

Гидрометеорология и экология. 2025. № 79. С. 226—246.
Hydrometeorology and Ecology. 2025;(79):226—246.

ОКЕАНОЛОГИЯ

Научная статья

УДК [551.464.38:551.465.48](261.24)

doi: 10.33933/2713-3001-2025-79-226-246

К оценке синоптических аномалий солёности в придонном слое Балтийского моря и их статистических характеристик

Владимир Станиславович Травкин^{1, 2},

Наталья Александровна Тихонова^{1, 2}, Евгений Александрович Захарчук¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия,
vtravkin99@gmail.com

² Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Росгидромет,
Москва, Россия

Аннотация. Выполнен анализ синоптической изменчивости солёности придонного слоя Балтийского моря. Основой исследования являются данные реанализа Балтийского моря за 1993—2021 гг. Аномалии солёности определяются как дискретные периоды от 2 до 90 суток, когда значения солёности выше (для положительных аномалий) или ниже (для отрицательных аномалий) значений 90%-го или 10%-го процентилей для данных периодов. Установлено, что наибольшее число положительных и отрицательных аномалий солёности прослеживается в районе Датских проливов и южной части открытой Балтики. Максимальная интенсивность аномалий и их наибольшее количество локализованы в узких меандрирующих зонах, особенно выраженных в юго-западной части моря.

Ключевые слова: Балтийское море, придонный слой, солёность морской воды, синоптическая изменчивость, аномалии солёности.

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-27-00412.

Для цитирования: Травкин В. С., Тихонова Н. А., Захарчук Е. А. К оценке синоптических аномалий солёности в придонном слое Балтийского моря и их статистических характеристик // Гидрометеорология и экология. 2025. № 79. С. 226—246. doi: 10.33933/2713-3001-2025-79-226-246.

Assessment of synoptic salinity anomalies in the bottom layer of the Baltic Sea and their statistical characteristics

Vladimir S. Travkin^{1,2}, Natalia A. Tikhonova^{1,2}, Eugeny A. Zakharchuk¹

¹ St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia, vtravkin99@gmail.com

² N. N. Zubov's State Oceanographic Institute, Roshydromet, Moscow, Russia

Summary. The synoptic variability of the salinity of the bottom layer of the Baltic Sea is analyzed. The research is based on data from the Baltic Sea reanalysis (https://data.marine.copernicus.eu/product/BALTICSEA_MULTIYEAR_PHY_003_011/) for 1993—2021. The spatial resolution in latitude and longitude is 1° and 1'40", respectively. The data contains 57 vertical horizons from the surface to a depth of 711 m (in the Skagerrak Strait). For our work, we use data from the bottom horizon at each point of the grid. Salinity anomalies are defined as discrete periods from 2 to 90 days when salinity values are higher (for positive anomalies) or lower (for negative anomalies) than the values of the 90 % or 10 % percentiles for these periods. The cumulative value refers to the totality of the difference between the salinity values and the climatic mean. The amplitude was calculated as the difference between zero and positive (negative) salinity anomalies. It was found that the largest number of positive and negative salinity anomalies can be traced in the area of the Danish Straits and the southern part of the Baltic Proper. The maximum intensity of anomalies and their greatest number are localized in narrow meandering zones, especially pronounced in the southwestern part of the Baltic Sea. Positive significant linear trends were recorded for the average annual values of the number of anomalies, their average and total durations, as well as cumulative values, whereas significant negative trends were observed for the average and maximum amplitudes of anomalies. The largest number of anomalies can be traced in the summer, while their average and maximum amplitudes are minimal during this period. Anomalies with duration of 2—5 and 6—10 days make the greatest contribution to the number and total cumulative value of salinity anomalies.

Keywords: Baltic Sea, bottom layer, salinity of seawater, synoptic variability, salinity anomalies

Acknowledgements: the research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 24-27-00412.

For citation: Travkin V. S., Tikhonova N. A., Zakharchuk E. A. Assessment of synoptic salinity anomalies in the bottom layer of the Baltic Sea and their statistical characteristics. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(79):(226—246). doi: 10.33933/2713-3001-2025-79-226-246. (In Russ.).

Введение

Балтийское море представляет собой внутриматериковый солоноватый морской бассейн с положительным пресным балансом, сильно изрезанной береговой линией, целиком расположенный в пределах шельфа (рис. 1 а) [1, 2]. Соленость воды в значительной степени формирует гидрологический режим Балтийского моря, при этом она может служить индикатором естественных изменений, происходящих в нем [3]. Ключевой особенностью Балтийского моря является выраженный градиент солености как по горизонтали, так и по вертикали, варьирующийся от менее 4 psu в Ботническом и Финском заливах до 30 psu на границе с Северным морем (рис. 1 в) [4, 5]. Узкие и мелководные Датские проливы ограничивают

проникновение в Балтийское море соленых североморских вод [6]. Превышение величины осадков над испарением, значительный речной сток, а также эпизодические поступления в Балтийское море соленых вод из Северного моря (так называемых больших балтийских затоков — ББЗ) способствуют формированию в Балтийском море существенной вертикальной термохалинной стратификации [6, 7]. Водные массы Балтийского моря характеризуются пространственной неоднородностью и выраженной сезонной изменчивостью [1, 5]. Для большей части Балтийского моря свойственно наличие поверхностной и глубинной водных масс, которые разделяются ежегодно формирующимся холодным промежуточным слоем [5, 8]. Известно, что верхний слой подвержен воздействию речного стока и метеорологических факторов (осадки, испарение и т. д.), тогда как на нижний слой наибольшее влияние оказывает горизонтальная адвекция соленых вод ББЗ [3, 8].

Малые глубины порогов затрудняют обновление придонных вод в глубоководных районах Балтийского моря, приводя к формированию гипоксических зон, бедных кислородом [7, 9]. Наибольшая изменчивость солености придонного слоя характерна для районов Датских проливов, Арконского, Борнхольмского и Готландских бассейнов, а также Финского залива [10] (рис. 1 *в*). Топографические особенности способствуют формированию в южной и юго-восточной частях Восточного Готландского бассейна узкой вытянутой струи с высокими скоростями придонных течений. Дальнейшее распространение соленых придонных вод в Готландских бассейнах происходит в циклоническом направлении [8]. В результате этого, а также за счет смешения с водами Финского и Ботнического заливов, соленость в Северном и Западном Готландских бассейнах заметно ниже, по сравнению с Восточным Готландским бассейном (рис. 1 *б*). Наименьшие колебания

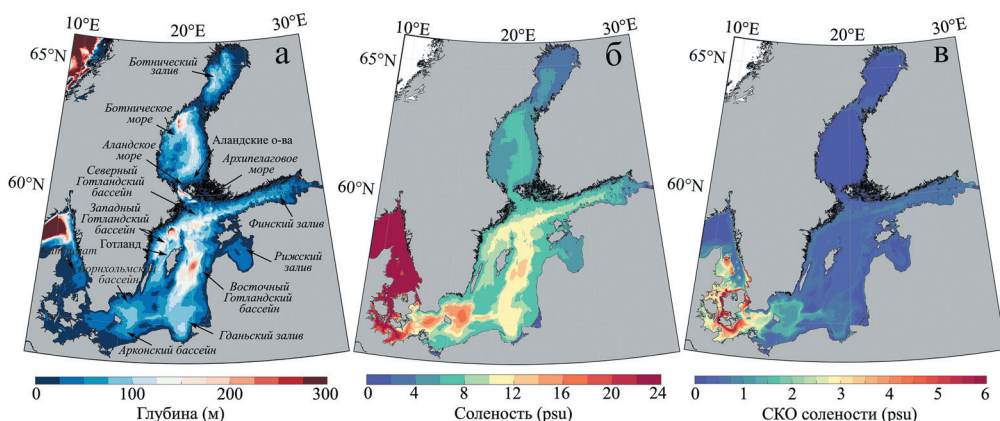


Рис. 1. Батиметрия Балтийского моря (*а*); осредненная за 1993—2021 гг. соленость придонного слоя (psu) (*б*); среднеквадратическое отклонение (СКО) солености придонного слоя (psu) (*в*).

Fig. 1. Bathymetry of the study area (*a*); salinity averaged over 1993—2021 (psu) (*б*); standard deviation (std) of bottom layer salinity (psu) (*в*).

солености в придонном слое фиксируются в Ботническом и Рижском заливах, а также в Ботническом море [10] (рис. 1 в).

Современное изменение климата оказывает существенное воздействие на пространственное распределение термохалинных и гидрохимических характеристик, влияющих на рыболовство и состояние морских экосистем [11, 12]. Помимо прямого воздействия на видовое разнообразие, рост и метаболизм морских организмов, изменения температуры и солености могут опосредованно влиять на них за счет изменения стратификации, а также вертикального и горизонтального перемешивания [11].

