреднения. Для оценки влияния глобальных атмосферных процессов на характеристики апвеллинга за летний период каждого года (2010–2019 гг.) в анализе были использованы зимние (средние за декабрь — январь) и весенние (средние за март–май) индексы крупномасштабной циркуляции в северном полушарии (NAO, SCAND, EA/WR, EA). По рядам индексов и характеристикам апвеллинга (сумма площадей, продолжительность) и дней с отрицательными аномалиями температуры были рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона для каждого индекса.

3. Результаты

Валидация данных и верификация алгоритма. Результаты сопоставления данных реанализа и термокосы за май — октябрь 2016 г. показали наличие значимого коэффициента корреляции, который составил 0.96. Доверительный интервал коэффициента корреляции составил от 0.94 до 0.97. Среднее значение и стандартная ошибка среднего для данных реанализа составили 15.62 и 0.28, для данных термокосы — 15.24 и 0.30 соответственно. Верификация алгоритма за период с августа 2015 по август 2019 гг. показала в целом совпадение по времени отрицательных аномалий, выделенных алгоритмом автоматической идентификации,

и явлений подъема холодных вод к поверхности в районе платформы D6. В качестве примера на рис. 2 приведены результаты сопоставления данных термокосы и карт выделенных районов апвеллинга за июнь — июль 2018 г. Так, 27 июня апвеллинг не обнаруживался около платформы D6 ни по термокосе, ни на карте; 3 июля апвеллинг наблюдался и по данным контактных измерений, и по результатам работы алгоритма; 10 июля апвеллинг не наблюдался по обоим типам данных.

Результаты сопоставления пространственных (судовых) данных и работы алгоритма представлены на рис. 3. Судовые данные (см. врезку на рис. 3) свидетельствуют о наличии апвеллинга в исследуемом районе. Его граница прослеживается в поверхностном слое по вертикально поднимающимся к поверхности изотермам между 22 и 21 станциями разреза. При наложении данных разреза на карту (рис. 3, см. вклейку) видно, что алгоритм относит границу зоны холодной аномалии вод на 4–5 км дальше в открытую часть моря. Расхождение соответствует длине одной ячейки, используемой при расчетах области апвеллинга. Это, скорее всего, связано с масштабами используемых для сопоставления данных, так как разрез построен по данным разовых измерений, а алгоритм применялся к данным, осредненным за сутки. Соответственно, можно считать, что выделяемая зона удовлетворительно соотносится с данными натурных измерений.

Представление о корректности работы автоматического алгоритма выделения апвеллинга во времени на всей рассматриваемой акватории можно получить путем сравнения с результатами работы [27] за май — октябрь 2014 г., результаты которого представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что в целом ситуации, ассоциируемые с апвеллингом, с помощью алгоритма автоматической идентификации выявляются несколько чаще, чем при использовании метода экспертных оценок. Отмеченные различия связаны с тем, что в работе [27] использовали спутниковые данные о ТПМ, получение которых зависит от гидрометеорологических условий над акваторией. Анализ снимков за периоды, в которые наблюдались расхождения в оценках наличия явления апвеллинга, показал, что в эти даты преимущественно наблюдалась облачность. Кроме того, причиной несовпадения оценок может являться разный масштаб осреднения используемых данных.

Резюмируя результаты верификации методики различными данными, можно утверждать, что алгоритм автоматической идентификации, примененный к данным CMEMS Baltic Sea Physical Reanalysis product, позволяет получать постоянные и достоверные сведения о наличии или отсутствии явления апвеллинга в ЮВБ.

Повторяемость апвеллингов за период 2010–2019 гг. Результаты оценки повторяемости продолжительности апвеллингов за исследуемый период представлены в табл. 2. Проведенный анализ позволил выявить 91 апвеллинг в районе «Западный», 84 апвеллинга — в районе «Северный», одновременно в обоих районах

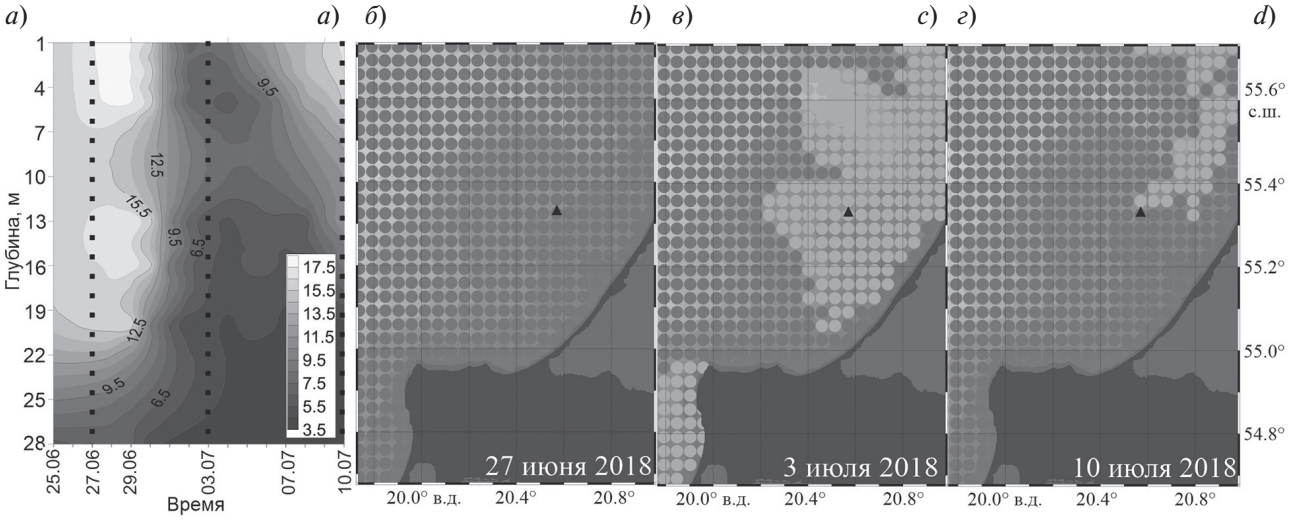

Рис. 2. Проявление апвеллинга в данных временной развертки температуры по глубинам в области платформы D6 (*а*) и на картах района исследований, построенных на основании применения алгоритма автоматической идентификации за 27 июня (*б*), 3 июля (*в*) и 10 июля (*г*) 2018 г. На картах *б–г* светлыми кругами обозначена зона апвеллинга, темными — зона вне апвеллинга, черными треугольниками — положение платформы D6.

