

# СТЕРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Е. А. Захарчук<sup>1,2</sup>, В. Н. Сухачев<sup>\*1,3</sup>, Н. А. Тихонова<sup>1,3</sup>, Е. Н. Литина<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра Российской академии наук, Мурманск, Россия

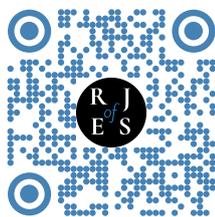
<sup>3</sup>Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Москва, Россия

\* **Контакт:** В. Н. Сухачев, syhachev@mail.ru

Основная цель работы – оценить возможности данных регионального реанализа NEMO 3,6 (Nucleus for European Modeling of the Ocean) для реалистичного описания стерических колебаний уровня Балтийского моря и исследовать с помощью этих данных пространственно-временную структуру, а также возможные причины современных изменений уровня моря, вызванных вариациями плотности воды, в диапазоне межгодовых и сезонных масштабов изменчивости. С помощью оценки различных статистических критериев точности проводится сравнение рядов стерических колебаний уровня, рассчитанных по контактными измерениями температуры и солёности на океанографических станциях и по данным регионального реанализа. Показано, что данные реанализа позволяют достаточно точно воспроизводить наблюдающиеся стерические колебания уровня Балтийского моря. Впервые исследованы пространственные изменения величин линейных трендов стерических колебаний, которые свидетельствуют, что в рассматриваемый период 1993–2020 гг. в открытой Балтике и на западе Финского залива происходит, в основном, понижение стерического уровня моря, вызванное осолонением глубинных и придонных вод, в то время как в Ботническом заливе стерический уровень растёт из-за распреснения поверхностных вод открытой Балтики, за счет которых, главным образом, происходит обновление водной массы Ботнического залива. Результаты гармонического анализа стерических колебаний уровня демонстрируют, что в диапазоне сезонной изменчивости преобладающий вклад в стерические колебания уровня оказывает годовая гармоника  $S_a$ , амплитуда которой значительно превосходит амплитуды гармоник  $S_{sa}$ ,  $S_{ta}$  и  $S_{qa}$ . Основное влияние на сезонные стерические колебания уровня оказывает термостерическая компонента, и только на юго-западе моря отмечается существенное влияние галостерической компоненты. В рассматриваемый период в изменениях амплитуд гармоник  $S_a$ ,  $S_{sa}$ ,  $S_{ta}$  и  $S_{qa}$  в большинстве регионов Балтийского моря отмечаются положительные линейные тренды, однако на юго-западе открытой Балтики наблюдается уменьшение амплитуд всех четырёх гармоник сезонных стерических колебаний уровня. В заключении на основе анализа и обобщения различной гидрометеорологической информации делается предположение, что выявленные современные региональные изменения стерических колебаний уровня Балтийского моря связаны с повышением температуры воздуха, увеличением атмосферных осадков, уменьшением интенсивности ветра над морем, распреснением верхнего квазиоднородного слоя и увеличением солёности глубинных и придонных вод Балтики из-за водообмена с осолоняющимися водами Северного моря.

**Ключевые слова:** уровень моря, стерические колебания, термостерическая компонента, галостерическая компонента, линейные тренды, гармонический анализ, сезонная изменчивость, составляющие пресного баланса

**Цитирование:** 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 — EDN: TLODEE



<https://elibrary.ru/TLODEE>

Получено: 22 сентября 2022 г.

Принято: 5 апреля 2023 г.

Опубликовано: 17 декабря 2023 г.



© 2023. Коллектив авторов.

## Введение

Наблюдающееся повышение уровня Мирового океана, вызванное глобальным потеплением климата, увеличивает в прибрежных районах морей и океанов вероятность случаев опасных гидрологических явлений, таких как штормовые нагоны и наводнения [Малинин, 2012; Menéndez and Woodworth, 2010; *Understanding sea-level rise and variability*, 2010]. Оценки, выполненные на основе анализа мареографных измерений, показали, что в XX столетии уровень океана повышался со скоростью от 1 до 2 мм/год [Малинин, 2012; Oppenheimer et al., 2022]. Спутниковые альтиметрические измерения демонстрируют, что в последние десятилетия скорость роста уровня Мирового океана увеличилась и составила за период 1993–2017 гг.  $3,35 \pm 0,4$  мм/год [Ablain et al., 2019]. Группа американских исследователей, применяя теорию экстремальных значений к имеющимся сведениям о темпах повышения уровня моря и наводнениях, спрогнозировала, что к 2050 году уровень океана вблизи большинства прибрежных территорий повысится на 10–20 см, а частота наводнений увеличится в 2 раза [Vitousek et al., 2017].

Анализ спутниковых альтиметрических данных свидетельствует, что в период с 1995 по 2019 гг. в Балтийском море, так же как и в Мировом океане, наблюдалось повышение уровня моря, однако величины положительных трендов на большей акватории Балтики достигали значений 4,5–5,6 мм/год [Passaro et al., 2021; Weisse et al., 2021], что заметно выше значения величины тренда в Мировом океане (3,4 мм/год) [Ablain et al., 2019]. Причины этих различий в трендовых изменениях среднего уровня Балтики и Мирового океана остаются неизученными.

Важнейшими составляющими повышения уровня Мирового океана являются его стерические изменения, обусловленные изменениями плотности воды без изменения массы из-за изменений температуры и солёности [Малинин, 2012; Провоторов, 2003; Gill and Niller, 1973; Storto et al., 2019]. В глобальном масштабе современное повышение стерического уровня океана в основном связано с расширением водных масс из-за увеличения их температуры (термостерической компоненты). Вклад теплового расширения океана в повышение его уровня в период с 1993 по 2018 гг. оценивается в 42% [Cazenave et al., 2018; WCRP Global Sea Level Budget Group, 2018]. В региональном масштабе в некоторых морях и отдельных районах океанов отмечается доминирующее влияние на стерические колебания уровня изменений солёности морской воды (галостерической компоненты) [Durack et al., 2014; Stammer et al., 2013]. Один из таких регионов – Балтийское море.

Для изучения стерических колебаний уровня Балтийского моря использовались различные данные и методы. В работе [Гордеева и др., 2012] стерические колебания уровня исследовались на основе оценок теплосодержания вод Балтийского моря за период 1958–2005 гг., приведённых в работе [Schrum et al., 2003]. Авторы приходят к заключению об отсутствии трендовой компоненты у стерических колебаний уровня Балтийского моря [Гордеева и др., 2012].

Другой результат демонстрируют авторы в [Storto et al., 2019]. Их оценки стерических колебаний по данным реанализа гидрофизических полей за более современный период 1993–2016 гг. показывают, в среднем для Балтийского моря, отрицательный тренд с величиной  $(-0,26 \pm 0,10)$  мм/год, преобладающий вклад в который оказывает галостерическая компонента.

Средние сезонные вариации стерических изменений уровня Балтийского моря изучались в работах Евгении Лисицыной по данным срочных (1 или 3 раза в месяц) измерений температуры и солёности на гидрографических станциях, расположенных у островов в прибрежной зоне [Lisitzin, 1959; 1974]. Она показала, что средние величины сезонных колебаний уровня моря за счет изменений плотности воды на глубинах до 60 м в заливах Ботническом и Финском, а также на севере открытой Балтики не превышают 2,5 см.

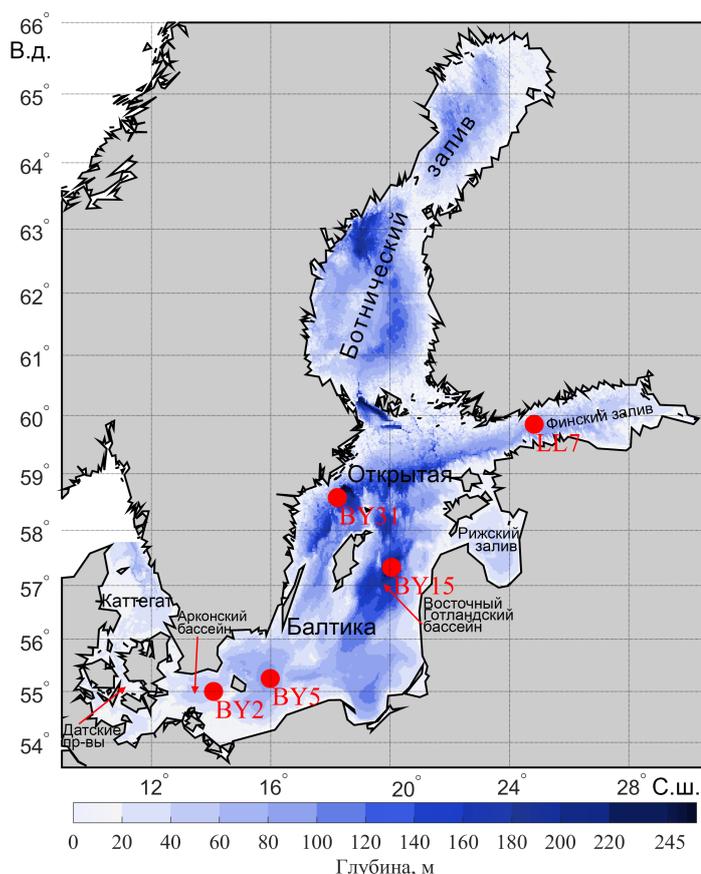
В последние годы для изучения стерических колебаний уровня океанов и морей стали успешно использовать данные глобальных и региональных реанализов гидрофизических полей [Storto et al., 2019]. Несмотря на то, что для реанализов используется

численная реализация гидродинамических моделей, основанных на приближении Буссинеска, которое не позволяет описывать изменение объёма столба морской воды без изменения его массы [Greatbatch, 1994], применяемые в рамках современных реанализов алгоритмы усвоения спутниковой и контактной информации об изменении температуры и солёности, дают возможность подстраивать рассчитанные по модели поля океанологических характеристик к их наблюдаемым значениям. Например, в работе [Köhl et al., 2007] показано, что нереалистичные тенденции в модельных оценках уровня океана, особенно в высоких широтах, исправляются при использовании реанализа океана, в котором ассимиляция данных по температуре и солёности воды корректирует стерические вариации уровня моря [Köhl et al., 2007].