Поскольку экосистема Балтийского моря адаптирована к солоноватым водам Балтики, даже небольшие колебания солености приводят к пространственному перемещению мест обитания морских организмов [13]. Уменьшение солености в поверхностном слое и ее увеличение у дна способствует усилению вертикальной стратификации, что негативно сказывается на кислородном режиме Балтийского моря в последние десятилетия [14]. Согласно численным гидродинамическим прогнозам, к 2100 году температура воды Балтийского моря повысится на 0,5—2,5 К на поверхности и на 0,7—2,8 К на глубине более 40 м, при этом изменение температуры воды будет схоже с ростом температуры воздуха [11]. Также отмечается уменьшение поверхностной солености на 1,5—2,0 psu, существенное снижение числа ББЗ и усиление речного стока [11, 15, 16]. Такие значительные колебания солености в будущем могут стать причиной уменьшения численности и перемещения некоторых видов морских организмов в юго-западную часть Балтики вплоть до их полного исчезновения в акватории Балтийского моря [13].

В работе [6] на основе численного моделирования было установлено наличие междекадной изменчивости солености в поверхностном и придонном слоях Балтийского моря, речного стока, а также транспорта соли через Дарс Силл. При этом связь между междекадной изменчивостью солености и климатическими индексами NAO и AMO не прослеживается. Также установлено, что изменения солености в придонном слое способствуют изменению солености на поверхности, а не наоборот [6].

Под синоптической изменчивостью в океанологии понимают неоднородности в полях гидрофизических характеристик с временными масштабами от нескольких суток до месяцев, и пространственными — от десятков до тысяч километров [17, 18]. Результаты теоретических и эмпирических исследований демонстрируют, что синоптические процессы в океанах и морях отличаются большим многообразием и вносят определяющий вклад в движения вод Мирового океана [17, 19]. Колебания солености Балтийского моря синоптического масштаба характеризуются многофакторностью, особенно на глубинах ниже галоклина [5]. Установлено, что изменчивость параметров плотностной структуры вод в деятельном слое Балтийского моря, таких как плотность верхнего квазиоднородного слоя и градиент плотности в пикноклине и придонном слое, тесным образом связана с синоптической изменчивостью солености [19, 20].

Несмотря на результаты более ранних исследований, изменчивость солености придонного слоя Балтийского моря синоптического масштаба до сих пор остается

слабоизученной. Несинхронность, эпизодичность и ограниченность в пространстве измерений океанологических параметров при помощи традиционных океанографических съёмок и разрезов не даёт возможность получить достоверную информацию о синоптической изменчивости океанологических процессов. Значительное развитие в последние десятилетия численного гидродинамического моделирования океанов и морей с усвоением судовых и спутниковых измерений океанологических параметров позволяет на новом, более представительном уровне изучать процессы синоптической изменчивости в морских акваториях с помощью данных реанализов океанологических полей, имеющих достаточно высокое пространственное разрешение, поэтому основная цель работы — выделить синоптические аномалии солёности в придонном слое Балтийского моря, оценить их статистические характеристики и описать возможные причины синоптических аномалий солёности за период 1993—2021 гг.

Источники данных и методика исследования

В работе используются ежесуточные данные по солёности, u и v компонентам скоростей течений за 1993—2021 гг. регионального реанализа Балтийского моря BALTICSEA_REANALYSIS_PHY_003_011, доступного на портале Copernicus Marine Service (https://data.marine.copernicus.eu/product/BALTICSEA_MULTIYEAR_PHY_003_011/). Основой реанализа является модель NEMO-4.0, а также ассимилированные спутниковые данные о температуре поверхности океана и судовые измерения температуры и солёности. Атмосферный форсинг задается при помощи реанализа ECMWF ERA5. Пространственное разрешение по широте и долготе составляет 1° и $1'40''$, соответственно. По вертикали массив содержит 57 горизонтов от поверхности до глубины 711 м (в проливе Скагеррак). Для нашей работы мы используем данные с придонного горизонта в каждой точке сетки.

Для определения аномалий солёности синоптического масштаба с помощью Фурье-анализа исходных рядов среднесуточных значений солёности, полученных по данным регионального реанализа, были оценены амплитуды и фазы колебаний солёности в придонном слое на разных частотах. На основе этого анализа по значениям амплитуд и фаз колебаний солёности предвычислялись гармоники в диапазоне периодов от 90 суток и более. Ряды суперпозиции этих гармоник исключались из исходных среднесуточных рядов значений солёности. Таким образом, из рядов солёности исключались сезонные и межгодовые колебания.

В дальнейшем на основе полученных результатов для каждого календарного дня в году определялись: среднее многолетнее значение солёности каждых суток года, а также с помощью квантильного анализа — медиана и 90 %-ный (для положительных аномалий) и 10 %-ный (для отрицательных аномалий) процентили изменений солёности. На основании предложенной методики под синоптическими аномалиями солёности в данной работе понимаются ее положительные отклонения в течение двух и более суток относительно 90 %-ной процентиля и такие же временные отрицательные отклонения от 10-%-процентиля (рис. 2). Под

кумулятивной величиной (psu · сут.) подразумевается совокупность ежесуточных разностей между соленостью обнаруженной аномалии и климатической нормой:

$$i_{cum} = \int_{t_s}^{t_e} (T(t) - T_m(j)) dt,$$

где t_s и t_e — дата появления и исчезновения аномалии солености, T и T_m — ежесуточные (t — шаг по времени) значения солености и ее климатической нормы (j — календарный день года).

Интенсивность рассчитывалась как разность между нулем и ежесуточными значениями положительных (отрицательных) аномалий солености (psu) (рис. 2).

Для получения временного хода основных параметров положительных и отрицательных аномалий солености полученные результаты были осреднены как по площади (по всей акватории Балтийского моря), так и по времени (приведены к среднемесячным и среднегодовым). Проверка значимости линейных трендов проводилась при помощи линейного регрессионного анализа. При помощи t -критерия Стьюдента определялась значимость коэффициента регрессии при пятипроцентном уровне.

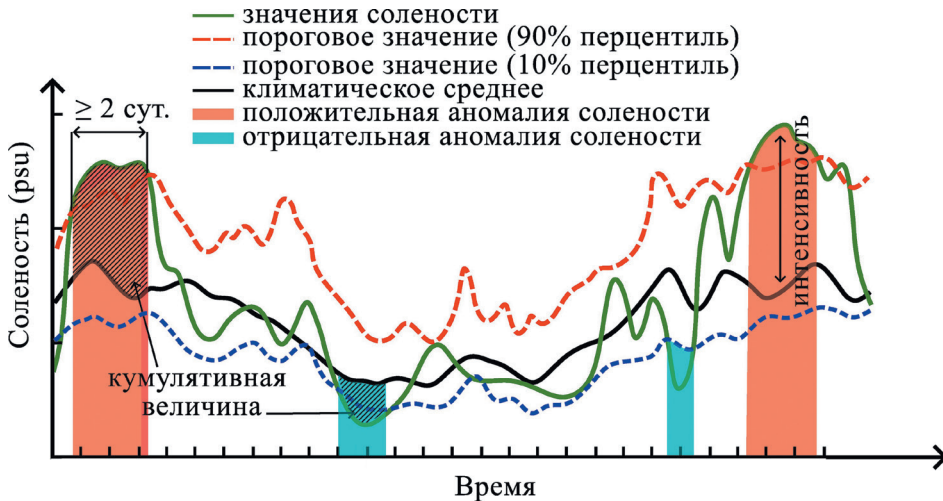


Рис. 2. Схема расчета аномалий солености.

Зеленой линией показаны ежесуточные значения солености, красной и синей пунктирными линиями отмечены 90 %-ный и 10 %-ный процентиля, черной линией показана климатическая норма солености для каждого календарного дня года. Красными и синими областями отмечены обнаруженные аномалии солености, штриховкой показана кумулятивная величина обнаруженных аномалий.

Fig. 2. The scheme for calculating salinity anomalies.

The green line shows daily salinity values, the red and blue dotted lines mark the 90 % and 10 % percentiles, the black line shows the climatic salinity norm for each calendar day of the year. The red and blue areas mark the detected salinity anomalies, the shading shows the cumulative value of the detected anomalies.