Fig. 2. Manifestation of upwelling in the data of the temporal sampling of temperature in the area of the D6 platform (*a*) and on the maps of the study area, built on the automatic identification algorithm data for June 27 (*b*), July 3 (*c*) and July 10 (*d*), 2018. On maps *b–d*, light circles indicate the upwelling zone, dark circles — the area outside the upwelling, black triangles — the position of the D6 platform.

Таблица 1

Периоды апвеллингов в 2014 г. в ЮВБ по [27] и по результатам применения алгоритма автоматической идентификации

Upwellings in 2014 in the southeastern part of the Baltic Sea according to [27] and according to the results of applying an automatic detection algorithm

Месяц	Даты апвеллингов по [27], полученные на основе экспертных оценок по данным ТПМ	Даты апвеллингов, полученные на основе применения автоматического алгоритма
Май	03.05–06.05 19.05–31.05	02.05–03.05 16.05–21.05 24.05 27.05–31.05
Июнь	5.06–8.06 15.06–18.06	01.06–05.06 11.06–12.06 15.06–19.06
Июль	9.07–15.07 19.07–31.07	09.07–14.07 20.07–31.07
Август	01.08–09.08	01.08–11.08 18.08
Сентябрь	15.09–21.09 26.09	12.09 15.09–30.09
Октябрь	24.10–30.10	01.10–03.10 06.10–18.10 24.10–27.10 31.10

ЮВБ за 2010–2019 гг. апвеллинг наблюдался 69 раз. Продолжительность апвеллингов варьировала от одного до 61 дня (наблюдался вдоль Куршской косы в мае — июне 2019 г.). Чаще всего апвеллинги продолжались от одного до пяти дней — почти четверть апвеллингов продолжалась менее пяти дней, 6–10 дней — 15 % апвеллингов, 11–15 дней продолжалось около 0.5 % апвеллингов теплого периода 2010–2019 гг.

Частота апвеллинга за 2010–2019 гг. в прибрежной зоне ЮВБ шириной в одну ячейку данных реанализа (4 км) невелика — в среднем около 12.9±2.1 % дней в теплый период года (май — октябрь) отмечены отрицательными аномалиями температуры, для района «Северный» эта цифра чуть больше — 13±2.4 %, для района «Западный» составляя 12.6±1.9 %. Представления о пространственной изменчивости встречаемости отрицательных аномалий температуры, идентифицируемых как проявление апвеллинга, можно получить из рис. 4 (см. вклейку). Чаще всего апвеллинг наблюдается вдоль Куршской косы — в северной ее части и в районе пос. Рыбачий, и на западном побережье Калининградского п-ова. Нередки случаи, когда апвеллинг, отмечающийся вдоль Куршской косы, распространяется с севера, зарождаясь на побережье Литвы или даже Латвии. На западном побережье при определенных условиях наблюдаются филаменты апвеллинга,

Таблица 2

Повторяемость продолжительности апвеллингов, категории по 5 дней

Frequency of upwelling duration, categories of 5 days

Интервал, дней \ Район	ЮВБ (один район или оба)	ЮВБ (оба района одновременно)	Район «Западный»	Район «Северный»
1–5	68	55	68	62
6–10	16	9	14	13
11–15	6	3	6	4
16–20	3	1	1	2
21–25	1		1	
26–30	1	1	1	1
31–35	2			1
61	1			1

которые распространяются с северного побережья, огибая м. Таран. Наибольшую площадь апвеллинг достигает в районе плато Рыбачий, что связано с особенностями топографии дна этой части акватории. Зона интенсивного апвеллинга в этом месте была описана по данным спутниковых изображений, воспроизведена в численной модели и объяснена наличием топографической особенности плато в статье [6].

Внутригодовая изменчивость. Представления о средних характеристиках апвеллингов и особенностях ветрового режима по месяцам можно получить из табл. 3. Наибольшая продолжительность, повторяемость и площадь апвеллингов в обоих районах наблюдается в мае — июне и октябре, наименьшая — в августе и сентябре (табл. 3). Это, вероятно, связано с толщиной верхнего квазиоднородного слоя, который в августе-сентябре в прибрежной зоне может доходить до дна [28]. Средняя площадь апвеллинга в районе «Западный» меньше площади в районе «Северный», что связано с геоморфологическими особенностями этой акватории (рис. 4). В целом внутригодовая изменчивость характеристик апвеллинга выглядит следующим образом: постепенное уменьшение повторяемости и площади апвеллинга с мая — июня к августу, и резкий рост повторяемости термических аномалий в октябре. Увеличение повторяемости и площади отрицательных аномалий ТПМ в конце рассматриваемого периода может быть связано как с увеличением повторяемости сгонных и вдольбереговых ветров и увеличением их скорости (табл. 3), так и с осенним выхолаживанием воды в прибрежной зоне. Для того чтобы определить природу этого выхолаживания, необходимо дополнительно проводить анализ метеорологических или спутниковых [14] данных для каждого события понижения температуры.

Экмановский апвеллинг возникает при длительном воздействии вдольберегового ветра, сгонный — для ветра, направленного от берега. Для западного побережья Калининградской области вдольбереговыми ветрами являются северный и восточный направления ветра, соответственно. На западном побережье Калининградского полуострова в мае — июле большая повторяемость отмечена для вдольберегового ветра (повторяемость ветра этого направления составляет более 10 %), в августе — октябре — для сгонного (более 11 %). На северном побережье наибольшая повторяемость вдольбереговых восточных и сгонных южных ветров наблюдается в мае, сентябре и октябре (табл. 3).