В настоящее время плохо изученными остаются пространственные изменения стерических колебаний уровня Балтийского моря в диапазоне сезонных и межгодовых изменений, сравнительные вклады годовой компоненты и её обертонов в сезонные стерические колебания, пространственные различия в соотношении вкладов термостерических и галостерических изменений; не исследована также межгодовая изменчивость сезонных колебаний уровня моря, вызванных изменениями плотности вод Балтики.

Цель данной работы – оценить возможности данных регионального реанализа гидрофизических полей NEMO 3,6 для реалистичного описания стерических колебаний уровня Балтийского моря, и исследовать пространственно-временную структуру, а также возможные причины современных изменений уровня моря, вызванных вариациями плотности воды, в диапазоне межгодовых и сезонных масштабов изменчивости.

#### Данные и методы



**Рис. 1.** Батиметрия Балтийского моря (оттенки синего цвета) и океанологические станции судовых измерений температуры и солёности (красные кружки). Стрелками показаны названия районов моря.

Для исследования стерических колебаний уровня Балтийского моря использовались два источника океанологической информации. Первый – судовые измерения температуры ( $T$ ) и солёности ( $S$ ) воды на разных горизонтах гидрологических станций, поставленных в рамках международного мониторинга Балтийского моря за период 1993–2020 гг., которые были получены из базы данных DAS (<http://nest.su.se/das/>). Анализ базы DAS позволил отобрать 5 станций (см. рис. 1), наиболее обеспеченных данными, для формирования рядов среднемесячных значений  $T$  и  $S$ .

Выборка данных по  $T$  и  $S$  производилась за каждый календарный месяц в радиусе 2 миль от координат станций на горизонтах, представленных в табл. 1.

Наименьшее количество пропусков в сформированных, таким образом, рядах данных отмечалось на станции BY5 (от 4,8 до 6,2%), а наибольшее – на станции LL7 (от 22,3 до 41,7%). В начале, пропуски заменялись интерполированными значениями и ряды  $T$  и  $S$  на каждом горизонте подвергались гармоническому анализу, по результатам которого оценивались амплитуды и фазы четырёх гармоник в диапазоне сезонных колебаний (годовой, полугодовой, третьгодовой и четвёртьгодовой), а также гармоник на частотах энергонесущих максимумов в диапазоне межгодовой изменчивости. По оцененным амплитудам и фазам предвычислялись ряды гармонических колебаний  $T$  и  $S$  на выделенных частотах и производилась их суперпозиция. Затем, пропуски в исходных рядах  $T$  и  $S$  заменялись предвычисленными значениями, и полученные таким образом ряды подвергались, повторно, гармоническому анализу

**Таблица 1.** Описание выбранных рядов среднемесячных значений  $T$  и  $S$  из базы данных судовых измерений DAS

Станции Координаты, с.ш., в.д., град	Горизонты, м	Длина рядов, мес.	Пропуски, %
BY2 55,0; 14,08	1,2; 5; 10; 20,8; 29,5; 40	336	6,55; 7,14; 7,14; 7,14; 7,14; 7,14; 6,85
BY5 55,25; 15,98	1,2; 5; 10; 15; 20,8; 29,5; 40; 50; 60; 70; 80; 90	336	4,76; 4,76; 4,76; 4,76; 4,76; 4,76; 4,76; 4,76; 4,76; 4,76; 4,76; 6,25
BY15 57,329; 20,05	1,2; 5; 10; 15; 20,8; 29,5; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100; 121,2; 153,8; 197,5	336	8,04; 7,44; 7,44; 7,44; 7,44; 7,44; 7,44; 7,44; 7,44; 7,44; 7,44; 7,44; 7,44; 7,44; 7,44; 7,44
BY31 58,579; 18,23	1,2; 5; 10; 15; 20,8; 29,5; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100; 121,2; 153,8; 197,5; 250; 300; 350	336	9,23; 8,93; 8,93; 8,93; 8,93; 8,93; 8,93; 8,93; 8,63; 8,63; 8,63; 8,63; 8,63; 8,63; 8,63; 8,63; 8,63; 8,63; 8,93
LL7 59,85; 24,83	1,2; 5; 10; 15; 20,8; 29,5; 40; 50; 60; 70; 80	336	22,32; 30,95; 31,25; 31,25; 31,25; 31,55; 31,55; 31,55; 31,55; 31,55; 41,67

и предвычислению по его результатам гармоник на выделенных ранее частотах. Значения рядов повторно предвычисленных гармонических колебаний использовались для окончательной замены пропусков в исходных рядах  $T$  и  $S$ . Полученные таким образом ряды  $T$  и  $S$  на разных горизонтах использовались для оценки стерических колебаний уровня моря.

Второй источник информации – данные по  $T$  и  $S$  регионального реанализа океанологических полей [European Union-Copernicus Marine Service, 2018], основанного на численной реализации гидродинамической модели NEMO 3,6 (Nucleus for European Modeling of the Ocean) [Hordoir et al., 2015; Pemberton et al., 2017], для условий Балтийского моря, в которой используется процедура ассимиляции контактной и спутниковой информации на основе алгоритма одной из разновидностей фильтра Кальмана (Local singular evolutive interpolated Kalman (LSEIK) filter [Nerger et al., 2005]. В качестве ассимилируемых переменных в модели NEMO 3,6 использовались спутниковые данные поверхностной температуры воды, полученные Шведской ледовой службой в SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute), а также *in-situ* измерения  $T$  и  $S$  из базы данных ICES (<http://www.ices.dk>). Данные реанализа по  $T$  и  $S$  имеют суточное осреднение, продолжительность с 1993 по 2020 гг., разрешение по горизонтали 3,9 км и 56 горизонтов по вертикали (толщина слоев меняется в зависимости от глубины от 3 до 22 м).

Стерические колебания уровня моря ( $\zeta_\rho$ ) рассчитывались по следующей формуле [Белоненко и Колдунов, 2006]:

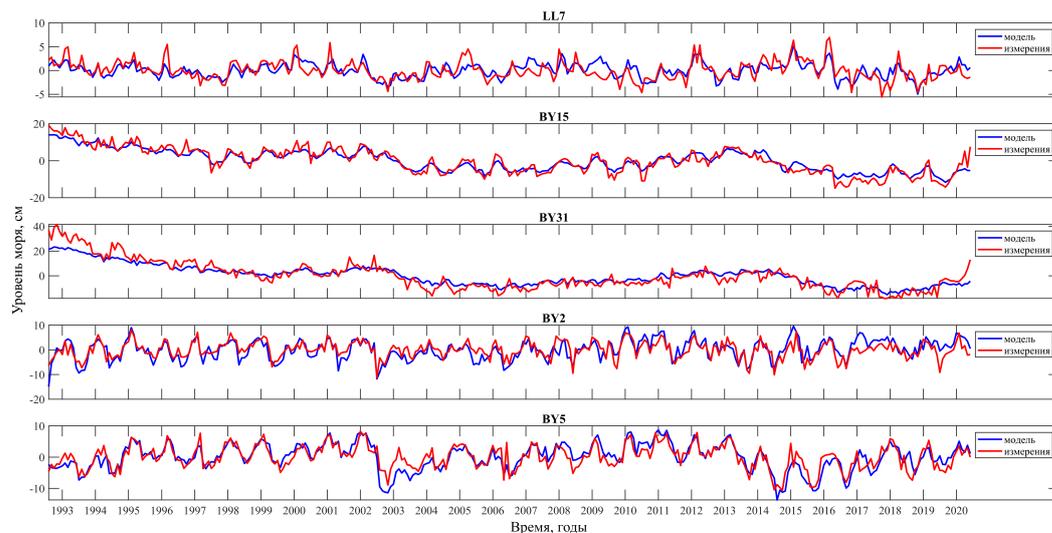
$$\frac{\Delta \zeta_\rho}{\Delta t} = - \sum_{i=1}^n \frac{1}{\rho_0} \frac{\Delta \rho_i}{\Delta t} \Delta z_i, \quad (1)$$

где  $\frac{\Delta \zeta_\rho}{\Delta t}$  – стерические изменения уровня моря за отрезок времени  $\Delta t$ ,  $\rho_0$  – средняя плотность воды,  $\frac{\Delta \rho_i}{\Delta t}$  – изменение во времени плотности воды в каждом  $i$ -м слое ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ),  $\Delta z_i$  – толщина каждого слоя.