Результаты исследований

Среднее количество аномалий солености для каждой ячейки сетки Балтийского моря за 1993—2021 гг. составляет 220 случаев, при этом наибольшее (≥ 350) число положительных и отрицательных аномалий солености прослеживается в Гданьском заливе, Борнхольмском бассейне, в районе Датских проливов, а также восточнее о. Готланд (рис. 3). Наименьшее число аномалий наблюдается в глубоководных районах Ландсортской и Готландской впадин, в Рижском и Финском заливах, а также в районе Куршской косы. Разность между количеством соленостных и пресных аномалий наибольшая по модулю у южного побережья

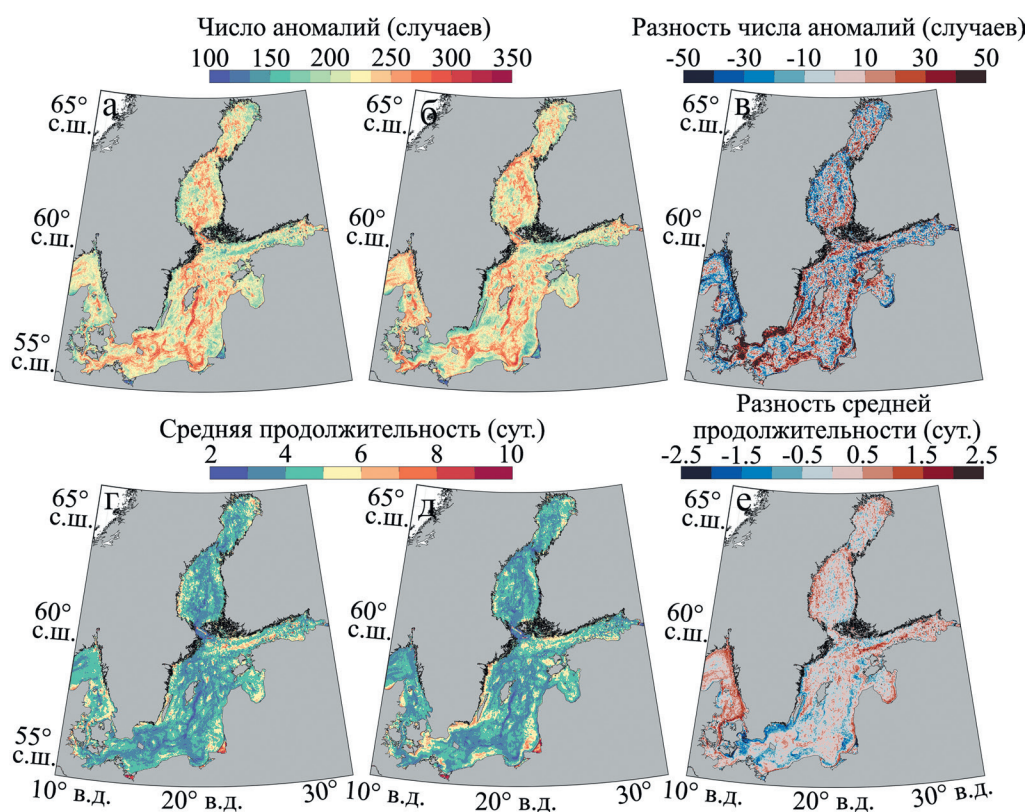


Рис. 3. Количество (случаев) положительных (а) и отрицательных (б) аномалий солености за 1993—2021 гг., а также их разность (е); средняя продолжительность (сут.) положительных (з) и отрицательных (д) аномалий солености за 1993—2021 гг., а также их разность (е).

Fig. 3. The number (pieces) of positive (a) and negative (b) salinity anomalies for 1993—2021, as well as their difference (e); the average duration (days) of positive (z) and negative (d) salinity anomalies for 1993—2021, as well as their difference (e).

Швеции, а также в районе Датских проливов (рис. 3 *в*), где она может достигать 150—170 случаев.

Для большей части Балтийского моря характерна средняя продолжительность аномалий от 2 до 5 суток (рис. 3 *г—д*). В районах Датских проливов и Куршской косы, прибрежной части Западного Готландского бассейна, а также в Рижском и Финском заливах аномалии имеют более длительную среднюю продолжительность (5—10 суток). К северу от Датских проливов, а также в западной части Финского залива средняя продолжительность положительных аномалий значительно превышает аналогичные значения для отрицательных аномалий, разница составляет 1,5—2,5 суток (рис. 3 *е*). Противоположная картина наблюдается восточнее Датских проливов и у южного побережья Швеции, где средняя продолжительность отрицательных аномалий на 1,5—2,5 сут. больше по сравнению с положительными аномалиями.

Суммарная продолжительность обоих видов аномалий наибольшая (более 1000 сут.) в районе Датских проливов, в прибрежной части Западного Готландского бассейна и в западной части Финского залива (рис. 4 *а—б*). При этом наименьшие значения (порядка 700 сут.) зафиксированы восточнее о. Готланд, а также в районе Аландских островов. В Арконском и Борнхольмском бассейнах, а также в Датских проливах продолжительность аномалий повышенной солености более чем на 80 сут. превышает аналогичные значения для отрицательных аномалий. С другой стороны, вдоль южного побережья Швеции тянется узкая полоса с большей суммарной продолжительностью аномалий низкой солености.

Суммарная кумулятивная величина максимальна (более 5000 $\text{psu} \cdot \text{сут.}$) в Каттегате и Датских проливах (рис. 4 *г—д*), резко снижаясь до 2500 $\text{psu} \cdot \text{сут.}$ западнее Борнхольма. Повышенные значения обнаружены в Западном и Восточном Готландских бассейнах, а также в западной части Финского залива и в центральной части Ботнического залива. Суммарная кумулятивная величина аномалий повышенной солености превосходит значения для отрицательных аномалий к востоку от Датских проливов, а также в Арконском и Борнхольмском бассейнах, тогда как отрицательные аномалии доминируют в Каттегате и западнее Борнхольма (рис. 4 *е*).

Средняя интенсивность аномалий солености достигает 10 psu в районе Датских проливов, 3—4 psu в Арконском и Борнхольмском бассейнах и уменьшается до 0,5—2 psu в других районах Балтики (рис. 5 *а—б*). Восточнее о. Борнхольм отчетливо выделяется узкая меандрирующая зона их повышенных значений, которая согласуется с путями распространения вод ББЗ в центральную часть Балтийского моря [21]. Разность между средней интенсивностью положительных и отрицательных аномалий максимальна в районе Датских проливов, причем соленостные аномалии доминируют юго-восточнее, а пресные северо-западнее Датских проливов (рис. 5 *в*). В остальных частях Балтийского моря разница редко превышает 0,5 psu по модулю.

Распределение максимальной интенсивности в целом совпадает с распределением её средних значений, при этом в Западном и Восточном Готландских бассейнах наблюдается увеличение величин до 4—6 psu (рис. 5 *г—д*). Для данного

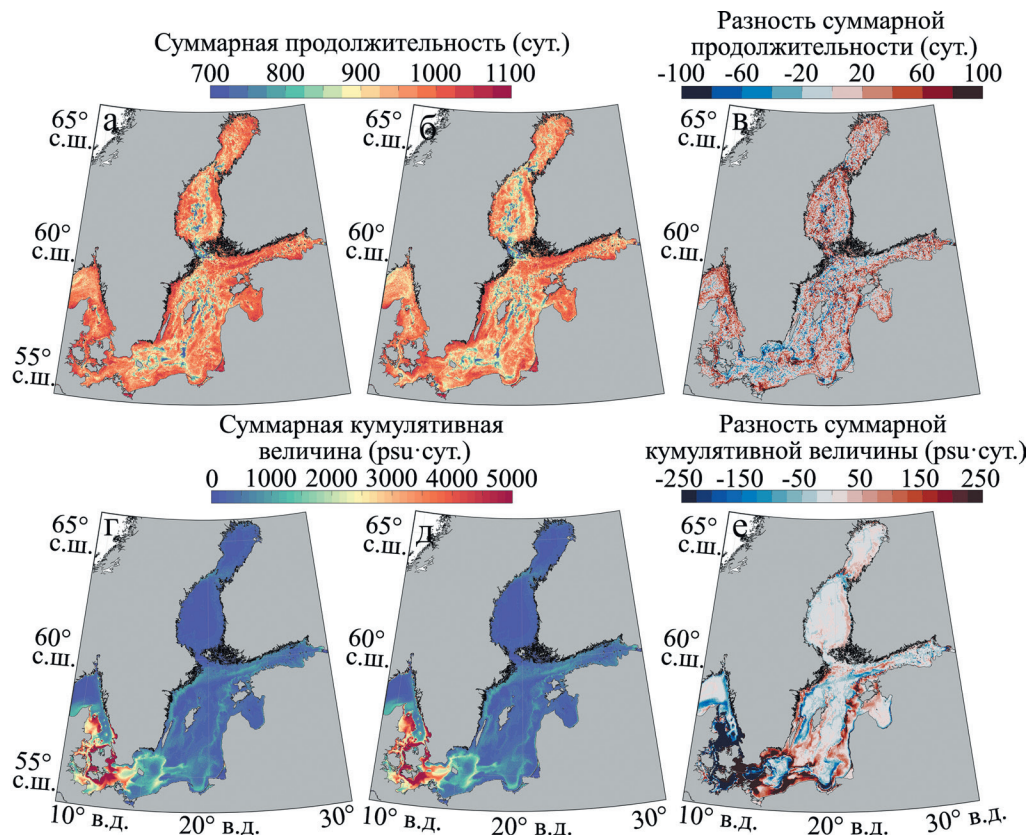


Рис. 4. Суммарная продолжительность (сут.) положительных (а) и отрицательных (б) аномалий солёности за 1993—2021 гг., а также их разность (в); Суммарная кумулятивная величина (psu · сут.) положительных (г) и отрицательных (д) аномалий солёности за 1993—2021 гг., а также их разность (е).