Таблица 3

Среднемесячные характеристики апвеллингов в ЮВБ и ветра на станциях Балтийск и Пионерский за май–октябрь 2010–2019 гг.*

Frequency of upwellings in May — October in the southeastern Baltic Sea and upwelling-favorable wind frequency and velocity for 2010–2019 at stations Baltiysk and Pionerksiy*

Месяц		Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
ЮВБ (один район или оба)	% дней в месяц	37.1	35.7	28.1	16.1	20.0	**48.7**
Район «Западный»		46.8	38.5	35.8	23.5	71.4	**80.9**
Район «Северный»		20.7	**25.5**	20.4	17.1	3.4	13.6
ЮВБ (один район или оба)	событий	1.8	1.9	1.8	1	1.8	**2.7**
	дней	11.5	10.7	8.7	5	6	**15.1**
	тыс. км^2	0.81	**1.79**	0.99	0.63	0.11	1.3
ЮВБ (оба района одновременно)	событий	**1.9**	1.2	1.4	0.9	0.5	**1.7**
	дней	6.1	**6.4**	5.1	2.2	1.4	**6.2**
Район «Западный»	событий	**2.3**	1.6	1.6	0.9	1.4	**2.2**
	дней	7.7	6.9	6.5	3.2	5	**10.3**
	тыс. км^2	0.28	0.54	0.53	**0.61**	0.08	0.38
Район «Северный»	событий	1.5	1.5	1.6	1.1	1.1	**2.5**
	дней	9.7	9.8	7.3	4	2.4	**11**
	тыс. км^2	0.74	**1.57**	0.71	0.3	0.11	**1.44**
Район «Западный». Повторяемость (сверху,%) и средняя скорость ветра (снизу, м/с) по данным метеостанции Балтийск	Вдольберегов-ой ветер	**11.4** 2.8	9.2 2.7	**11.1** 2.5	5.2 2.4	4.8 3.3	2.2 **3.8**
	Сгонный ветер	11.6 2.3	7.3 2.4	7 2.3	8.6 1.9	**12.7** 2.4	**12.6** **2.8**
Район «Северный». Повторяемость (сверху,%) и средняя скорость ветра (снизу, м/с) по данным метеостанции Пионерский	Вдольберегов-ой ветер	5.7 **2.7**	3.4 2.2	3.6 2.3	4 2.3	5.5 2.3	**7.6** **2.8**
	Сгонный ветер	4.1 2.0	3.1 1.7	2.5 1.8	5.9 1.8	5.1 1.9	**8.1** 2.2

*Минимальные значения параметра показаны подчеркнутым шрифтом, максимальные — жирным.

Таблица 4

Межгодовая изменчивость характеристик апвеллингов в ЮВБ и ветра в 2010–2019 гг. на станциях Балтийск и Пионерский*

Frequency of upwellings in the southeastern Baltic Sea and upwelling-favorable wind frequency and velocity for warm period of 2010–2019 at stations Baltiysk and Pionerskiy*

Год		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
ЮВБ (один район или оба)	событий	11	5	9	**17**	13	9	10	9	5	10
	дней	58	26	22	46	**94**	61	76	29	67	**91**
	тыс. км^2	0.42	0.32	0.17	0.41	0.77	0.56	**2.57**	0.1	1.58	1.54
	% дней в год	8±4.6	4.4±3.8	2.1±2.5	6.1±4	22.4±10.1	13.1±7.1	19.3±4.7	1.6±2.6	21.2±14.2	**30.9±13.6**
ЮВБ (оба района одновременно)	событий	9	5	1	5	**11**	7	7	5	8	**11**
	дней	24	10	1	11	**47**	24	44	7	**49**	**50**
Район «Западный»	событий	10	6	4	10	**13**	10	9	9	8	12
	дней	44	15	7	26	77	47	**61**	19	49	51
	тыс. км^2	0.28	0.13	0.11	0.23	**0.52**	0.41	0.44	0.1	0.37	**0.55**
	% дней в год	9.2±2.9	2.6±1.9	1.2±1.1	5.3±2.4	**27±13.4**	18.7±6	21.5±4.7	2.1±2.3	13.2±12.6	25.1±13.2
Район «Северный»	событий	12	4	6	12	**13**	8	10	5	5	9
	дней	38	21	17	31	64	38	59	17	67	**90**
	тыс. км^2	0.33	0.3	0.17	0.43	0.51	0.39	**2.86**	0.05	1.31	1.24
	% дней в год	7.2±5.3	5.6±4.3	2.7±2.9	6.6±4.8	19.4±5.5	9.4±5.1	17.8±4.1	1.2±2.8	26.4±12.8	**34.6±12.6**
Район «Западный». Повторяемость (сверху, %) и средняя скорость ветра (снизу, м/с) по метеостанции Пионерский	Вдольбереговой ветер	9.7 2.7	5.5 2.6	6 2.8	8 **3.1**	4.8 2.8	9.7 2.8	3.2 2	5.3 2.6	**12.6** 2.8	8 2.7
	Сгонный ветер	4.8 2.1	3.8 2.0	7 2.3	9.6 2.3	15.7 2.5	5.8 1.7	**21** **2.8**	16.3 2.5	9.2 2.1	9.6 2.5
Район «Северный». Повторяемость (сверху, %) и средняя скорость ветра (снизу, м/с) по метеостанции Пионерский	Вдольбереговой ветер	6.9 **3.2**	4.1 2.4	3.2 **2.9**	5.4 2.6	8.8 2.7	1.1 1.5	**9.8** 2.2	5.6 1.7	2.2 2.0	3 1.8
	Сгонный ветер	4.1 **2.4**	4.9 **2.3**	5.7 2.1	2.5 2.1	**7.2** **2.2**	5.1 2.1	3.2 1.4	4.4 1.6	5.2 1.5	4.6 1.4

*Минимальные значения параметра показаны подчеркнутым шрифтом, максимальные — жирным.

Межгодовая изменчивость. За исследуемый период повторяемость и площадь апвеллингов варьировала от года к году, с 2014 г. отмечено резкое увеличение как количества событий, так и их площади (табл. 4), при этом наибольшие значения этих параметров наблюдались в 2014, 2018 и 2019 гг.

Наибольшее количество дней понижение температуры в районе «Западный» наблюдалось в 2014 г. (77 дней в течение теплого периода), меньше всего — в 2012 и 2011 гг. (7 и 15 дней соответственно). В районе «Северный» апвеллинг длился максимум 90 дней (в 2019 г.), меньше всего продолжительность апвеллинга составляла 17 дней — в 2012 и 2017 гг. При этом чаще всего в обоих районах апвеллинг отмечался в 2014 г., реже всего — в 2012 г. (район «Западный») и в 2011 г. (район «Северный»). В среднем апвеллинг в ЮВБ продолжался около 40–44 дней или 8–9 событий за май — октябрь в год.

Наибольшая площадь в 2016 г. была, вероятно, связана с высокой повторяемостью восточного ветра, который являлся сгонным для района «западный» и вдольбереговым для района «северный». В 2014 г. отмечались высокие повторяемости и скорости восточного и южного ветров, что приводило к развитию апвеллинга в обоих районах. Высокие скорости вдольберегового и сгонного ветра в 2010–2012 гг. по данным метеостанции Пионерский не привели к значительному развитию апвеллинга, т.к. повторяемость ветров этих направлений оставалась невысокой.