Для оценки сравнительного вклада  $T$  и  $S$  в изменения стерических колебаний уровня моря последние аппроксимировались суммой термо- ( $\zeta_{\rho(T)}$ ) и гало- ( $\zeta_{\rho(S)}$ ) стерических составляющих путем вычисления аномалии плотности при постоянной средней по времени солёности ( $S^*$ ) или температуры ( $T^*$ ) соответственно [Storto et al., 2019]:

$$\Delta\zeta_{\rho} = \Delta\zeta_{\rho(T)} + \Delta\zeta_{\rho(S)} = -\frac{1}{\rho_0} \sum_{i=1}^n \Delta\rho(T, S^*)\Delta z_i - \frac{1}{\rho_0} \sum_{i=1}^n \Delta\rho(T^*, S)\Delta z_i. \quad (2)$$

Плотность воды ( $\rho$ ) рассчитывалась по уравнению состояния, описанному в работе [Jackett and McDougall, 1995].



**Рис. 2.** Ряды стерических колебаний уровня, рассчитанные по данным измерений  $T$  и  $S$  на океанографических станциях Балтийского моря и по данным реанализа NEMO 3,6.

На рис. 2 сравниваются ряды среднемесячных значений стерических колебаний уровня моря, рассчитанные по формуле (1) по судовым измерениям  $T$  и  $S$  на океанографических станциях и по данным регионального реанализа. Расстояние между координатами океанографических станций и ближайшими к ним узлами сеточной области данных реанализа варьировалось от 0,52 км для станции BY5 до 2,11 км для станции LL7. Сравнение демонстрирует неплохое согласие в особенностях изменчивости уровня моря, вызванной изменениями плотности воды: выраженную сезонную изменчивость, наличие более низкочастотных колебаний и трендов. Для более представительного сравнения рядов согласно [РД 52.27.759–2011, 2011] рассчитывались следующие критерии точности:

$\sigma_{\text{abs}}$  – абсолютная ошибка,

$$\sigma_{\text{abs}} = \frac{\sum_{i=1}^N |\zeta_m - \zeta_n|}{N},$$

где  $\zeta_m$  и  $\zeta_n$ , стерические уровни, рассчитанные по данным реанализа и по судовым данным, соответственно;  $N$  – длина ряда.

$\sigma_{\text{rel}}$  – относительная ошибка,

$$\sigma_{\text{rel}} = \frac{\sigma_{\text{abs}} \cdot 100\%}{(\zeta_n)_{\text{max}} - (\zeta_n)_{\text{min}}},$$

где  $(\zeta_n)_{\text{max}}$  и  $(\zeta_n)_{\text{min}}$  – максимальное и минимальное значения стерических уровней, рассчитанных по данным судовых измерений,

$\sigma_{er}$  – среднеквадратичная ошибка, рассчитанных по данным реанализа стерических уровней:

$$\sigma_{er} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\zeta_m - \zeta_n)^2}{N-1}},$$

$\sigma_m$  – среднеквадратичное отклонение стерического уровня, рассчитанного по данным реанализа

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\zeta_m - \bar{\zeta}_m)^2}{N-1}},$$

$\sigma_n$  – среднеквадратичное отклонение стерических уровней по данным судовых измерений,

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\zeta_n - \bar{\zeta}_n)^2}{N-1}},$$

$\sigma_p$  – отношение (в %) среднеквадратичной ошибки расчетов стерических уровней по данным реанализа к среднеквадратичному отклонению их расчета по судовым измерениям:

$$\sigma_p = \frac{\sigma_{er} \cdot 100\%}{(\sigma_n)}.$$

$P_m$  – критерий точности, показывающий количество (в %) членов ряда, рассчитанных по данным реанализа стерических уровней, которые не выходят за пределы диапазона  $\pm 0,674 \sigma_n$ .

$R$  – коэффициент корреляции между стерическими уровнями, рассчитанными по данным реанализа, и стерическими уровнями, рассчитанными по измерениям  $T$  и  $S$  на океанографических станциях:

$$R = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\zeta_n - \bar{\zeta}_n)(\zeta_m - \bar{\zeta}_m)}{\sigma_n \sigma_m}.$$

В табл. 2 представлены статистические критерии сравнения рядов стерических колебаний уровня по измерениям  $T$  и  $S$  на океанографических станциях и по данным реанализа NEMO 3,6. Результаты свидетельствуют, что данные регионального реанализа по  $T$  и  $S$  позволяют достаточно точно воспроизводить колебания уровня моря, вызванные изменениями плотности вод Балтийского моря: абсолютная ошибка  $\sigma_{abs}$  варьирует от 1,2 до 3,4 см, относительная  $\sigma_{rel}$  – от 5,7 до 10,9%, коэффициент корреляции  $R$  меняется от 0,65 до 0,94, а значения критерия точности показывают, что от 62 до 92% рассчитанных по данным реанализа значений стерических колебаний уровня моря не выходят за пределы диапазона  $\pm 0,674 \sigma_n$ .

**Таблица 2.** Оценки точности расчетов стерических колебаний уровня моря по данным реанализа NEMO 3,6

Станция	$\sigma_{abs}$ , см	$\sigma_{rel}$ , %	$\sigma_{er}$	$\sigma_m$	$\sigma_n$	$\sigma_p$ , %	$P_m$ , %	$R$
LL7	1,20	9,56	1,51	1,53	1,96	77,07	64,18	0,65
BY15	2,03	5,96	2,63	5,55	6,97	37,74	92,24	0,94
BY31	3,41	5,68	4,58	8,17	11,40	40,19	91,04	0,94
BY2	2,11	10,89	2,79	4,02	3,36	82,85	62,39	0,73
BY5	1,83	9,69	2,39	4,22	3,75	63,71	76,12	0,83

По рассчитанным на основе данных реанализа по формулам (1) и (2) рядом среднемесячных значений стерических колебаний уровня, а также их термостерических и галостерических компонент, оценивались линейные тренды. Значимость линейного тренда оценивалась с помощью критерия Стьюдента [Малинин, 2008].

Для исследования сезонных изменений стерических колебаний уровня моря проводился гармонический анализ среднесуточных рядов  $\zeta_p(t)$ , выполнявшийся по методу наименьших квадратов, с учетом рекомендаций, представленных в работе Г. Н. Войнова [Voinov, 2002]. Оценивались амплитуды ( $A$ ) и фазы ( $G$ ) 4 гармоник: годовой ( $S_a$ ) – 365,2 сут, полугодовой ( $S_{sa}$ ) – 182,6 сут, третьгодовой ( $S_{ta}$ ) – 121,8 сут и четвертьгодовой ( $S_{qa}$ ) – 91,3 сут.

$$A(t) = A_{sa} \cos(\omega_{sa}t - G_{sa}) + A_{ssa} \cos(\omega_{ssa}t - G_{ssa}) + A_{sta} \cos(\omega_{sta}t - G_{sta}) + A_{sqa} \cos(\omega_{sqa}t - G_{sqa}),$$

где  $A_{sa}$ ,  $A_{ssa}$ ,  $A_{sta}$ ,  $A_{sqa}$  – амплитуды годовой, полугодовой, третьгодовой и четвертьгодовой гармоник;  $G_{sa}$ ,  $G_{ssa}$ ,  $G_{sta}$ ,  $G_{sqa}$  – фазы этих гармоник;  $\omega_{sa}$ ,  $\omega_{ssa}$ ,  $\omega_{sta}$ ,  $\omega_{sqa}$  – частоты гармоник,  $t$  – время.

Точность амплитуд и фаз, оцененных в стационарном приближении составляющих сезонных колебаний уровня моря, оценивалась по методике, описанной Pugh [Pugh, 1987] следующим образом. Из исходного ряда среднесуточных значений уровня моря вычитался предвычисленный по формуле (1) ряд сезонных колебаний. Затем проводилось быстрое преобразование Фурье остаточного ряда. По результатам Фурье-анализа в окрестностях частоты каждой сезонной гармоники выделялась полоса частот  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ , ...  $\omega_n$  и соответствующие этим частотам значения амплитуд  $A(\omega_1)$ ,  $A(\omega_2)$ , ...  $A(\omega_n)$  и фаз  $G(\omega_1)$ ,  $G(\omega_2)$ , ...  $G(\omega_n)$ . Далее, для полученных оценок амплитуд и фаз сезонных гармоник рассчитывались их среднеквадратичные ошибки

$$\delta_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (A(\omega) - \overline{A(\omega)})^2}{N}}$$

$$\delta_G = \frac{\delta_A}{A} \cdot \frac{180}{\pi},$$

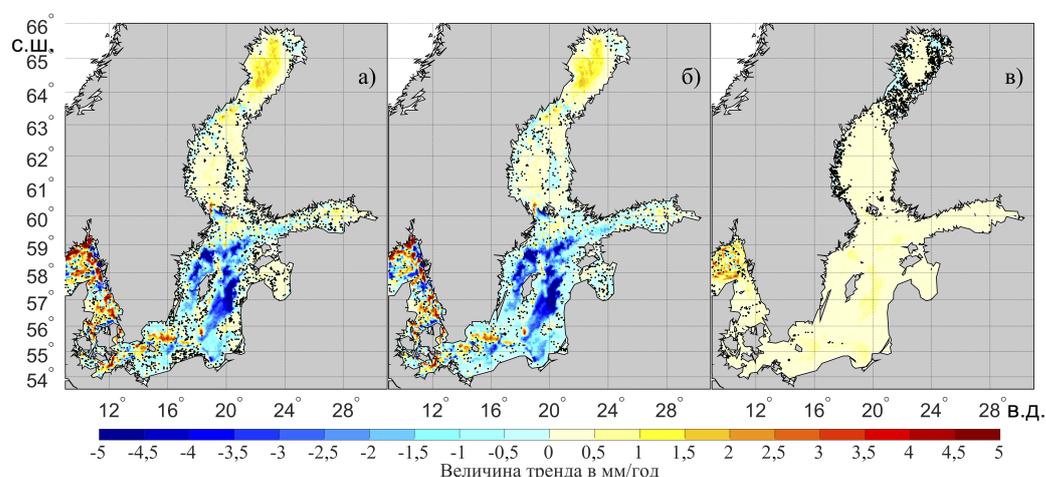
где  $\delta_A$  – среднеквадратичная ошибка расчета амплитуды гармоники,  $\delta_G$  – среднеквадратичная ошибка расчета фазы гармоники,  $N$  – количество членов ряда,  $\pi = 3,14$ .