Fig. 4. Total duration (days) of positive (a) and negative (б) salinity anomalies for 1993—2021, as well as their difference (в); Total cumulative value (psu · day) of positive (г) and negative (д) salinity anomalies for 1993—2021, as well as their difference (е).

параметра разность между солёностными и пресными аномалиями отмечается не только в районе Датских проливов, но еще и в Готландских бассейнах и в Финском заливе (рис. 5 е).

График временного хода свидетельствует о наличии значимого линейного положительного тренда для межгодового количества аномалий и о существенном увеличении их количества в последние годы (от 5,5 аномалий на ячейку сетки в 2000 г. до 8,3 аномалий на ячейку сетки в 2020 г.), при этом объясняется 51 % и 49 % доли дисперсии, соответственно (рис. 6 а и табл. 1). Средняя продолжительность аномалий варьируется от 4,5 сут. в 2017 г. до 5,7 сут. в 1993 г. (рис. 6 б). При

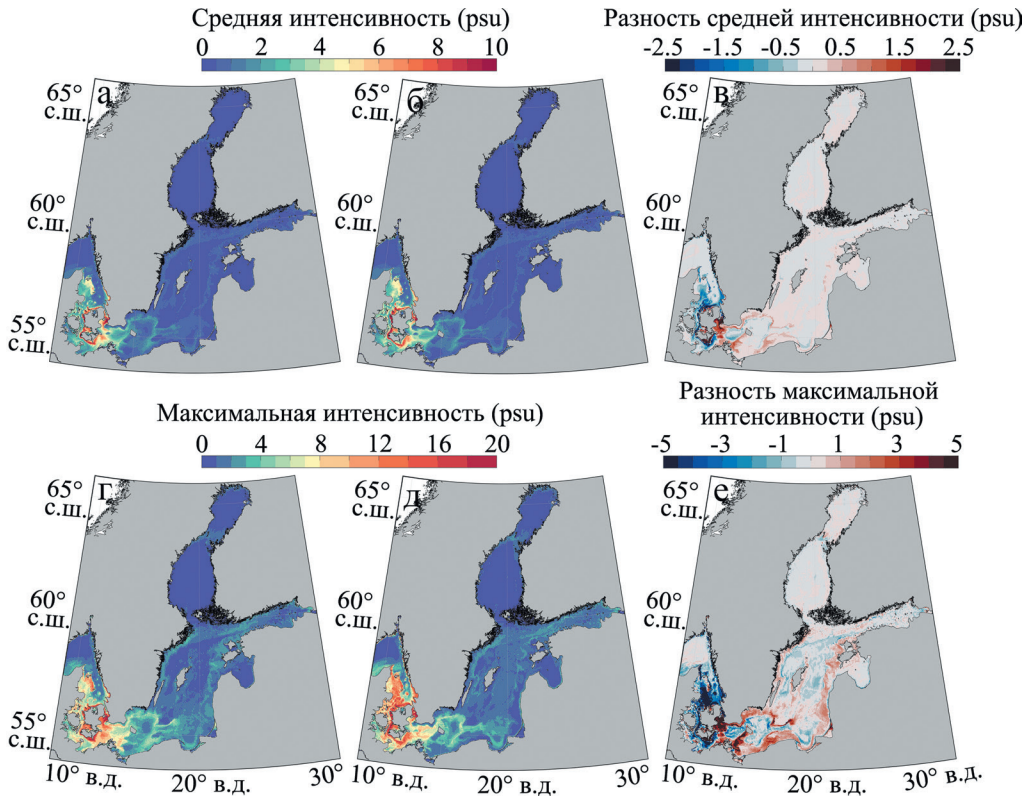


Рис. 5. Средняя интенсивность (psu) положительных (а) и отрицательных (б) аномалий солёности за 1993—2021 гг., а также их разность (в). Максимальная интенсивность (psu) положительных (г) и отрицательных (д) аномалий солёности за 1993—2021 гг., а также их разность (е).

Fig. 5. Average intensity (psu) of positive (a) and negative (б) salinity anomalies for 1993—2021, as well as their difference (в); Maximum intensity (psu) of positive (г) and negative (д) salinity anomalies for 1993—2021, as well as their difference (е).

этом для солёностных аномалий обнаружен значимый линейный тренд, который объясняет 16 % дисперсии (табл. 1). Увеличение числа аномалий солёности и их средней продолжительности в последние годы приводит к значительному росту суммарной продолжительности аномалий в 2017—2021 гг. (рис. 6 в). Несмотря на это, в отдельные годы (27 сут. в 1996 г., 25 сут. в 2000 г., 27 сут. в 2004 г., 32 сут. в 2015 г. и 2017 г.) заметно резкое снижение значений. Для данной характеристики обнаружен значимый положительный линейный тренд, при этом коэффициент детерминации (R^2) равен 0,52 и 0,43, соответственно.

Повышенные значения кумулятивной величины были зарегистрированы в 1994, 1998, 2003, 2014 и в 2016 гг. (рис. 6 з). Для данного параметра тренд не является значимым при уровне значимости $\alpha = 0,05$ (табл. 1). Для средней

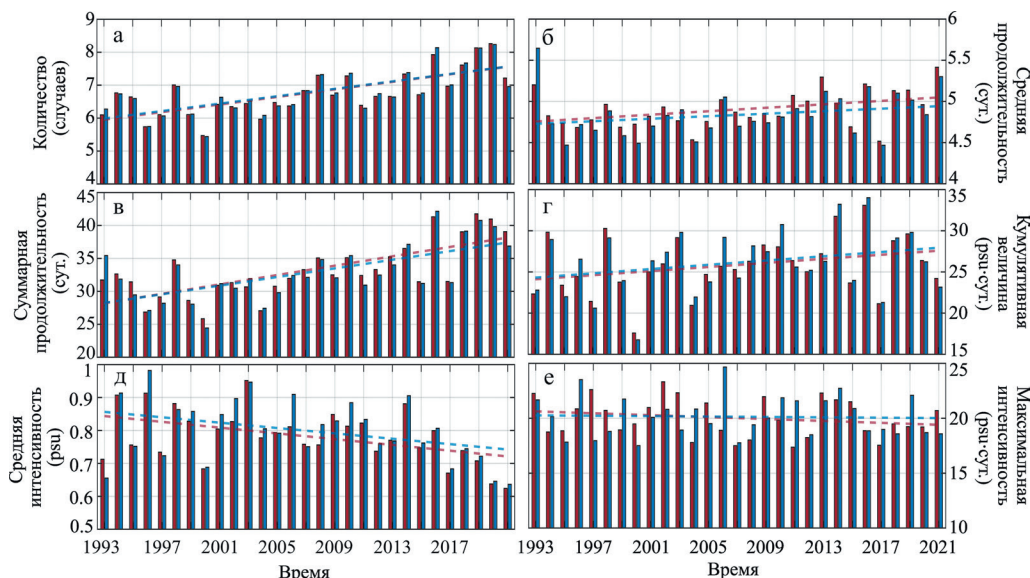


Рис. 6. Временной ход количества аномалий (случаев) солёности (а), их средней продолжительности (сут.) (б), их суммарной продолжительности (сут.) (в), их кумулятивной величины (psu · сут.) (г), их средней интенсивности (psu) (д), их максимальной интенсивности (psu) (е) за 1993—2021 гг., осредненных для всей акватории моря.

Красным цветом отмечены положительные аномалии, синим — отрицательные. Пунктирными линиями отмечены линейные тренды для положительных (красный) и отрицательных (синий) аномалий. Тренды для количества, средней и суммарной продолжительности, а также средней интенсивности являются значимыми при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Fig. 6. Time variability number of anomalies (pieces) (a), their average duration (days) (b), their total duration (days) (c), their cumulative value (psu · day) (g), their average intensity (psu) (d), their maximum intensity (psu) (e) for 1993—2021.

Positive anomalies are marked in red, negative ones in blue. Dashed lines indicate linear trends for positive (red) and negative (blue) anomalies. Trends for amount, average and total duration, as well as average intensity are significant at a significance level $\alpha = 0,05$.

интенсивности характерно наличие значимого отрицательного линейного тренда и значительная межгодовая изменчивость с увеличением в годы интенсивных ББЗ (2003 г. и 2014 г.) (рис. 6 д—е и табл. 1). Максимальная интенсивность аномалий существенно варьируется по годам, при этом обнаруженный отрицательный линейный тренд не является значимым (рис. 6 е и табл. 1).

Среднее число аномалий солёности обоих типов минимально в феврале (18,7 и 18,6 случаев, соответственно) и слабо меняется в остальные месяцы (рис. 7 а). Для средней продолжительности аномалий свойственна слабая внутригодовая изменчивость (рис. 7 б). Так, она минимальна в октябре (3,8 сут. и 3,75 сут., соответственно), и максимальна в марте (4,0 сут. и 4,1 сут., соответственно).