Наиболее часто апвеллинги наблюдались в 2019 г. вдоль Куршской косы (до 67% дней были отмечены отрицательными аномалиями температуры) и у западного побережья Калининградской области (до 45%). Максимальная повторяемость апвеллингов в ЮВБ отмечается в отдельные годы (2014, 2016, 2018, 2019 гг.). Реже зоны подъема вод отмечаются в районе северного побережья Калининградской области (в среднем — около 10%). Также для северного побережья отмечено отсутствие апвеллингов в отдельные годы (2012, 2013, 2017 гг.).

В период 2010–2013 гг. в исследуемом районе наблюдалось в среднем до 10 % отрицательных термических аномалий в теплый период года. С 2014 г. (кроме 2017 г.) отмечено увеличение повторяемости апвеллингов — в среднем около 20 % дней составляли дни с апвеллингом. Наибольшая повторяемость наблюдалась в 2018 и 2019 гг. в районе Куршской косы — до 26.4±12.8 % и 34.6±12.6 % дней в год отмечались отрицательными аномалиями ТПМ. В теплый период 2019 г., по сравнению с 2012 г., по данным метеостанции Балтийск наблюдалось повышение повторяемости сгонных восточных ветров (на 2.5 %) и вдольбереговых северных — на 2 %. По данным метеостанции Пионерский в 2012 г. наблюдалась большая повторяемость восточных и сгонных южных ветров — на 0.2 % и 1 %, соответственно. При этом максимальная повторяемость и большая площадь апвеллингов наблюдалась в районе «Северный». Примеры пространственного распределения отрицательных аномалий температуры для годов с их минимальной (2012 г.) и максимальной (2019 г.) повторяемостью представлены на рис. 5 (см. вклейку).

Связь повторяемости апвеллинга с индексами крупномасштабной циркуляции. Для анализа влияния крупномасштабной циркуляции на повторяемость апвеллингов в ЮВБ были оценены корреляции продолжительности и площади апвеллингов по сезонам со значениями индексов со смещением 3 и 6 месяцев. Результаты расчетов представлены в табл. 5.

Из табл. 5 видно, что среднее количество дней с апвеллингом летом находится в прямо пропорциональной зависимости средней силы связи от весеннего индекса SCAND, который в положительной фазе приводит к возникновению восточных ветров, вызывающих апвеллинг разного генезиса на обоих побережьях и в обратно пропорциональной — от зимнего индекса EA/WR, который характеризует динамику блокировки зонального переноса над северной Евразией. Северные и северо-западные ветра над Балтийским морем связаны с положительными значениями EA/WR, южные и юго-восточные — с отрицательными. Зимний индекс EA/WR также находится в прямой корреляционной зависимости средневысокой силы связи со средней площадью апвеллинга.

Средняя площадь апвеллинга коррелирует со средней силой связи с весенним индексом EA, положительная фаза которого продуцирует юго-западные ветра над Европой, которые будут отрицательно влиять на проявление апвеллингов на исследуемом побережье. Связи с NAO выявлено не было, однако в ряде работ она была отмечена [29, 30].

Каждый из индексов отражает влияние разных процессов в атмосфере на динамику и теплосодержание деятельного слоя Балтийского моря, объем речного стока с водосбора, водообмен с Северным морем, что, в свою очередь, влияет на особенности циркуляции вод моря и их вертикальную структуру, что было показано по модельным данным в [30]. Усиление термоклина может приводить к уменьшению повторяемости апвеллингов в начале теплого сезона.

4. Заключение

Данные реанализа показали высокую корреляцию с натурными данными гирлянды термодатчиков, расположенной на платформе D6. Анализ повторяемости апвеллингов, в целом, показал, что полученные оценки повторяемости апвеллингов в ЮВБ сопоставимы с полученными другими авторами оценками, составляющими в среднем 5–10 % [10, 12]. Кроме того, схожие результаты были представлены в [14], где по результатам анализа ТПМ вдоль створов в прибрежной зоне ЮВБ (с учетом района Хельской косы) с мая по октябрь 2000–2014 гг. были выявлены 135 событий апвеллинга.

Таблица 5

Корреляция индексов атмосферной циркуляции с повторяемостью и площадью апвеллингов за 2010–2019 гг.

Correlation of atmospheric circulation indices with repeatability and areas of upwelling for 2010–2019

Параметр	Район	Индексы за зиму				Индексы за весну			
		NAO	EA	EA/WR	SCAND	NAO	EA	EA/WR	SCA
Среднее количество дней с апвеллингом летом	Район «Северный»	0.08	0.21	**–0.51**	0.14	–0.19	0.03	0.16	**0.69**
	Район «Западный»	0.13	0.29	**–0.49**	0.13	–0.22	0.16	0.13	**0.62**
	ЮВБ (один из районов или оба)	0.12	0.32	**–0.55**	0.16	–0.24	0.15	0.07	**0.65**
Средняя площадь апвеллинга летом, км^2	Район «Северный»	0.40	0.15	**0.71**	–0.57	0.14	**0.57**	0.12	–0.28
	Район «Западный»	0.47	0.35	**0.63**	–0.71	0.12	**0.61**	0.00	–0.01
	ЮВБ (один из районов или оба)	0.44	0.24	**0.69**	–0.64	0.14	**0.60**	0.07	–0.17

Анализ дат апвеллингов, выделенных визуально по данным спектрорадиометра [27] и с использованием разработанного алгоритма, показал, что апвеллинги с помощью алгоритма выявляются в те же периоды времени, но несколько чаще, что, вероятно, связано с ограничением метода спектрорадиометрии (частой облачностью в этом районе). При этом проблемой при использовании данных реанализа является большой размер ячейки, что может снижать точность определения границы апвеллинга по сравнению со спутниковыми данными более высокого разрешения.

Наиболее часто — около 10 % дней в теплый период 2010–2019 гг.— апвеллинги наблюдались в мелководных частях акватории: в районе плато Рыбачий и на западном побережье области — к югу от м. Таран. На западном побережье Калининградского полуострова повторяемость апвеллингов составила в среднем 10.8 % дней в год, изменяясь от 1.9 % (в 2012 г.) до 16.7 % (в 2016 г.). Повторяемость ветров северного и восточного направлений в этом районе составила 7.2 и 10.3 % за 2010–2019 гг. На северном побережье средняя повторяемость апвеллингов составила 12.1 %, при этом повторяемость благоприятствующих апвеллингу восточных ветров составила 5 %, южных — 4.7 %. Показано, что ветры, благоприятствующие апвеллингам, чаще всего наблюдались в октябре (7.6 % со средней скоростью 2.9 м/с).