С целью учета нестационарности сезонных колебаний, ряды среднесуточных значений стерического уровня моря  $\zeta_p(t)$  подвергались скользящему гармоническому анализу [Plag and Tsimplis, 1999]. Для годовой гармоники  $S_a$  период квазистационарности (отрезок ряда для расчетов) принимался равным 1 год, и скользящий Фурье-анализа проводился без перекрытия (т.е. за каждый последующий год). Для других гармоник скользящий Фурье-анализа проводился с перекрытием. Для выделения нестационарной полугодовой компоненты  $S_{sa}$  период квазистационарности принимался равным 1 году, и скользящие проводились с перекрытием через каждые полгода; для выделения третьгодовой гармоники  $S_{ta}$  период квазистационарности принимался равным 8 месяцам, и скользящие проводились через каждые 4 месяца; для выделения четвертьгодовой гармоники  $S_{qa}$  период квазистационарности принимался равным 6 месяцам, и скользящие проводились через каждые 3 месяца. По оцененным амплитудам и фазам для каждого периода квазистационарности предвычислялись ряды компонент сезонных колебаний, которые затем склеивались в ряд, описывающий межгодовые изменения каждой компоненты сезонных колебаний. Значимость линейного тренда в межгодовых изменениях амплитуд гармоник  $S_a$ ,  $S_{sa}$ ,  $S_{ta}$ ,  $S_{qa}$  оценивалась с помощью критерия Стьюдента [Малинин, 2008].

Для интерпретации межгодовых изменений стерических колебаний уровня моря использовались данные реанализа ERA (ERA Interim reanalysis) [Dee et al., 2011] об осадках, испарении и материковом стоке в регионе Балтийского моря с пространственным разрешением 0,5 градуса и дискретностью 12 часов, которые в дальнейшем осреднялись до одного месяца по всей площади Балтики, а также среднемесячные данные о стоке Невы, предоставленные Северо-Западным управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета.

### Результаты и их интерпретация

Рисунок 3 демонстрирует пространственное распределение величин линейных трендов в рассчитанных по данным реанализа NEMO 3,6 стерических изменениях уровня моря. Они достигают значений  $\pm 5$  мм/год. В центральной части открытой Балтики в рассматриваемый период 1993–2020 гг. происходит понижение стерического уровня моря со скоростью  $-0,5$ – $(-5,0)$  мм/год за счет увеличения плотности морских вод (см. рис. 3а), в то время как во многих районах пр. Каттегат, Ботнического, Финского и Рижского заливов, а также на севере открытой Балтики и в отдельных районах юго-западной части моря стерический уровень растёт. На рис. 3в показано, что практически на всей акватории Балтийского моря влияние термостерической компоненты приводит к повышению уровня за счет термического расширения водного столба со скоростью  $0,5$ – $1,0$  мм/год, но эти изменения уровня менее значительны по сравнению с воздействием галостерической компоненты (см. рис. 3б), которая оказывает основное влияние на стерические изменения уровня моря в рассматриваемый нами период.



**Рис. 3.** Оценки величин линейных трендов в рассчитанных по данным реанализа ряда стерических (а), гало- (б) и термостерических (в) колебаний уровня моря за период 1993–2020 гг. Черными точками обозначены районы, где тренды не были значимыми.

Наблюдающиеся на рис. 3а, б сравнительно узкие зоны высоких значений роста стерического уровня на юго-западе моря, по-видимому, связаны с особенностями батиметрии и динамики вод в этом районе. Если сравнить рис. 3а, б с картиной средних за 30 лет течений в верхнем 10-метровом слое, рассчитанных на основе численного гидродинамического моделирования [Placke *и др.*, 2018], можно увидеть, что зоны высоких значений роста стерического уровня на юго-западе моря хорошо согласуются с положением узких струйных меандрирующих течений, которые осуществляют адвекцию распреснённых менее плотных поверхностных вод из центральной части открытой Балтики в её юго-западную часть. Поэтому эта пространственная особенность роста стерического уровня хорошо выражена в его галостерической компоненте (рис. 3б). Мощность верхнего квазиоднородного слоя в Арконском и Борнхольмском бассейнах составляет 30–50 м [Placke *и др.*, 2018], в то время как глубины здесь, в основном, ненамного больше этих значений [Leppäranta and Myrberg, 2009]. Поэтому большая часть водной толщи здесь занята распреснёнными поверхностными водами, плотность которых уменьшается в последние десятилетия из-за увеличения количества атмосферных осадков [Liblik and Lips, 2019], что приводит к положительным трендам в изменчивости стерического уровня моря в зонах поверхностных струйных течений на юго-западе Балтики (рис. 3а, б).

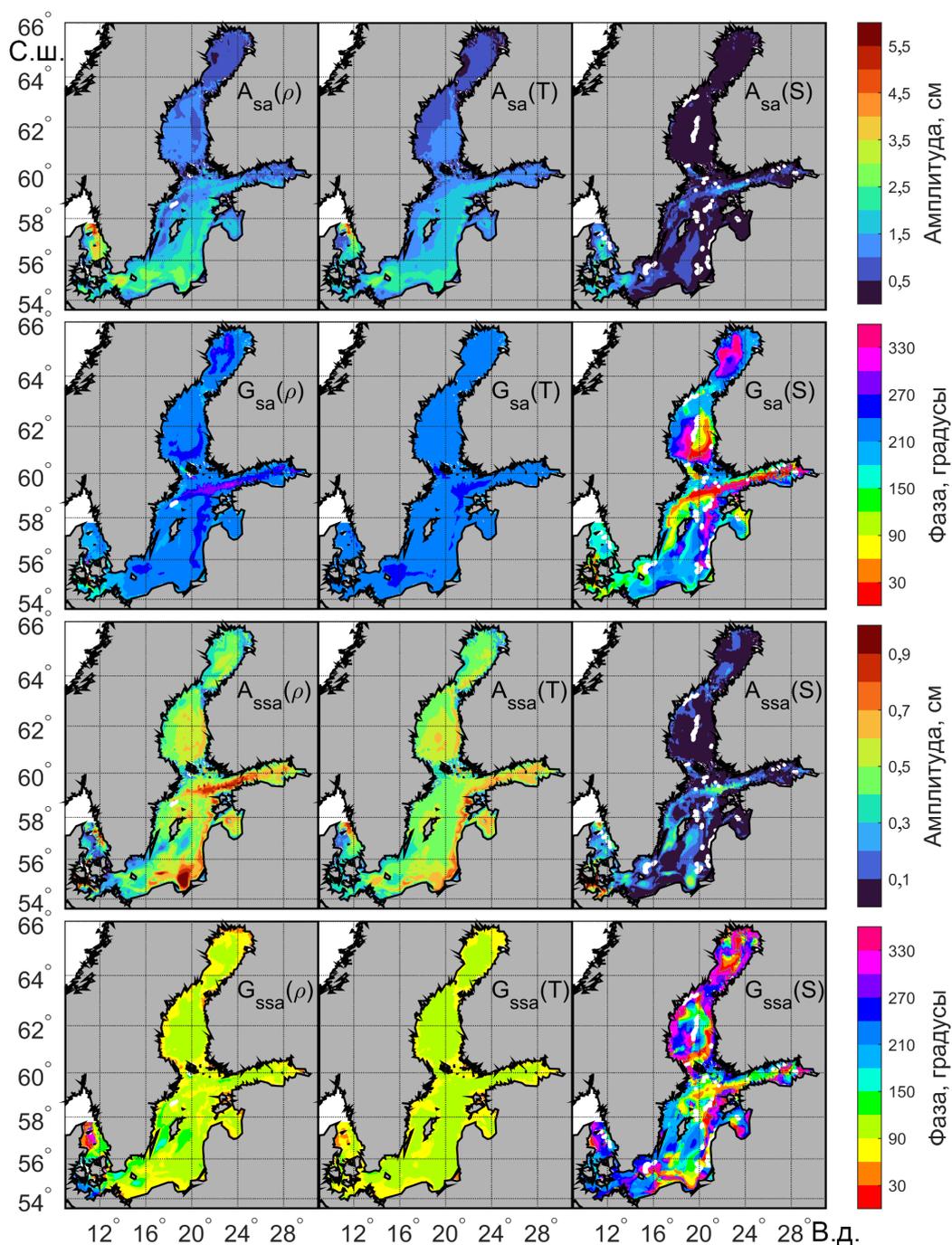
Значительное понижение стерического уровня в центральной Балтике и, меньшее, – на западе Финского залива в рассматриваемый нами период (см. рис. 3) связано с тем,

что, несмотря на наблюдающееся уменьшение солёности в поверхностном слое этих регионов [Захарчук и др., 2017а; Литина и др., 2020], во всей водной толще, в среднем, отмечается осолонение водных масс, которое началось в середине 1990-х и продолжается по настоящее время [Захарчук и др., 2017а; Lehmann et al., 2022]. В результате происходит увеличение плотности водных масс, которое, как показывают результаты на рис. 3, не компенсируется ростом термостерической компоненты уровня, связанной с потеплением климата, и, в среднем, для всей акватории Балтики стерический уровень понижается со скоростью  $-0,26$  мм/год.