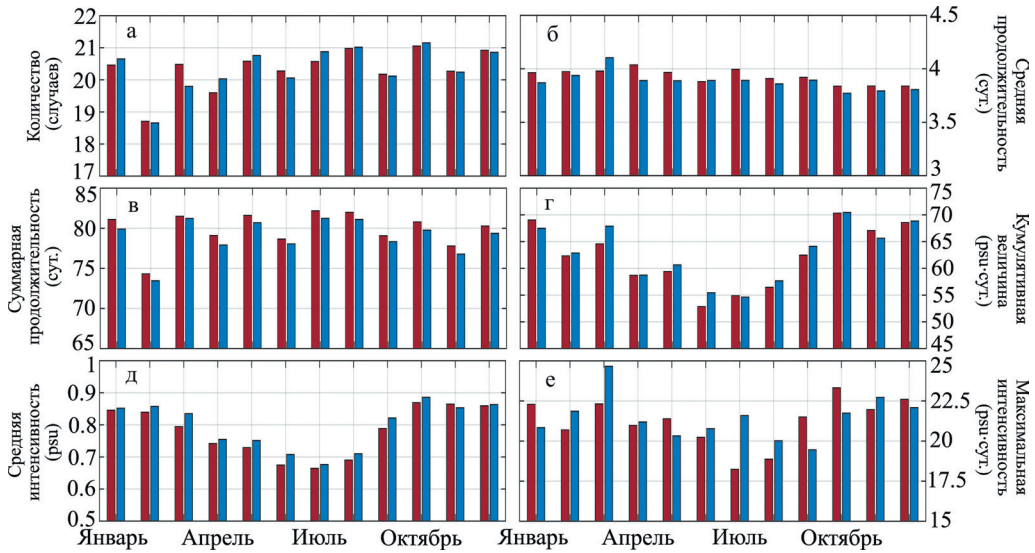


Рис. 7. Внутригодовой ход аномалий солености: их количества (случаев) (а), средней продолжительности (сут.) (б), суммарной продолжительности (сут.) (в), кумулятивной величины (psu · сут.) (г), средней интенсивности (psu) (д), максимальной амплитуды (psu) (е) за 1993—2021 гг.

Красным цветом отмечены положительные аномалии, синим — отрицательные.

Fig. 7. Intraannual course of salinity anomalies: their number (psu) (a), average duration (days) (б), total duration (days) (в), cumulative value (psu · day) (г), average intensity (psu · day) (д), maximum intensity (psu · day) (е) for 1993—2021.

Positive anomalies are marked in red, negative ones in blue.

Таблица 1

Оценки линейного тренда, его уровня значимости (P -значение), а также коэффициента детерминации (R^2), рассчитанные для основных параметров положительных и отрицательных аномалий солености, осредненных по всей акватории моря

Estimates of the linear trend, its significance level (P -value), and the coefficient of determination (R^2) calculated for the main parameters of positive and negative salinity anomalies, averaged over the sea area

Характеристика	Уравнение линейного тренда					
	Величина, $X/10$ лет		P -значение		R^2	
	Полож. аномалии	Отриц. аномалии	Полож. аномалии	Отриц. аномалии	Полож. аномалии	Отриц. аномалии
Осредненное число случаев аномалий солености	0,573	0,562	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	0,51	0,49
Средняя продолжительность, сутки	0,105	0,076	0,029	0,206	0,16	0,06

Характеристика	Уравнение линейного тренда					
	Величина, $X/10$ лет		P -значение		R^2	
	Полож. аномалии	Отриц. аномалии	Полож. аномалии	Отриц. аномалии	Полож. аномалии	Отриц. аномалии
Суммарная продолжительность, сутки	3,556	3,272	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	0,52	0,43
Кумулятивная величина, $\text{psu} \cdot \text{сут}$	1,238	1,295	0,11	0,13	0,09	0,08
Средняя интенсивность, psu	-0,044	-0,041	0,01	0,04	0,21	0,14
Максимальная интенсивность, psu	-0,436	-0,087	0,27	0,83	0,045	0,002

Изменчивость суммарной продолжительности аномалий и их количества схожи (рис. 7 *в*). При этом для кумулятивной величины, а также средней и максимальной интенсивности аномалий свойственна значительная внутригодовая изменчивость. Так, кумулятивная величина минимальна в июне ($52,8 \text{ psu} \cdot \text{сут.}$ и $55,2 \text{ psu} \cdot \text{сут.}$) и максимальная в октябре ($70,1 \text{ psu} \cdot \text{сут.}$ и $70,2 \text{ psu} \cdot \text{сут.}$, соответственно) (рис. 7 *г*). Наибольшая средняя интенсивность соленостных и пресных аномалий (около $0,88 \text{ psu}$) зафиксирована в октябре, тогда как минимум (порядка $0,66 \text{ psu}$) наблюдается в июле (рис. 7 *д*). Наибольшая максимальная интенсивность (около $23,3 \text{ psu}$ и $24,7 \text{ psu}$, для положительных и отрицательных аномалий, соответственно) наблюдается в октябре и в марте (рис. 7 *е*).

На рис. 8 показано распределение повторяемости положительных и отрицательных аномалий солености в зависимости от их продолжительности за 1993—2021 гг. Наибольшая повторяемость свойственна для продолжительности 2—5 сут., причем самые высокие значения (более 90 %) регистрируются юго-восточнее Готланда, в Борнхольмском бассейне и в Гданьском заливе (рис. 8 *а, ё*). Для аномалий с продолжительностью 6—10 сут. и 11—15 сут. характерно схожее пространственное распределение, при этом их повторяемости намного меньше (рис. 8 *б, в, ж и з*). Повторяемость аномалий с продолжительностью более 16 сут. не превышает 20 % для отдельных участков Балтийского моря (рис. 8 *г, д, е, и, к, л*). Для пресных аномалий с продолжительностью 26—90 сут. характерна большая повторяемость, по сравнению с положительными аномалиями, причем разница наиболее заметна в Борнхольмском и Арконском бассейнах, Гданьском заливе, а также в наиболее глубоководной части Восточного Готландского бассейна (рис. 8 *е и л*).

Как и в случае с числом аномалий, повторяемость их кумулятивной величины максимальна для продолжительности 2—5 сут. и 6—10 сут. (рис. 9 *а—б, ё—ж*). Во многих районах моря повторяемость аномалий с продолжительностью 2—5 сут. может превышать 90—95 %. Наибольшая кумулятивная величина аномалий с продолжительностью более 11 сут. зафиксирована в Датских проливах, у юго-восточного побережья Швеции, в восточной части Гданьского залива, в Финском и Рижском заливах, а также в глубоководных частях Готландского

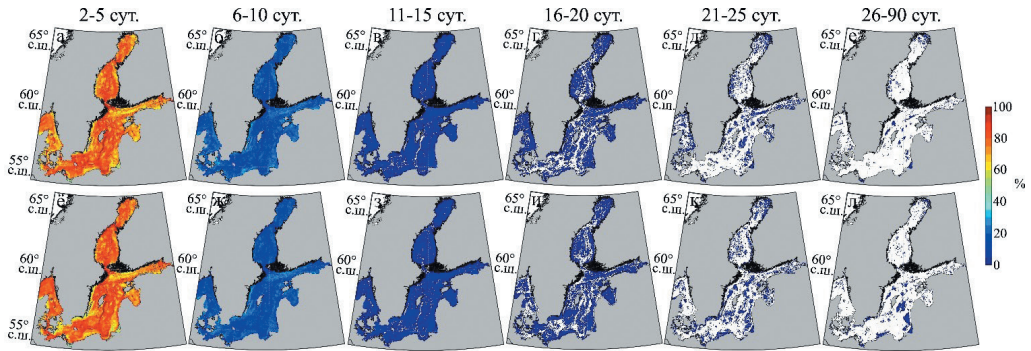


Рис. 8. Повторяемость (%) числа положительных (верхний ряд) и отрицательных (нижний ряд) аномалий солёности с продолжительностью 2—5 сут. (а, ё), 6—10 сут. (б, ж), 11—15 сут. (в, з), 16—20 сут. (г, и), 21—25 сут. (д, к) и 26—90 сут. (е, л) за 1993—2021 гг.

Fig. 8. Probability (%) of the number of positive (upper row) and negative (lower row) salinity anomalies with duration of 2—5 days (a, ё), 6—10 days (б, ж), 11—15 days (в, з), 16—20 days (г, и), 21—25 days (д, к) and 26—90 days (е, л) for 1993—2021.