Наблюдается сезонная изменчивость повторяемости апвеллингов: постепенное уменьшение повторяемости с мая-июня (в среднем около 11 дней в год) к августу-сентябрю (5–6 дней) и резкий рост повторяемости в октябре (около 15 дней). Межгодовая изменчивость, отражающаяся в увеличении повторяемости апвеллингов с 2014 г., связана, вероятно, с изменениями крупномасштабной циркуляции, однако подтверждение этой гипотезы требует дополнительных исследований.

Дальнейшие исследования будут направлены на объяснение выявленных связей с индексами атмосферной циркуляции путем расширения ряда наблюдений и анализа изменения различных характеристик поверхностного слоя моря и водообмена между Балтийским и Северным морями и поиска возможных корреляционных связей изменений гидрологических условий моря с повторяемостью апвеллингов с целью выработки рекомендаций по их использованию для прогноза интенсивности явления апвеллинга в наступающем сезоне, что важно для решения практических задач.

5. Благодарности

Авторы выражают благодарность ООО «Лукойл-КМН» за помощь в организации получения данных термокосы и начальника гидрологического отряда 127-го рейса НИС «Профессор Штокман» Чурина Д.А. за предоставление гидрологических данных.

6. Финансирование

Работа выполнена в рамках госзадания ИО РАН (тема № 0128–2021–0012).

Литература

1. *Стонт Ж.И.*, *Гущин О.А.* Мониторинг ветровых условий в Юго-Восточной Балтике // Проблемы изучения и охраны природного и культурного наследия национального парка «Куршская коса». 2017. С. 163–175.
2. *Lehmann A.*, *Myrberg K.* Upwelling in the Baltic Sea — a review // J. Mar. Syst. 2008. V. 74. S3—S12. doi: 10.1016/j.jmarsys.2008.02.010
3. *Голенко М.Н.*, *Голенко Н.Н.* О структуре динамических полей в юго-восточной Балтике при ветровых воздействиях, приводящих к апвеллингу и даунвеллингу // Океанология. 2012. Т. 52, № 5. С. 654–667.
4. *Gurova E.*, *Lehmann A.*, *Ivanov A.* Upwelling dynamics in the Baltic Sea studied by a combined SAR/infrared satellite data and circulation model analysis // Oceanologia. 2013. V. 55, N 3. P. 687–707. doi: 10.5697/oc.55–3.687
5. *Myrberg K.*, *Andrejev O.* Main upwelling regions in the Baltic Sea — a statistical analysis based on three-dimensional modelling // Boreal Environ. Res. 2003. V. 8, N 2. P. 97–112.
6. *Журбас М.*, *Стипа Т.*, *Малкки П.*, *Пака В.Т.*, *Кузьмина П.*, *Скляров В.Е.* Мезомасштабная изменчивость апвеллинга в юго-восточной Балтике: ик-изображения и численное моделирование // Океанология. 2004. Т. 44, № 5. С. 660–669.
7. *Krezel A.*, *Ostrowski M.*, *Szymelfenig M.* Sea surface temperature distribution during upwelling along the Polish Baltic coast // Oceanologia. 2005. V. 47, N 4. P. 415–432.
8. *Kowalewski M.*, *Ostrowski M.* Coastal up- and downwelling in the southern Baltic // Oceanologia. 2005. V. 47, N 4. P. 453–475.
9. *Kozlov I.E.* et al. ASAR imaging for coastal upwelling in the Baltic Sea // Advances in Space Research. 2012. V. 50, N 8. P. 1125–1137. doi: 10.1016/j.asr.2011.08.017

10. *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. V. 54, N 3. P. 369–393. doi: 10.5697/oc.54–3.369
11. *Dabuleviciene T.*, *Kozlov I.E.*, *Vaiciute D.*, *Dailidiene I.* Remote sensing of coastal upwelling in the south-eastern Baltic Sea: Statistical properties and implications for the coastal environment // Remote Sens. 2018. V. 10, N 11. 1752. doi: 10.3390/rs10111752
12. *Nowicki A.*, *Janecki M.*, *Dzierzbicka-Głowacka L.* Operational system for automatic coastal upwelling detection in the Baltic Sea based on the 3D CEMBS model // J. Oper. Oceanogr. 2019. V. 12, N 2. P. 104–115. doi: 10.1080/1755876X.2019.1569748
13. *Бычкова И.А., Викторов С.В.* Выявление и систематизация апвеллингов Балтийского моря на основе спутниковых данных // Океанология. 1987. Т. 27, № 2. С. 218—223.
14. *Есюкова Е.Е.*, *Чубаренко И.П.*, *Стонт Ж.И.* Апвеллинг или дифференциальное выхолаживание? Анализ спутниковых ТПМ-изображений юго-восточной части Балтийского моря // Водные ресурсы. 2017. Т. 44, № 1. С. 28–37. doi: 10.7868/S0321059617010047
15. *Tamim A.* et al. An efficient tool for automatic delimitation of Moroccan coastal upwelling using SST images // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2014. V. 12, N 4. P. 875–879. doi: 10.1109/LGRS.2014.2365558
16. *Джиганшин Г.Ф.*, *Полонский А.Б.*, *Музылева М.А.* Апвеллинг в северо-западной части Черного моря в конце летнего сезона и его причины // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 4. С. 45–57.
17. *Axell L.* et al. Baltic Sea Production Centre. BALTICSEA_REANALYSIS_PHY_003_011. Quality Information Document. 2019. P. 4.
18. *Axell L.*, *Huess V.* Product User Manual. Tech. rep., Copernicus Marine Environment Monitoring Service. 2020. URL: https://resources.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-BAL-PUM-003–011.pdf (дата обращения: 01.03.2021).
19. *Мысленков С.А.*, *Кречик В.А.*, *Бондарь А.В.* Суточная и сезонная изменчивость температуры воды в прибрежной зоне Балтийского моря по данным термокосы на платформе Д-6 // Экологические системы и приборы. 2017. № 5. С. 25–33.
20. *Krechik V.*, *Myslenkov S.*, *Kapustina M.* New possibilities in the study of coastal upwellings in the Southeastern Baltic Sea with using thermistor chain // Geography, Environment, Sustainability. 2019. V. 12, N 2. P. 44–61. doi: 10.24057/2071–9388–2018–67
21. Архив погоды в Балтийске. ООО «Расписание Погоды». URL: https://rp5.ru/Погода_в_Балтийске (дата обращения: 14.04.2021).
22. Архив погоды в Пионерском. ООО «Расписание Погоды». URL: https://rp5.ru/Погода_в_Пионерском (дата обращения: 14.04.2021).
23. North Atlantic Oscillation. Northern Hemisphere Teleconnection Patterns. URL: ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd52dg/data/indices/nao_index.tim (дата обращения: 10.04.2021).
24. Scandinavia. Northern Hemisphere Teleconnection Patterns. URL: ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd52dg/data/indices/scand_index.tim (дата обращения: 10.04.2021).
25. East Atlantic/Western Russia. Northern Hemisphere Teleconnection Patterns. URL: ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd-52dg/data/indices/eawr_index.tim (дата обращения: 10.04.2021).
26. East Atlantic. Northern Hemisphere Teleconnection Patterns. URL: ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd52dg/data/indices/ea_index.tim (дата обращения: 10.04.2021).
27. *Krek A.V.* et al. The role of upwellings in the coastal ecosystem of the Southeastern Baltic Sea // Regional Studies in Marine Science. 2021. V. 44. doi: 101707. 10.1016/j.rsma.2021.101707
28. *Kapustina M.V.*, *Krechik V.A.*, *Gritsenko V.A.* Seasonal variations in the vertical structure of temperature and salinity fields in the shallow Baltic Sea off the Kaliningrad Region coast // Russian Journal of Earth Sciences. 2017. V. 17. ES1004. doi: 10.2205/2017ES000595
29. *Bednorz E.* et al. Atmospheric forcing of coastal upwelling in the southern Baltic Sea basin // Atmosphere. 2019. V. 10, N 6. P. 327. doi: 10.3390/atmos10060327
30. *Lehmann A.*, *Krauß W.*, *Hinrichsen H.H.* Effects of remote and local atmospheric forcing on circulation and upwelling in the Baltic Sea // Tellus A: Dynamic meteorology and oceanography. 2002. V. 54, N 3. P. 299–316. doi: 10.1034/j.1600–0870.2002.00289.x