Другой механизм работает в Ботническом заливе. Пороги на его юге препятствуют распространению на север осолоняющихся глубинных вод открытой Балтики. По оценкам Marmefelt, Omstedt [1993], а также Meier [2007], водные массы Ботнического моря обновляются в основном за счет притока поверхностных вод из открытой Балтики, солёность которых в последние десятилетия уменьшается, и лишь очень небольшая часть солёных глубинных вод открытой Балтики перетекает эпизодически через пороги в Ботническое море [Marmefelt and Omstedt, 1993; Meier, 2007]. В результате солёность водной массы Ботнического залива уменьшается, что в совокупности с повышением температуры воды из-за потепления климата приводит к уменьшению её плотности и росту стерического уровня (рис. 3а).

На рис. 4 и 5 представлены характеристики сезонных стерических колебаний уровня на частотах гармоник  $S_a$ ,  $S_{sa}$ ,  $S_{ta}$  и  $S_{qa}$ , оцененные с помощью стационарного гармонического анализа рядов среднесуточных значений стерических колебаний уровня моря, полученных по данным реанализа NEMO 3.6. Амплитуды суммарных стерических колебаний  $S_a$  и  $S_{sa}$  почти везде выделяются достоверно (рис. 4), в то время как для гармоник  $S_{ta}$  и  $S_{qa}$  во многих районах открытой Балтики и в некоторых районах Каттегата, Финского и Рижского заливов значения амплитуд не превышают их среднеквадратичную ошибку (рис. 5). Преобладающее влияние на сезонную изменчивость стерических колебаний уровня Балтийского моря оказывает годовая гармоника  $S_a$ , что обусловлено значительным преобладанием в сезонных изменениях плотности вод Балтики годовой компоненты [Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том III Балтийское море. Выпуск I. Гидрометеорологические условия, 1992]. Её амплитуда в среднем для моря больше, приблизительно, в 5 раз по сравнению с амплитудой гармоники  $S_{sa}$  и более чем на порядок превышает амплитуды гармоник  $S_{ta}$  и  $S_{qa}$ .

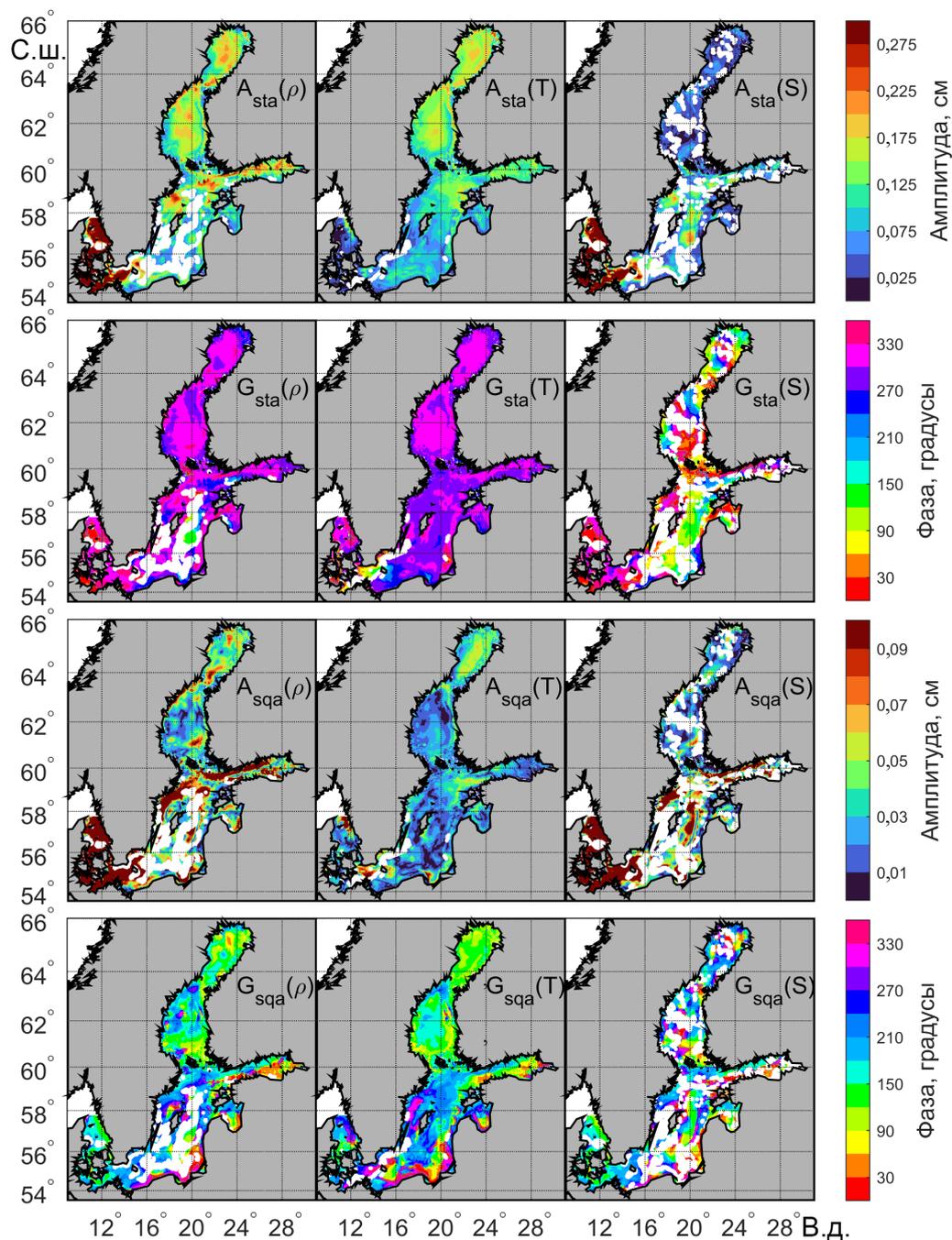
Максимальные значения амплитуд гармоники  $S_a$  наблюдаются на севере пр. Каттегат (5 см). В открытой Балтике амплитуды  $S_a$  меньше и меняются от 3,5 см на юго-западе (Арконский бассейн) до 0,5–2,0 см на севере (рис. 4). В Рижском и Финском заливах амплитуды годовых стерических колебаний уровня составляют 1–2 см. Наименьшие значения амплитуд гармоники  $S_a$  отмечаются на севере Ботнического залива, где они составляют всего 0,25–0,75 см. Пространственные распределения фазы гармоники  $S_a$  свидетельствуют, что на большей акватории моря максимумы годовых стерических колебаний уровня моря наступают в августе–сентябре, и только на западе Каттегата, в районе Датских проливов, а также в Арконском бассейне они наступают в июне–июле (рис. 4). Именно в эти месяцы в верхнем квазиоднородном слое Балтийского моря отмечаются минимумы в изменениях годовой компоненты плотности морской воды [Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том III Балтийское море. Выпуск I. Гидрометеорологические условия, 1992]. Хорошо видно также, что основной вклад в годовые колебания уровня моря, вызванные изменениями плотности воды, вносят термостерические колебания, максимумы которых наблюдаются, в основном, в августе (см. рис. 4), когда отмечаются максимальные температуры воздуха и поверхности моря [Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том III Балтийское море. Выпуск I. Гидрометеорологические условия, 1992]. Заметное влияние галостерических изменений уровня на годовые стерические колебания отмечается только в пр. Каттегат, Датских проливах, Арконском бассейне и на севере открытой Балтики, где их амплитуды не превышают 1–2 см (рис. 4).



**Рис. 4.** Средние амплитуды ( $A$ ) и фазы ( $G$ ) годовой ( $Sa$ ) и полугодовой ( $Ssa$ ), составляющих суммарных стерических (с символом  $\rho$ ), галостерических ( $S$ ) и термостерических ( $T$ ) колебаний уровня моря, оцененные с помощью стационарного гармонического анализа за период 1993–2020 гг. Белым цветом обозначены районы, где амплитуды и фазы не выделяются достоверно.