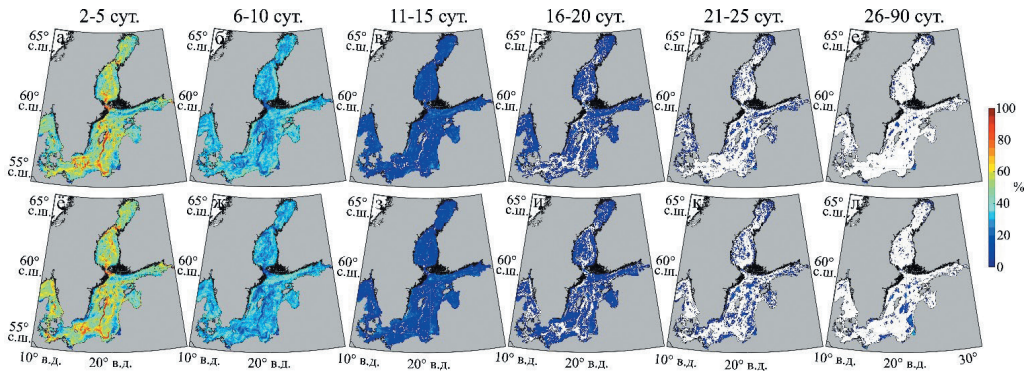


Рис. 9. Повторяемость (%) суммарной кумулятивной величины положительных (верхний ряд) и отрицательных (нижний ряд) аномалий солёности с продолжительностью 2—5 сут. (а, ё), 6—10 сут. (б, ж), 11—15 сут. (в, з), 16—20 сут. (г, и), 21—25 сут. (д, к) и 26—90 сут. (е, л) за 1993—2021 гг.

Fig. 9. Probability (%) of the total cumulative value of positive (upper row) and negative (lower row) salinity anomalies with duration of 2—5 days (a, ё), 6—10 days (б, ж), 11—15 days (в, з), 16—20 days (г, и), 21—25 days (д, к) and 26—90 days (е, л) for 1993—2021.

бассейна (рис. 9 в—е и и—л). Как и ранее, наиболее продолжительные отрицательные аномалии регистрируются в Датских проливах, Арконском и Борнхольмском бассейнах чаще по сравнению с положительными (рис. 9 л и е).

Обсуждение результатов

Физический механизм формирования придонных аномалий солёности в океанах и морях наиболее полно описывается уравнением переноса и диффузии субстанции [22], согласно которому изменение солёности в какой-либо точке моря определяется адвекцией соли морскими течениями, изменением её концентрации за счет горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии и составляющих водного баланса.

В синоптическом диапазоне пространственно-временных масштабов изменчивость солёности в придонном слое моря под влиянием адвекции и турбулентной диффузии может вызываться различными океанологическими процессами, такими как ветровые течения, осенне-зимняя конвекция, синоптические вихри, различные виды низкочастотных волн, апвеллинги и даунвеллинги.

Значительное влияние на синоптические аномалии солёности Балтийского моря оказывают затоки соленых североморских вод, возникающие под воздействием интенсивных и продолжительных ветров западных румбов в результате распространения в Европейский регион из Северной Атлантики глубоких атмосферных циклонов [3, 8, 9, 15, 21]. Так, самая большая кумулятивная величина, интенсивность аномалий и их наибольшее количество прослеживается в районе Датских проливов и южной части открытой Балтики (рис. 4 $z-d$ и рис. 4 $a-b$, $z-d$). Поскольку это сравнительно мелководные акватории, они наиболее часто подвержены воздействию многочисленных, но слабых затоков, не достигающих центральной глубоководной части Балтики [15, 21]. И, наоборот, когда синоптическая ситуация меняется и начинают дуть восточные ветры, происходит отток вод из Балтики в пр. Каттегат. В такие периоды юго-западная часть моря заполняется распреснёнными водами, поступающими из северных районов открытой Балтики. Именно поэтому в юго-западной части моря отмечается максимум количества аномалий и их интенсивности (см. рис. 3 и 5), а их продолжительность близка к среднему периоду прохождения атмосферных циклонов над Балтикой (2,6 суток) [23] и естественному синоптическому периоду (5—7 суток) (рис. 3 $z-d$).

Наши результаты показывают, что средняя продолжительность аномалий солёности в прибрежных районах Балтийского моря заметно больше, чем в открытых глубоководных районах Балтики и Ботнического залива (рис. 3 $z-d$). Эта особенность может быть связана с тем, что в прибрежных районах солёностные аномалии вызываются, главным образом, апвеллингами и даунвеллингами, время жизни которых варьируется от нескольких суток до одного месяца [24]. В открытых районах Балтийского моря аномалии солёности в придонном слое генерируются, по-видимому, в результате вихреобразования, вызванного бароклинной и баротропной неустойчивостью течений. Полученные результаты не противоречат этой гипотезе, показывая, что наибольшее число аномалий солёности (см. рис. 3 $a-b$) хорошо согласуется с местоположением струйных течений в Балтийском море [25]. Среднее время жизни мезомасштабных вихрей Балтийского моря составляет 2,83 суток [26], что значительно меньше продолжительности апвеллингов [24]. Для глубоководных районов также характерны низкие

значения суммарной кумулятивной величины (менее 500 psu · сут.), подтверждающие слабое обновление их вод.

Другим механизмом, оказывающим существенное влияние на синоптические аномалии солёности Балтийского моря, является наличие узких струйных меандрирующих течений, прослеживающихся по результатам численного гидродинамического моделирования динамики вод Балтийского моря при разных масштабах временного осреднения [25, 27]. Так, высокие средние скорости течений более 4 см/с в придонном слое характерны для районов с большим количеством аномалий, тогда как областям с малым числом аномалий свойственны средние скорости порядка 1—2 см/с [25]. Также отчетливо заметно, что высокие скорости течений в придонном слое способствуют уменьшению средней продолжительности аномалий солёности (рис. 3).

Дополнительными факторами, существенно влияющими на гидрологический режим Балтийского моря и оказывающими влияние на формирование аномалий солёности, могут являться процессы апвеллинга (даунвеллинга) и мезомасштабные вихри. Так, в районах с наибольшей суммарной продолжительностью аномалий солёности (например, в западной части Финского залива, а также у южного и юго-восточного побережья Швеции) отмечается высокая частота апвеллингов, достигающая 20—30 % для периода с мая по сентябрь [24]. При этом для областей с наименьшим количеством аномалий солёности, таких как, восточная часть Гданьского залива и южная часть Рижского залива, характерна малая частота апвеллингов для периода с мая по сентябрь, не превышающая 10 % [24].

В работе [26] обнаружено, что средняя продолжительность жизни мезомасштабных вихрей в Балтийском море составляет 2,8 сут, при этом их наибольшее количество обнаружено в районе Аландских островов, вокруг Готланда и Борнхольма, а также в некоторых частях Рижского, Гданьского, Финского и Ботнического заливов. Возможно, наличие большого количества вихрей в данных областях способствует усилению горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии, в результате чего увеличивается количество аномалий солёности, их интенсивность и кумулятивная величина. Кроме того, для количества мезомасштабных вихрей в Балтийском море был обнаружен значимый положительный линейный тренд, указывающий на увеличение их количества в последние годы [26]. Очевидно, подобное увеличение количества вихрей может быть одной из причин аналогичного увеличения солёностных аномалий в последнее время (рис. 6 а).

Для областей с высокой интенсивностью аномалий и их суммарной кумулятивной величиной характерна существенная разница между значениями соответствующих параметров положительных и отрицательных аномалий. Такое различие может свидетельствовать о различных механизмах формирования положительных и отрицательных аномалий. Также можно заметить, что в районе Датских проливов, а также у Южного побережья Швеции, в Восточном Готландском бассейне и в западной части Финского залива разность между положительными и отрицательными аномалиями наиболее однородна по пространству и представляет собой чередование узких и вытянутых областей разного знака (рис. 2—4 в, е). Подобную особенность можно объяснить как схожестью гидрологического режима

вдоль участка одного знака, так и влиянием внешних факторов (например, топографии) в противоположном направлении.

Для синоптических аномалий солёности характерна существенная межгодовая и сезонная изменчивость их основных характеристик (рис. 6 и рис. 7). Для количества аномалий, их средней и суммарной продолжительностей обнаружены положительные значимые линейные тренды, тогда как средняя интенсивность аномалий характеризуется значимым отрицательным трендом (табл. 1). Уменьшение интенсивности аномалий придонной солёности в прибрежных районах может быть вызвано наблюдающимся снижением скорости ветра над Балтийским морем. Инструментальные измерения на береговых метеорологических станциях свидетельствуют, что за последние 40 лет отмечаются значимые отрицательные тренды в изменениях математического ожидания, дисперсии и максимумов скорости ветра над Балтикой [15, 28, 29]. Межгодовая изменчивость параметров солёностных аномалий схожа с результатами из других работ. Так, в работе [30] отмечаются схожие годы как с низкими (1993, 2000 и 2017 гг.), так и с высокими (2003, 2014 гг.) значениями аномалий солёности придонного слоя. В работе [6] среднегодовая солёность для изохалины $> 8,9 \text{ г} \cdot \text{кг}^{-1}$ резко падает в 2000 году, что также наблюдается и для аномалий солёности по нашим результатам. Увеличение суммарной продолжительности аномалий в декабре-январе может быть связано с ростом в данные месяцы как числа больших балтийских заток, так и их продолжительности [9]. В летний период как средняя, так и максимальная интенсивность аномалий ниже, по сравнению с остальными периодами (рис. 7 *д—е*).