References

1. *Stont J.I.*, *Guchin O.A.* Wind conditions in southeastern Baltic. *Problems of Explore and Conservation Natural and Cultural Heritage of the National Park "Curonian Spit"*. 2017, 163–175 (in Russian).
2. *Lehmann A.*, *Myrberg K.* Upwelling in the Baltic Sea — a review. *J. Mar. Syst.* 2008, 74, S3-S12. doi: 10.1016/j.jmarsys.2008.02.010

3. *Golenko M.N.*, *Golenko N.N.* Structure of dynamic fields in the southeastern Baltic during wind forcings that cause upwelling and downwelling. *Oceanology*. 2012, 52, 5, 604–616. doi: 10.1134/S0001437012050086
4. *Gurova E.*, *Lehmann A.*, *Ivanov A.* Upwelling dynamics in the Baltic Sea studied by a combined SAR/infrared satellite data and circulation model analysis. *Oceanologia*. 2013, 55, 3, 687–707. doi: 10.5697/oc.55–3.687
5. *Myrberg K.*, *Andrejev O.* Main upwelling regions in the Baltic Sea-a statistical analysis based on three-dimensional modelling. *Boreal Environ. Res.* 2003, 8, 2, 97–112.
6. *Zhurbas V.M.* et al. Mesoscale variability of the upwelling in the southeastern Baltic Sea: IR images and numerical modeling. *Oceanology*. 2004, 44, 5, 619–628.
7. *Krezel A.*, *Ostrowski M.*, *Szymelfenig M.* Sea surface temperature distribution during upwelling along the Polish Baltic coast. *Oceanologia*. 2005, 47, 4, 415–432.
8. *Kowalewski M.*, *Ostrowski M.* Coastal up- and downwelling in the southern Baltic. *Oceanologia*. 2005, 47, 4, 453–475.
9. *Kozlov I.E.* et al. ASAR imaging for coastal upwelling in the Baltic Sea. *Advances in Space Research*. 2012, 50, 8, 1125–1137. doi: 10.1016/j.asr.2011.08.017
10. *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, 54, 3, 369–393. doi: 10.5697/oc.54–3.369
11. *Dabuleviciene T.*, *Kozlov I.E.*, *Vaiciute D.*, *Dailidiene I.* Remote sensing of coastal upwelling in the south-eastern Baltic Sea: Statistical properties and implications for the coastal environment. *Remote Sensing*. 2018, 10, 11, 1752. doi: 10.3390/rs10111752
12. *Nowicki A.*, *Janecki M.*, *Dzierzbicka-Głowacka L.* Operational system for automatic coastal upwelling detection in the Baltic Sea based on the 3D CEMBS model. *J. Oper. Oceanogr.* 2019, 12, 2, 104–115. doi: 10.1080/1755876X.2019.1569748
13. *Bychkova I.A.*, *Viktorov S.V.* Use of satellite data for identification and classification of upwelling in the Baltic Sea. *Oceanology*. 1987, 27, 2, 158–162.
14. *Esiukova E.E.*, *Chubarenko I.P.*, *Stont Z.I.* Upwelling or differential cooling? Analysis of satellite SST images of the Southeastern Baltic Sea. *Water Resources*. 2017, 44, 1, 69–77. doi: 10.7868/S0321059617010047
15. *Tamim A.* et al. An efficient tool for automatic delimitation of Moroccan coastal upwelling using SST images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2014, 12, 4, 875–879. doi: 10.1109/LGRS.2014.2365558
16. *Dzhiganshin G.F.*, *Polonskii A.B.*, *Muzyleva M.A.* Upwelling in the northwest part of the Black Sea at the end of the summer season and its causes. *Physical Oceanography*. 2010, 20, 4, 281–293.
17. *Axell L.* et al. Baltic Sea Production Centre. BALTICSEA_REANALYSIS_PHY_003_011. *Quality Information Document*. 2019, P. 4.
18. *Axell L.*, *Huess V.* Product User Manual. Tech. rep., Copernicus Marine Environment Monitoring Service. 2020. URL: https://resources. marine. copernicus. eu/documents/PUM/CMEMS-BAL-PUM-003–011.pdf (date of access: 01.03.2021).
19. *Myslenkov S.A.*, *Krechik V.A.*, *Bondar A.V.* Daily and seasonal water temperature changes in the coastal zone of the Baltic Sea measured by thermistor chain. *Ecological Systems and Devices*. 2107, 5, 25–33 (in Russian).
20. *Krechik V.*, *Myslenkov S.*, *Kapustina M.* New possibilities in the study of coastal upwellings in the Southeastern Baltic Sea with using thermistor chain. *Geography*, *Environment*, *Sustainability*. 2019, 12, 2, 44–61. doi: 10.24057/2071–9388–2018–67
21. Weather archive. *Raspisaniye Pogodi*. URL: https://rp5.ru/Weather_in_Baltiysk (date of access: 14.04.2021).
22. Weather archive. *Raspisaniye Pogodi*. URL: https://rp5.ru/Weather_in_Pionersky,_district (date of access: 14.04.2021 г.).
23. North Atlantic Oscillation. Northern Hemisphere Teleconnection Patterns. URL: ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd52dg/data/indices/nao_index.tim (date of access: 10.04.2021).
24. Scandinavia. Northern Hemisphere Teleconnection Patterns. URL: ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd52dg/data/indices/scand_index.tim (date of access: 10.04.2021).
25. East Atlantic/Western Russia. Northern Hemisphere Teleconnection Patterns. URL: ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd-52dg/data/indices/eawr_index.tim (date of access: 10.04.2021).
26. East Atlantic. Northern Hemisphere Teleconnection Patterns. URL: ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd52dg/data/indices/ea_index.tim (date of access: 10.04.2021).
27. *Krek A.V.* et al. The role of upwellings in the coastal ecosystem of the Southeastern Baltic Sea. *Regional Studies in Marine Science*. 2021, 44, 101707. doi: 101707. 10.1016/j.rsma.2021.101707
28. *Kapustina M.V.*, *Krechik V.A.*, *Gritsenko V.A.* Seasonal variations in the vertical structure of temperature and salinity fields in the shallow Baltic Sea off the Kaliningrad Region coast. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2017, 17, ES1004. doi: 10.2205/2017ES000595
29. *Bednorz E.* et al. Atmospheric forcing of coastal upwelling in the southern Baltic Sea basin. *Atmosphere*. 2019, 10, 6, 327. doi: 10.3390/atmos10060327
30. *Lehmann A.*, *Krauß W.*, *Hinrichsen H.H.* Effects of remote and local atmospheric forcing on circulation and upwelling in the Baltic Sea. *Tellus A*: *Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2002, 54, 3, 299–316. doi: 10.1034/j.1600–0870.2002.00289.x