Амплитуды полугодовых стерических колебаний уровня моря в несколько раз меньше, чем у годовых и варьируют от 0,1–0,2 см в районе Каттегата, Датских проливов и некоторых районов юго-западной части моря до 0,9–1,0 см на юго-востоке открытой Балтики (Гданьский залив), её северной части и на западе Финского залива. Фаза этих колебаний на большей акватории моря приходится на март-апрель ( $\pm 6$  месяцев). Также как и для годовых колебаний, основной вклад в полугодовые стерические колебания вносит термостерическая компонента (рис. 4) и только в районе Датских

проливов, на севере Коттегата, в Гданьском заливе, в западном Готландском бассейне и на северо-востоке открытой Балтики заметно влияние галостерической составляющей.



**Рис. 5.** Средние значения амплитуд ( $A$ ) и фаз ( $G$ ) третьгодовой ( $Sta$ ) и четвертьгодовой ( $Sqa$ ), составляющих суммарных стерических (с символом  $\rho$ ), галостерических ( $S$ ) и термостерических ( $T$ ) колебаний уровня моря, оцененные по данным реанализа за период 1993–2020 гг. Белым цветом обозначены районы, где амплитуды и фазы не выделяются достоверно.

По сравнению с гармониками  $Sa$  и  $Ssa$  средние амплитуды третьгодовых ( $Sta$ ) и четвертьгодовых ( $Sqa$ ) гармоник стерических колебаний уровня моря значительно меньше, и не превышают значений 0,1–0,3 см (рис. 5). Во многих районах Балтики амплитуды и фазы этих гармоник не выделяются достоверно. Максимальные амплитуды гармоники  $Sta$  стерических колебаний наблюдаются в Каттегате, Датских проливах и в Арконском бассейне, где они имеют значения 0,28–0,30 см. В других районах

Балтики они меньше и варьируют от 0,08 до 0,20 см (рис. 5). На юго-западе моря основной вклад в изменения гармоника  $Sta$  вносит галостерическая компонента, в то время как в Ботническом, Рижском и Финском заливах наибольшее влияние оказывает термостерическая составляющая изменений уровня (рис. 5). Наступление максимумов гармоника  $Sta$  приходится на осень и зиму (рис. 5).

В районах, где стерические колебания на частоте гармоника  $Sqa$  выделяются достоверно, их максимальные амплитуды (около 0,1 см) отмечаются на юго-западе моря (пр. Каттегат, Датские проливы, Арконский и, частично, Бармхольмский бассейны), в некоторых районах северной и северо-западной частей открытой Балтики, в Готландском бассейне, Гданьском заливе, на севере Финского залива и в локальных районах Рижского и Ботнического залива. В этих районах на четвертьгодовые стерические колебания доминирующее влияние оказывает, в основном, галостерическая компонента (рис. 5). Заметное влияние термостерической компоненты наблюдается только на север-востоке пр. Каттегат, в Арконском бассейне, Гданьском заливе и на севере Ботнического залива. Минимальные амплитуды стерических колебаний на частоте гармоника  $Sqa$  наблюдаются в центральных районах Ботнического моря, по оси Финского залива, в центре Рижского залива, у восточного побережья открытой Балтики и некоторых районах её южной части (рис. 5).

Сезонные колебания уровня Балтийского моря, вызванные изменениями плотности водных масс, обуславливаются сезонными изменениями потоков тепла и соли. В поверхностном слое открытой Балтики и её основных заливов сезонные колебания плотности морских вод определяются, в основном, процессами радиационного и турбулентного теплообмена и отражают годовой ход тепловых процессов в атмосфере над морем. На поверхности Балтийского моря средние амплитуды годовой компоненты сезонного хода температуры воды составляют 7,0–8,1 °C с максимумами в августе, в то время как подобные оценки амплитуды солёности достигают всего лишь 0,1–0,5‰ [Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том III Балтийское море. Выпуск I. Гидрометеорологические условия, 1992]. Поэтому, за исключением юго-западной части моря, на годовой ход стерического уровня моря основное влияние оказывает термостерическая компонента и его максимум наблюдается, преимущественно, в августе (рис. 5). На юго-западе Балтийского моря (пр. Каттегат, Датские проливы, Арконский бассейн) большое влияние на сезонные изменения плотности водной массы оказывают сезонные изменения водообмена с Северным морем. Здесь, результаты квантильного анализа показывают, что, в зависимости от года, размах сезонных изменений солёности может достигать 1–3‰ на поверхности и до 5–15‰ в придонном слое [Захарчук и др., 2017b]. Поэтому в данном регионе значительное влияние на сезонные стерические колебания уровня оказывает галостерическая компонента (рис. 5).

Существенный вклад галостерической компоненты в сезонные колебания уровня моря на северо-востоке открытой Балтики и на западе Финского залива (см. рис. 4) связан, по-видимому, с резкими контрастами солёности водных масс восточной части Финского залива и северо-восточной акваторией открытой Балтики. Из-за сильного распреснения стоком Невы средняя солёность в Невской губе Финского залива близка к 0‰, в то время как на западе залива и на выходе из него она равняется на поверхности 6,0–6,5‰ [Leppäranta and Myrberg, 2009]. В результате сезонных изменений гидрометеорологических условий в транзитной зоне между Финским заливом и открытой Балтикой происходят значительные сезонные колебания солёности. В конце весны – начале лета сток Невы достигает максимальных значений [Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том III Балтийское море. Выпуск I. Гидрометеорологические условия, 1992], а в июле–августе выпадает максимальное количество осадков [Leppäranta and Myrberg, 2009]. В эти периоды доминируют ветра восточных румбов, под действием которых распреснённые Невой воды переносятся на запад залива и, далее, в открытую Балтику, в результате чего в транзитной зоне солёность понижается. Осенью и зимой сток Невы уменьшается, усиливается циклогенез в атмосфере, и начинают преобладать юго-западные ветры, под действием которых в транзитную зону

поступают более солёные воды из открытой Балтики. Результаты квантильного анализа среднемесячных данных судовых измерений свидетельствуют, что, в зависимости от года, на выходе из Финского залива изменения солёности достигают 1–5‰ [Захарчук и др., 2017b]. Из-за этого здесь существенное влияние на стерические колебания уровня моря оказывает галостерическая компонента (рис. 4).

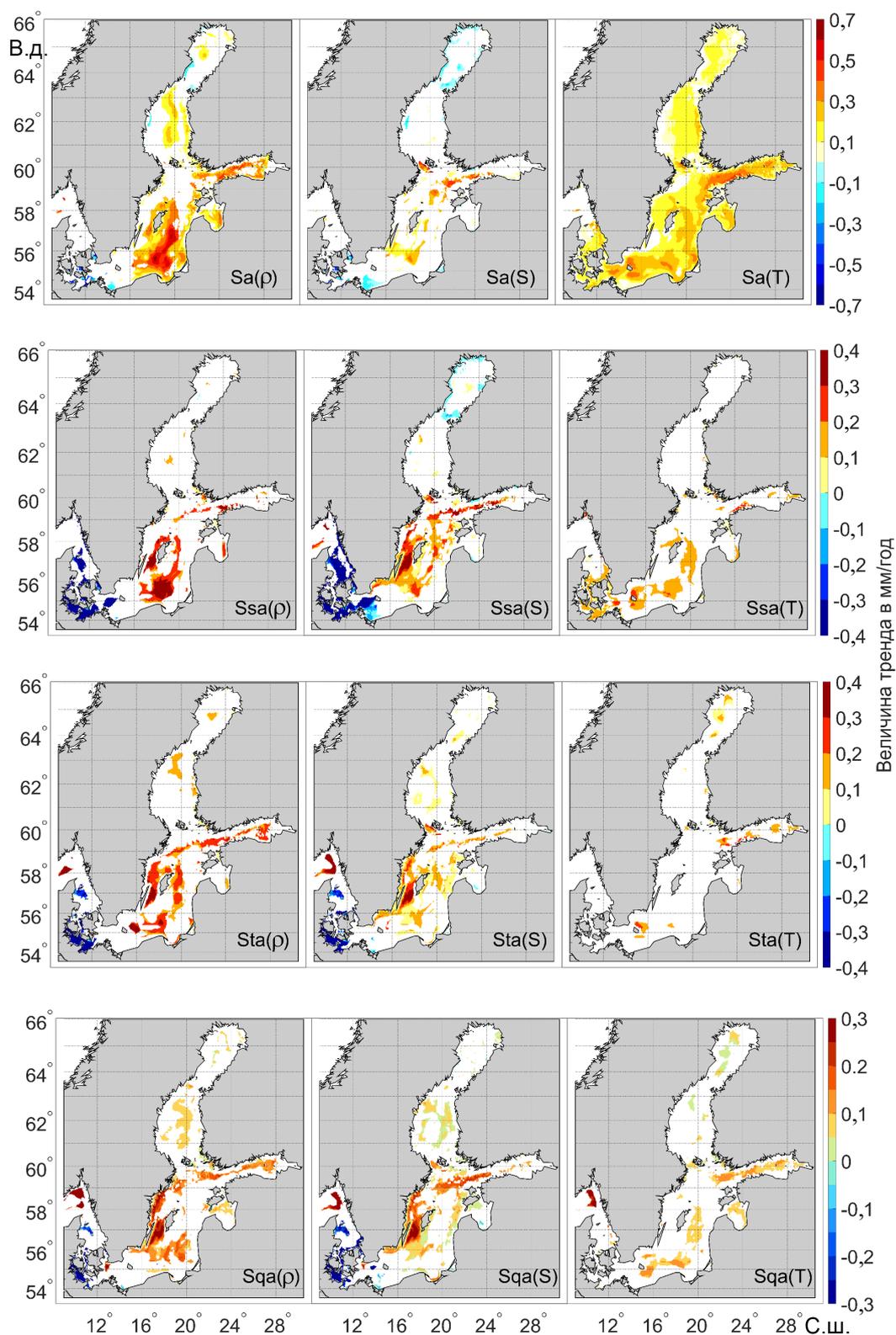
По сравнению с годовыми возмущениями стерического уровня, механизмы его колебаний с периодами 6, 4 и 3 месяца остаются плохо изученными. Однако, в спектрах изменчивости атмосферных осадков, речного стока, уровня моря, течений и водообмена Балтийского и Северного морей все эти цикличности присутствуют [Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том III Балтийское море. Выпуск I. Гидрометеорологические условия, 1992]. Можно предположить, поэтому, что колебания с периодами 6, 4 и 3 месяца должны наблюдаться и в потоках тепла и соли, внося такие же возмущения в поля плотности Балтийского моря. Действительно, в годовом ходе плотности воды на различных горизонтах отчетливо видны колебания с этими периодами, наиболее выраженные ниже верхнего квазиоднородного слоя, где резко уменьшается амплитуда годовых колебаний плотности [Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том III Балтийское море. Выпуск I. Гидрометеорологические условия, 1992]. Нельзя исключать также влияния на сезонные стерические возмущения уровня моря 6-и, 4-х и 3-х месячных обертонов годовых колебаний плотности, генерирующихся из-за нелинейности её адвекции и придонного трения.