Распределение повторяемости количества и кумулятивной величины аномалий по продолжительности свидетельствует о наибольшем вкладе аномалий с продолжительностью 2—5 и 6—10 суток (рис. 8 и рис. 9). Известно, что временные промежутки 2—5 суток характерны для проходящих над акваторией Балтийского моря циклонов и антициклонов, под влиянием которых могут образовываться интенсивные колебания уровня вплоть до катастрофического масштаба [19]. Аномалии с периодами более 5 суток могут быть связаны с поступлением солёных североморских вод во время ББЗ, средняя продолжительность которых составляет по разным источникам от 6 до 28 дней [7, 9].

Выводы

В настоящей работе на основе данных реанализа Балтийского моря рассматривается синоптическая изменчивость придонного слоя Балтийского моря за 1993—2021 гг. Полученные результаты свидетельствуют о существенной пространственно-временной неоднородности характеристик положительных и отрицательных аномалий солёности, проявляющихся в широком диапазоне масштабов и частот. Как правило, в мелководных районах прослеживается большое количество аномалий солёности с малой продолжительностью, тогда как для глубоководных районов ситуация противоположна. Наибольшая интенсивность, а также кумулятивная величина обнаружены в районе Датских проливов, Арконского и Борнхольмского бассейнов. Значения основных параметров аномалий солёности

в несколько раз могут варьироваться по годам. Для количества аномалий, средней и суммарной продолжительностей, а также кумулятивной величины обнаружено наличие значимых положительных линейных трендов, тогда как максимальная и средняя интенсивности характеризуются значимыми отрицательными трендами.

Наибольшее количество аномалий прослеживается в летний период, при этом их кумулятивная величина максимальна в осенне-зимний период. В летний период интенсивность как положительных, так и отрицательных аномалий минимальна. Установлено, что на гидрологический режим придонного слоя Балтийского моря наибольшее влияние оказывают положительные и отрицательные аномалии солёности с продолжительностью 2—5 и 6—10 суток, поскольку они вносят максимальный вклад в количество и суммарную кумулятивную величину аномалий. Данное влияние резко возрастает в период с октября по март.

Список литературы

1. Залогин Б. С., Косарев А. Н. Моря. Москва: Изд-во Мысль, 1999. 400 с.
2. González-Gambau V., Olmedo E., Turiel A., et al. First SMOS Sea Surface Salinity dedicated products over the Baltic Sea // *Earth System Science Data*. 2022. Vol. 14(5). P. 2343—2368. doi: 10.5194/essd-14-2343-2022.
3. Проект «Моря СССР». Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том III Балтийское море. Выпуск I. Гидрометеорологические условия. Под редакцией Ф. С. Терзиева, В. А. Рожкова, А. И. Смирновой. Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1992. 451 с.
4. Knöbel L., Nascimento-Schulze J. C., Sanders T., et al. Salinity Driven Selection and Local Adaptation in Baltic Sea Mytilid Mussels // *Front. Mar. Sci.* 2021. V. 8. 692078. P. 1—13. doi: 10.3389/fmars.2021.692078.
5. Lehmann A., Myrberg K., Post P., et al. Salinity dynamics of the Baltic Sea // *Earth Syst. Dynam.* 2022. V. 13. P. 373—392. doi: 10.5194/esd-13-373-2022.
6. Radtke H., Brunnabend S.-E., Gräwe U., Markus Meier H. E. Investigating interdecadal salinity changes in the Baltic Sea in a 1850–2008 hindcast simulation // *Clim. Past*. 2020. V. 16. P. 1617—1642. doi: 10.5194/cp-16-1617-2020.
7. Reißmann J. H., Burchard H., Feistel R., et al. Vertical mixing in the Baltic Sea and consequences for eutrophication—a review // *Prog Oceanogr.* 2009. V. 82(1). P. 47—80.
8. Leppäranta M., Myrberg K. *The Physical Oceanography of the Baltic Sea*, edited by: Blondel, P., University of Bath, UK, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, New York, 2009. 378 p.
9. Mohrholz V. Major Baltic Inflow Statistics — Revised // *Frontiers in Marine Science*. 2018. 5:384. P. 1—16. doi: 10.3389/fmars.2018.00384.
10. Bock K. H. Monatskarten des Salzgehalten der Ostsee, dargestellt für verschiedene Tiefenhorizonte [Monthly salinity maps of the Baltic Sea for different depths]. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Ergänzungshäft Reihe B*, 1971, 12, 147 p.
11. Gräwe U., Friedland R., Burchard H. The future of the western Baltic Sea: two possible scenarios // *Ocean Dynamics*. 2013. 63(8). P. 901—921. doi: 10.1007/s10236-013-0634-0.
12. Jobling M. Temperature and growth: modulation of growth rate via temperature change. Chapter in *Global Warming Implications for Freshwater and Marine Fish*, Cambridge University Press, Cambridge, 1997. 225—254 pp. doi: 10.1017/CBO9780511983375.010.
13. Vuorinen I., Hänninen J., Rajasilta M., et al. Scenario simulations of future salinity and ecological consequences in the Baltic Sea and adjacent North Sea areas—implications for environmental monitoring // *Ecological Indicators*. 2015. V. 50. P. 196—205. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.10.019.
14. Litina E. N., Zakharchuk E. A., Tikhonova N. A. Dynamics of Hypoxic Zones in the Baltic Sea in the Late XX—Early XXI Century // *Water Resources*. 2020. V. 47(3). P. 478—485. doi: 10.1134/S0097807820030082.

15. Захарчук Е. А., Литина Е. Н., Клевандов Ю. П. и др. Нестационарность гидрометеорологических процессов Балтийского моря в условиях меняющегося климата // Труды ГОИН. 2017. №. 218. С. 6—62.
16. Захарчук Е. А., Сухачев В. Н., Тихонова Н. А., Литина Е. Н. Стерические колебания уровня Балтийского моря // Russian Journal of Earth Sciences. 2023. Т. 23. ES4014. doi: 10.2205/2023es000846.
17. Каменкович В. М., Кошляков М. Н., Монин А. С. Синоптические вихри в океане. Ленинград: Гидрометеиздат. 1987. 512 с.
18. Монин А. С. Классификация нестационарных процессов в океане // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1972. №. 7. С. 26—30.
19. Гусев А. К., Захарчук Е. А., Иванов Н. Е. и др. Динамика вод Балтийского моря в синоптическом диапазоне пространственно-временных масштабов, под ред. Е.А. Захарчука, СПб: Гидрометеиздат, 2007. 354 с.
20. Liblik T., Lips U. Stratification Has Strengthened in the Baltic Sea — An Analysis of 35 Years of Observational Data // Frontiers in Earth Science. 2019. V. 7:174. P. 1—15. doi: 10.3389/feart.2019.00174.
21. Matthaus W. The History of Investigation of Salt Water Inflows into the Baltic Sea — from the Early Beginning to Recent Results. Marine Science Reports No. 65. Rostock-Warnemuende, Germany, Baltic Sea Res. Institute (IOW), 2006. 73 p.
22. Мамаев О. И. Физическая океанография. Избранные труды. Москва: ВНИРО, 2000. 364 с.
23. Sepp M., Post P., Mändla K., Aunap R. On cyclones entering the Baltic Sea region // Boreal Env.Res. 2018. V. 23. P. 1—14.
24. 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 (3). P. 369—393. doi: 10.5697/oc.54-3.369.
25. Placke M., Meier H. E. M., Gräwe U., et al. Long-Term Mean Circulation of the Baltic Sea as Represented by Various Ocean Circulation Models // Frontiers in Marine Science. 2018. V. 5. P. 1—20. doi: 10.3389/fmars.2018.00287.
26. Травкин В. С., Тихонова Н. А., Захарчук Е. А. Мезомасштабные вихри Балтийского моря по данным физического реанализа. Метеорология и гидрология. 2024. №9. С. 35—49. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2024-9-35-49>.
27. Захарчук Е. А., Сухачёв В. Н., Тихонова Н. А. О пространственной структуре и распространении волн невских наводнений // Метеорология и гидрология. 2020. №. 4. С. 42—53.
28. Захарчук Е. А., Сухачев В. Н., Тихонова Н. А. Штормовые нагоны в Финском заливе Балтийского моря // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2021. Т. 66. Вып. 4. С. 781—805. doi: 10.21638/spbu07.2021.408.
29. Захарчук Е. А., Тихонова Н. А., Сухачев В. Н. Изменчивость уровня Балтийского моря. Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг. Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 20–22 сентября 2023 г. Том 2. Ростов-на-Дону. 2023. С. 57—62.
30. Stockmayer V., Lehmann A. Variations of temperature, salinity and oxygen of the Baltic Sea for the period 1950 to 2020 // Oceanologia. 2023. V. 65. P. 466—483. doi: 10.1016/j.oceano.2023.02.002.