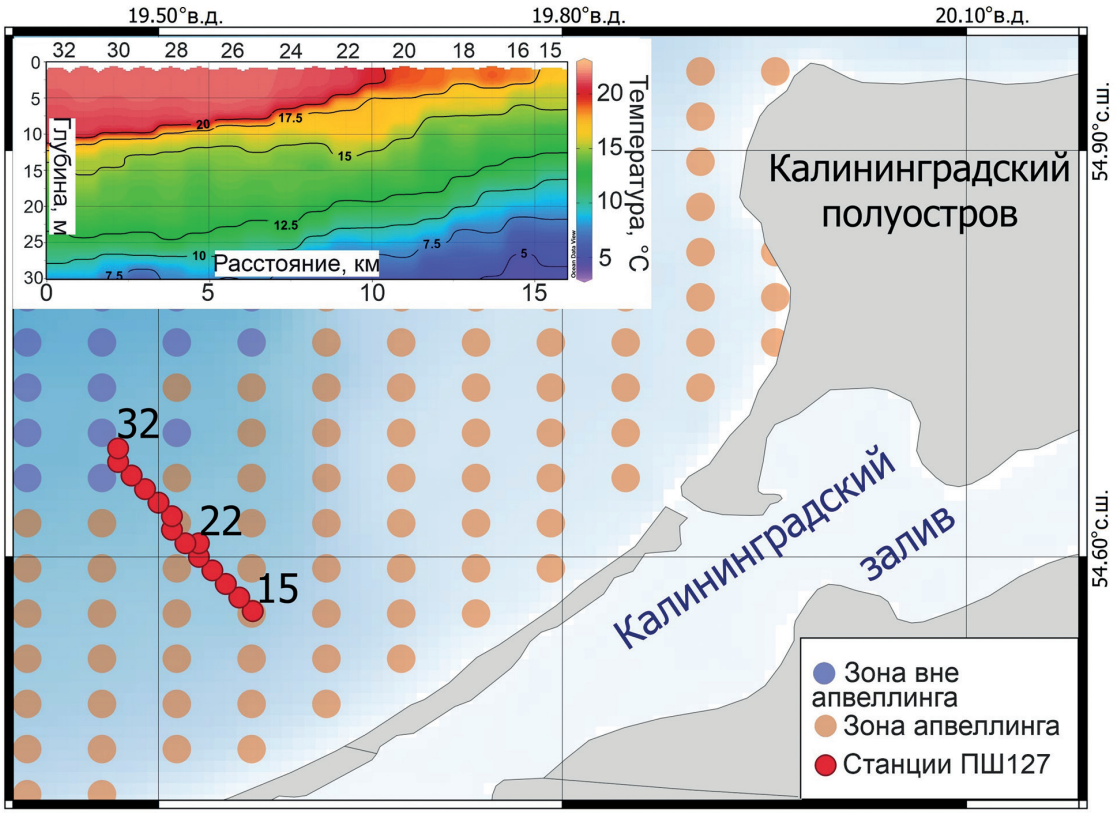

Рис. 3. Проявления апвеллинга 26 июля 2014 г. по данным контактных измерений, выполненных в 127-м рейсе НИС «Профессор Штокман», и на карте района исследований, построенной на основании применения алгоритма. Положение океанологических станций и их номера показаны красными точками. На врезке — температура воды на гидрологическом разрезе по результатам измерений на станциях, горизонтальные подписи на врезке — номера станций. Бежевыми кругами на карте обозначена зона апвеллинга, фиолетовыми — зона вне апвеллинга по данным применения автоматического алгоритма.

Fig. 3. Manifestations of upwelling on July 26, 2014 according to the data of contact measurements performed during the 127th cruise of the R/V "Professor Shtokman", and on the map of the study area, built on the basis of the application of the algorithm. The position of oceanological stations and their numbers are shown with red dots. The inset shows the water temperature in the hydrological section based on the results of observations at the oceanological stations, the horizontal labels on the inset are the station numbers. The beige circles on the map indicate the upwelling area, purple — the area outside the upwelling according to the automatic algorithm.