На рис. 6 показаны величины линейных трендов в изменениях амплитуд гармоник  $S_a$ ,  $S_{sa}$ ,  $S_{ta}$  и  $S_{qa}$  стерических колебаний уровня моря за период 1993–2020 гг. Эти результаты свидетельствуют, что, за исключением юго-западной части, во всех других районах Балтийского моря, где отмечаются значимые величины трендов, наблюдается увеличение амплитуд стерических колебаний на частотах гармоник  $S_a$ ,  $S_{sa}$ ,  $S_{ta}$  и  $S_{qa}$ . Самый большой рост амплитуд стерических колебаний отмечается для годовой гармоники с максимальными значениями 0,6–0,7 мм/год в открытой Балтике (рис. 6). На увеличение амплитуды гармоники  $S_a$  основное влияние оказывает термостерическая компонента, и только в некоторых локальных районах открытой Балтики и на западе Финского залива заметное влияние на увеличение амплитуды годовых стерических колебаний уровня оказывает галостерическая составляющая (рис. 6).

Рост амплитуд годовых стерических колебаний уровня Балтийского моря можно объяснить увеличением температуры летних максимумов воды из-за потепления климата, которая растёт быстрее температуры зимних минимумов [Захарчук и др., 2017b]. Подтверждением этому могут служить отрицательные тренды минимальных значений приводной температуры воздуха в южных и центральных районах открытой Балтики в рассматриваемый нами период, и отсутствие трендов в минимумах температуры воздуха в других районах Балтики, в то время как в изменениях летних максимумов наблюдались положительные тренды [Захарчук и др., 2017b].

Полезно сравнить представленные на рис. 6 величины трендов у годовых стерических колебаний с подобными оценками трендов для суммарных годовых колебаний уровня Балтийского моря, рассчитанных по спутниковым альтиметрическим данным [Zakharchuk et al., 2022]. Такое сравнение показывает, что только на юго-востоке открытой Балтики и её восточном Готландском бассейне рост амплитуд годовых стерических колебаний оказывает заметное влияние на увеличение амплитуд суммарных годовых колебаний уровня моря. В этих районах величины трендов стерических колебаний меньше подобных оценок для суммарных колебаний уровня всего в 2–3 раза. В других районах Балтики влияние стерических изменений уровня на рост амплитуд суммарных годовых колебаний очень незначительно.

Для стерических колебаний  $S_{sa}$  и  $S_{ta}$  максимальный рост амплитуд составляет 0,3–0,4 мм/год и наблюдается в открытой Балтике, Финском и Рижском заливах. В отличие от гармоники  $S_a$ , доминирующее влияние на увеличение амплитуд гармоник  $S_{sa}$  и  $S_{ta}$  оказывает галостерическая компонента уровня моря, хотя в отдельных районах откры-



**Рис. 6.** Величины линейных трендов в изменениях амплитуд гармоник  $S_a$ ,  $S_{sa}$ ,  $S_{ta}$  и  $S_{qa}$  суммарных стерических (с символом  $\rho$ ), галостерических ( $S$ ) и термостерических ( $T$ ) колебаний уровня моря за период 1993–2020 гг. Белым цветом обозначены районы, где величины трендов не являются значимыми.

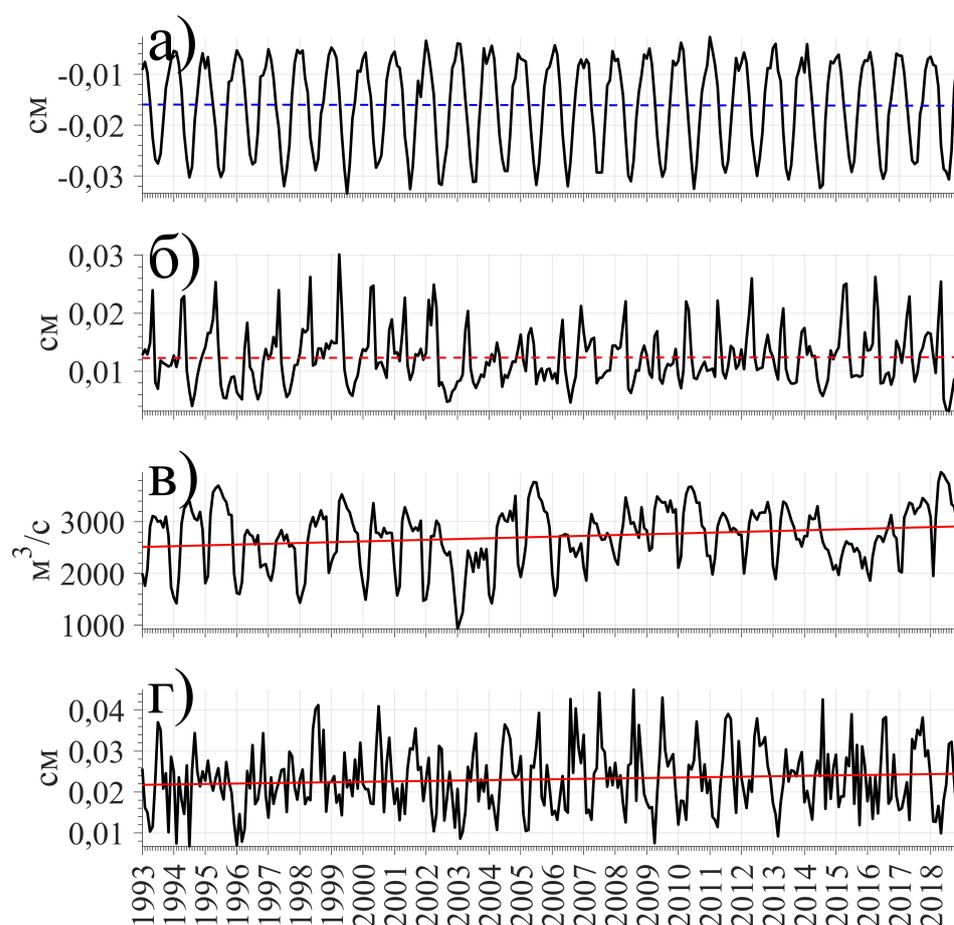
той Балтики, Финского и Ботнического заливов заметно влияние термостерической компоненты в увеличение амплитуд стерических колебаний  $S_{sa}$  и  $S_{ta}$  (рис. 6).

Наибольший рост амплитуд у стерических колебаний  $S_{qa}$  составляет 0,20–0,25 мм/год и отмечается на западе открытой Балтики (рис. 6), а наименьший – в Ботническом и Рижском заливах, где он не превышает 0,05–0,10 мм/год (рис. 6). Основное влияние на рост амплитуды стерических колебаний  $S_{qa}$  оказывает галостерическая компонента уровня моря при заметном влиянии в некоторых районах термостерической составляющей.

Доминирующий вклад галостерической компоненты в увеличение амплитуд сезонных колебаний уровня моря на частотах гармоник  $S_{sa}$ ,  $S_{ta}$  и  $S_{qa}$  в центральной части открытой Балтики и основных заливах моря может быть связан с наблюдающимся в последние десятилетия распреснением верхнего квазиоднородного слоя и осолонением вод глубинного и придонного слоёв [Захарчук и др., 2017б]. Это должно приводить к увеличению размаха сезонных колебаний плотности водных масс и росту амплитуд галостерических компонент сезонных колебаний уровня моря. Причины распреснения верхнего слоя Балтики в последние десятилетия связаны с изменениями её пресного баланса. На рис. 7 показаны ряды среднемесячных значений составляющих пресного баланса в регионе Балтийского моря в период 1993–2019 гг., полученные нами по данным реанализа, и стока Невы по инструментальным наблюдениям. Можно видеть, что по данным реанализа в изменениях испарения и материкового стока не отмечается тренда, в то время как в колебаниях атмосферных осадков наблюдается значимый положительный тренд (рис. 7). Хорошо известно, что Нева вносит наибольший вклад в объём речного стока, поступающего в Балтийское море [Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том III Балтийское море. Выпуск I. Гидрометеорологические условия, 1992; Leppäranta and Myrberg, 2009]. Результаты, представленные на рис. 7в, свидетельствуют, что в последние десятилетия наблюдается статистически значимое увеличение стока Невы. Распреснению вод верхнего слоя может способствовать также наблюдающееся в последние десятилетия значимое уменьшение скорости среднего ветра и его максимумов над Балтийским морем [Захарчук и др., 2021; 2017б], которое должно влиять на уменьшение турбулентного перемешивания между поверхностными и более солёными глубинными водами, а также приводить к снижению испарения над Балтийским морем.