References

1. Zalogin B. S., Kosarev A. N. *Morya = Seas*. Moscow: Izd-vo Mysl', 1999: 400 p. (In Russ.).
2. González-Gambau V., Olmedo E., Turiel A., et al. First SMOS Sea Surface Salinity dedicated products over the Baltic Sea. *Earth System Science Data*. 2022; 14(5): 2343—2368. doi: 10.5194/essd-14-2343-2022.
3. *Proyekt «Morya SSSR». Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morey SSSR. Tom III Baltiyskoye more. Vypusk I. Gidrometeorologicheskiye usloviya = The project “Seas of the USSR”. Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Volume III The Baltic Sea. Issue I. Hydrometeorological conditions*. Edited by F. S. Terziev, V. A. Rozhkov, A. I. Smirnova. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1992: 451 p. (In Russ.).
4. Knöbel L., Nascimento-Schulze J. C., Sanders T., et al. Salinity Driven Selection and Local Adaptation in Baltic Sea Mytilid Mussels. *Front. Mar. Sci.* 2021; (8):692078. P. 1—13. doi: 10.3389/fmars.2021.692078.

5. Lehmann A., Myrberg K., Post P., et al. Salinity dynamics of the Baltic Sea. *Earth Syst. Dynam.* 2022; (13): 373—392. doi: 10.5194/esd-13-373-2022.
6. Radtke H., Brunnabend S.-E., Gräwe U., Markus Meier H. E. Investigating interdecadal salinity changes in the Baltic Sea in a 1850–2008 hindcast simulation. *Clim. Past.* 2020; (16): 1617—1642. doi: 10.5194/cp-16-1617-2020.
7. Reißmann J. H., Burchard H., Feistel R., et al. Vertical mixing in the Baltic Sea and consequences for eutrophication—a review. *Prog. Oceanogr.* 2009; 82(1): 47—80.
8. Leppäranta M., Myrberg K. *The Physical Oceanography of the Baltic Sea*. Edited by: Blondel, P., University of Bath, UK, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, New York, 2009: 378 p.
9. Mohrholz V. Major Baltic Inflow Statistics — Revised. *Frontiers in Marine Science*. 2018; 5(384): 1—16. doi: 10.3389/fmars.2018.00384.
10. Bock K. H. Monatskarten des Salzgehalten der Ostsee, dargestellt für verschiedene Tiefenhorizonte [Monthly salinity maps of the Baltic Sea for different depths]. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Ergänzungshäft Reihe B*, 1971;(12): 147 p.
11. Gräwe U., Friedland R., Burchard H. The future of the western Baltic Sea: two possible scenarios. *Ocean Dynamics*. 2013; 63(8): 901—921. doi: 10.1007/s10236-013-0634-0.
12. Jobling M. Temperature and growth: modulation of growth rate via temperature change. Chapter in *Global Warming Implications for Freshwater and Marine Fish*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997; 225—254 pp. doi: 10.1017/CBO9780511983375.010.
13. Vuorinen I., Hänninen J., Rajasilta M., et al. Scenario simulations of future salinity and ecological consequences in the Baltic Sea and adjacent North Sea areas—implications for environmental monitoring. *Ecological Indicators*. 2015; (50): 196—205. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.10.019.
14. Litina E. N., Zakharchuk E. A., Tikhonova N. A. Dynamics of Hypoxic Zones in the Baltic Sea in the Late XX—Early XXI Century. *Water Resources*. 2020; 47(3): (478—485). doi: 10.1134/S0097807820030082.
15. Zakharchuk E. A., Litina E. N., Klevantsov Yu. P., et al. Non-stationarity of hydrometeorological processes in the Baltic Sea under changing climate conditions. *Trudy GOIN = Proceedings of GOIN*. 2017;(218): (6—62). (In Russ.).
16. Zakharchuk E. A., Sukhachev V. N., Tikhonova N. A., Litina E. N. Steric oscillations of the Baltic Sea level. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2023; 23: ES4014. doi: 10.2205/2023es000846 (In Russ.).
17. Kamenkovich V. M., Koshlyakov M. N., Monin A. S. *Sinopticheskiye vikhri v okeane = Synoptic eddies in the ocean*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987: 512 p. (In Russ.).
18. Monin A. S. Classification of non-stationary processes in the ocean. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Fizika Zemli = Izvestiya AN SSSR. Physics of the Earth*. 1972; (7): (26—30). (In Russ.).
19. Gusev A. K., Zakharchuk E. A., Ivanov N. E., et al. *Dinamika vod Baltijskogo morya v sinopticheskom diapazone prostranstvenno-vremennykh masshtabov = Dynamics of the Baltic Sea waters in the synoptic range of spatial-temporal scales*, edited by E. A. Zakharchuk. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2007: 354 p. (In Russ.).
20. Liblik T., Lips U. Stratification Has Strengthened in the Baltic Sea — An Analysis of 35 Years of Observational Data. *Frontiers in Earth Science*. 2019; 7(174): 1—15. doi: 10.3389/feart.2019.00174.
21. Matthaus W. the History of Investigation of Salt Water Inflows into the Baltic Sea — from the Early Beginning to Recent Results. *Marine Science Reports No. 65*. Rostock-Warnemuende, Germany, Baltic Sea Res. Institute (IOW), 2006: 73 p.
22. Mamaev O. I. *Fizicheskaya okeanografiya. Izbrannyye trudy = Physical oceanography. Selected works*. Moscow: VNIRO, 2000: 364 p. (In Russ.).
23. Sepp M., Post P., Mändla K., Aunap R. On cyclones entering the Baltic Sea region. *Boreal Env.Res.* 2018; (23): 1—14.
24. Lehmann A., Myrberg K., Höflisch 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.
25. Placke M., Meier H. E. M., Gräwe U., et al. Long-Term Mean Circulation of the Baltic Sea as Represented by Various Ocean Circulation Models. *Frontiers in Marine Science*. 2018; (5): 1—20. doi: 10.3389/fmars.2018.00287.
26. Travkin V. S., Tikhonova N. A., Zakharchuk E. A. Mesoscale Eddies of the Baltic Sea according to the Physical Reanalysis. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2024; (49): 784—794. <https://doi.org/10.3103/S1068373924090048>.

27. Zakharchuk E. A., Sukhachev V. N., Tikhonova N. A. On the spatial structure and propagation of Neva flood waves. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2020; 4: (42—53). (In Russ.).
28. Zakharchuk E. A., Sukhachev V. N., Tikhonova N. A. Storm surges in the Gulf of Finland of the Baltic Sea. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle = Bulletin of St. Petersburg University. Earth Sciences*. 2021; 66(4): (781—805). doi: 10.21638/spbu07.2021.408 (In Russ.).
29. Zakharchuk E. A., Tikhonova N. A., Sukhachev V. N. Baltic Sea level variability. *Vodnyye resursy v usloviyakh global'nykh vyzovov: ekologicheskiye problemy, upravleniye, monitoring. Sbornik trudov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem = Water resources in the context of global challenges: environmental issues, management, monitoring. Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation*. September 20—22, 2023. Rostov-on-Don. 2023; (2): (57—62). (In Russ.).
30. Stockmayer V., Lehmann A. Variations of temperature, salinity and oxygen of the Baltic Sea for the period 1950 to 2020. *Oceanologia*. 2023; (65): 466—483. doi: 10.1016/j.oceano.2023.02.002.

Информация об авторах

Травкин Владимир Станиславович, Санкт-Петербургский государственный университет, аспирант; СПО ФГБУ «ГОИН», лаборатория ветрового волнения, научный сотрудник, vtravkin99@gmail.com.

Тихонова Наталья Александровна, Санкт-Петербургский государственный университет, доцент; СПО ФГБУ «ГОИН», лаборатория спутниковой океанографии, заведующий лабораторией, nata-tik@yandex.ru.

Захарчук Евгений Александрович, Санкт-Петербургский государственный университет, профессор, заведующий кафедрой океанологии, eazakharchuk@yandex.ru.

Information about authors

Travkin Vladimir Stanislavovich, St. Petersburg State University, postgraduate student; N. N. Zubov's State Oceanographic Institute, Roshydromet, Wind wave Laboratory, researcher, vtravkin99@gmail.com.

Tikhonova Natalia Alexandrovna, St. Petersburg State University, Associate Professor; N. N. Zubov's State Oceanographic Institute, Roshydromet, Laboratory of Satellite Oceanography, Head of the laboratory, nata-tik@yandex.ru.

Zakharchuk Eugeny Alexandrovich, St. Petersburg State University, Professor, Head of the Department of Oceanology, eazakharchuk@yandex.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 30.11.2024

Принята к печати после доработки 15.04.2025

The article was received on 30.11.2024

The article was accepted after revision on 15.04.2025