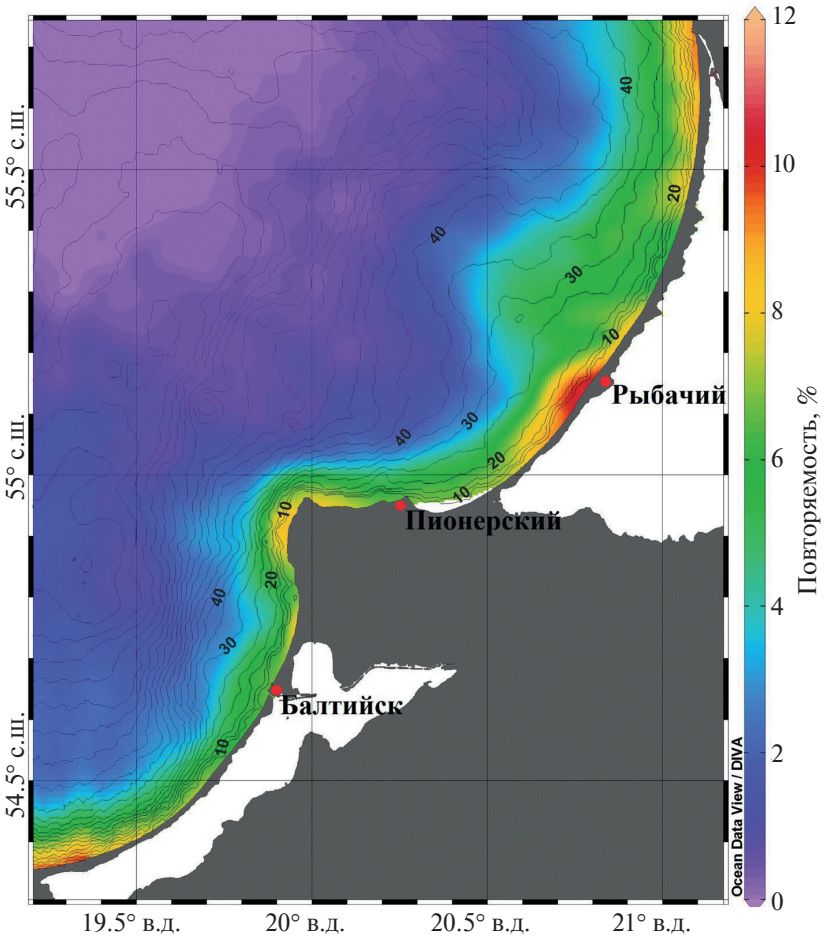

Рис. 4. Карта повторяемости отрицательных термических аномалий (в % от общего числа дней за теплый сезон) в ЮВБ за 2010–2019 гг. Дополнительно на карту в области нанесены изобаты с шагом 5 м.

Fig. 4. Frequency map of negative thermal anomalies (as a percentage of the total number of days for the warm season) in the southeastern part of the Baltic Sea for 2010–2019. In addition, isobaths with a step of 5 m are plotted on the map.

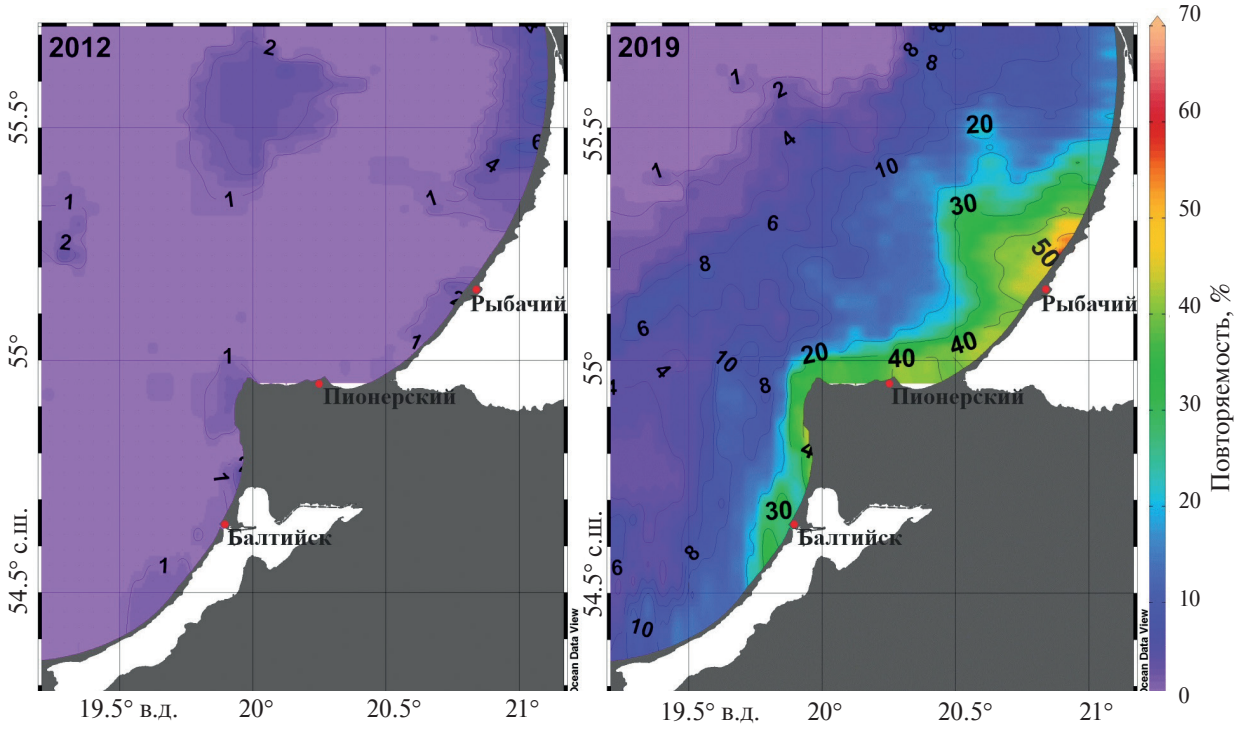

Рис. 5. Межгодовая изменчивость повторяемости отрицательных термических аномалий в ЮВБ за 2012 и 2019 гг.

Fig. 5. Interannual variability of the frequency of occurrence of negative thermal anomalies in the southeastern Baltic Sea for 2012 and 2019.