Балтийское море характеризуется положительным пресным балансом [Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том III Балтийское море. Выпуск I. Гидрометеорологические условия, 1992; Leppäranta and Myrberg, 2009]. Количество пресных вод, поступающих с атмосферными осадками и материковым стоком, в среднем, почти в 4 раза превосходит изъятие пресных вод в результате испарения [Leppäranta and Myrberg, 2009]. Эта особенность водного баланса приводит к двухслойной средней циркуляции: из-за избытка поступления пресных вод среднее течение в поверхностном слое всегда направлено из Балтики в Северное море, а в придонном слое возникает компенсационное течение, направленное из Северного моря в Балтийское [Leppäranta and Myrberg, 2009]. Увеличение в последние десятилетия количества атмосферных осадков и материкового стока в регионе Балтийского моря должно приводить к усилению придонного компенсационного течения, которое переносит солёные воды из Северного моря в Балтийское. Учитывая, что в последние десятилетия увеличивается солёность Северного моря [Hughes et al., 2012; North Sea Region Climate Change Assessment, 2016], можно предположить, что наблюдающийся процесс увеличения солёности придонных и глубинных вод Балтики в этот период [Lehmann et al., 2022] связан с усилением придонного компенсационного течения, несущего осолоняющиеся воды из Северного моря в Балтийское.

На юго-западе Балтийского моря (пр. Каттегат, Датские проливы, Арконский бассейн) в период 1993–2020 гг. отмечаются отрицательные тренды в изменениях амплитуд всех 4-х гармоник стерических колебаний, величины которых достигают значений  $-0,1$ – $(-0,6)$  мм/год (рис. 6). В этих районах доминирующее влияние на уменьшение



**Рис. 7.** Изменения среднемесячных значений испарения (а), речного стока (б) и атмосферных осадков (г) по данным реанализа в регионе Балтийского моря в период 1993–2018 гг. и стока Невы по инструментальным наблюдениям (в), красная линия – положительный линейный тренд, синяя – отрицательный, сплошная – значимый тренд, пунктир – не значимый.

амплитуд сезонных стерических колебаний оказывают галостерические компоненты гармоник  $S_a$ ,  $S_{sa}$ ,  $S_{ta}$  и  $S_{qa}$  (рис. 6). Эту особенность можно объяснить следующим образом. В юго-западной части Балтики значительное влияние на сезонные изменения плотности водных масс оказывают колебания водообмена между Северным и Балтийским морем, которые, в наибольшей степени, связаны с сезонной изменчивостью ветра [Zakharchuk et al., 2022]. Под действием ветров западных румбов генерируются затоки солёных североморских вод в Балтийское море, а когда ветер дует с востока, усиливается отток солоноватых вод из Балтики в Северное море. Наблюдения показывают, что подавляющее большинство затоков североморских вод имеют небольшие объёмы (10–20 км<sup>3</sup>) и не распространяются дальше Арконского бассейна [Matthaus, 2006], и только в редких случаях так называемые, «Большие балтийские затоки» распространяются в центральную и северную части открытой Балтики [Zakharchuk et al., 2017a; Leppäranta and Myrberg, 2009; Matthaus, 2006]. Инструментальные измерения свидетельствуют, что в последние десятилетия наблюдаются статистически значимые уменьшения математического ожидания, дисперсии и максимумов ветра над Балтийским морем [Zakharchuk et al., 2017a; 2021; 2022]. Это должно приводить к уменьшению колебаний водообмена между Северным и Балтийским морями, вызываемых изменениями ветра, что должно сказываться на уменьшении колебаний плотности водных масс на юго-западе Балтики и амплитуды галостерических колебаний уровня моря.

### Заключение

В работе впервые для Балтийского моря исследованы особенности пространственной изменчивости характеристик стерических колебаний уровня моря и их термостерических и галостерических компонент в диапазоне межгодовой и сезонной изменчивости. Оценка стерических колебаний уровня моря производилось на основе судовых измерений температуры и солёности воды и данных регионального реанализа гидрофизических полей. Полученные результаты позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Сравнительный анализ оценок стерических колебаний уровня Балтийского моря, рассчитанных на основе судовых измерений и данных регионального реанализа температуры и солёности воды, показывает, что данные реанализа позволяют достаточно точно оценивать наблюдающиеся стерические изменения уровня в диапазоне межгодовой и сезонной изменчивости: коэффициент корреляции между сравниваемыми рядами меняется от 0,65 до 0,94, а значения критерия точности показывают, что от 62 до 92% рассчитанных по данным реанализа значений стерических колебаний уровня моря не выходят за пределы диапазона  $\pm 0,674 \sigma_n$ .
2. В диапазоне межгодовой изменчивости понижение стерического уровня Балтийского моря за период с 1993 по 2020 гг. со скоростью  $-0,5(-5,0)$  мм/год связано с доминирующим влиянием галостерической компоненты и обусловлено увеличением солёности донных и глубинных вод центральной Балтики и западной части Финского залива за счет водообмена с Северным морем, воды которого осолоняются в последние десятилетия, и этот процесс преобладает над распреснением поверхностного слоя, приводя, таким образом, к возникновению отрицательных трендов в галостерической компоненте уровня в этих районах. В Ботническом заливе, наоборот, стерический уровень повышается из-за влияния порогов на юге залива, наличие которых обуславливает обновление его вод, в основном, за счет водообмена с поверхностными водами открытой Балтики, которые опресняются в последние десятилетия из-за увеличения осадков и материкового стока.
3. В диапазоне сезонной изменчивости преобладающий вклад в стерические колебания уровня оказывает годовая гармоника  $S_a$ , амплитуда которой, в среднем для моря, больше, приблизительно, в 5 раз по сравнению с амплитудой полугодовой гармоники  $S_{sa}$  и более чем на порядок превышает амплитуды гармоник  $S_{ta}$  и  $S_{qa}$ .
4. Основное влияние на сезонные стерические колебания уровня в период с 1993 по 2020 гг. оказывает термостерическая компонента, и только на юго-западе моря отмечается существенное влияние галостерической компоненты.
5. С помощью скользящего гармонического анализа впервые оценены межгодовые изменения стерических колебаний уровня моря в диапазоне их сезонной изменчивости. Показано, что за исключением юго-западной части, во всех других районах Балтийского моря наблюдается увеличение амплитуд сезонных стерических колебаний уровня на частотах гармоник  $S_a$ ,  $S_{sa}$ ,  $S_{ta}$  и  $S_{qa}$ . Самый большой рост амплитуд, с преобладающим влиянием термостерической компоненты, отмечается для годовой гармоники стерических колебаний с максимальными значениями 0,6–0,7 мм/год в открытой Балтике. Для стерических колебаний  $S_{sa}$  и  $S_{ta}$  максимальный рост амплитуд, с доминирующим влиянием галостерической компоненты составляет 0,3–0,4 мм/год и наблюдается в открытой Балтике, Финском и Рижском заливах. Наименьший рост амплитуд, от 0,05–0,25 мм/год, отмечается у гармоники  $S_{qa}$ .
6. На юго-западе Балтийского моря отмечаются отрицательные тренды в изменениях амплитуд сезонных гармоник стерических колебаний с преобладанием вклада галостерической компоненты, с величинами  $-0,1(-0,6)$  мм/год.
7. Анализ и обобщение различной гидрометеорологической информации и литературных источников позволяют предположить, что выявленные современные региональные изменения стерических колебаний уровня Балтийского моря связаны с повышением температуры воздуха, увеличением атмосферных осадков, уменьшением интенсивности ветра над морем, распреснением верхнего квазиод-

народного слоя и увеличением солёности глубинных и придонных вод Балтики из-за водообмена с осолоняющимися водами Северного моря.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00209, <https://rscf.ru/project/22-27-00209/>

### Список литературы

- Белоненко Т. В., Колдунов А. В. Стерические колебания уровня в северо-западной части Тихого океана // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. — 2006. — № 3. — С. 81–88.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том III Балтийское море. Выпуск I. Гидрометеорологические условия / под ред. Ф. С. Терзиев, В. А. Рожков, А. И. Смирнова. — Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1992. — С. 447.
- Гордеева С. М., Малинин В. Н., Дрозд М. В. Современная изменчивость уровня и водного баланса Балтийского моря // Морские берега – эволюция, экология, экономика. Материалы XXIV Международной береговой конференции, посвященной 60-летию со дня основания Рабочей группы «Морские берега»: в 2 томах. — Краснодар : Издательский дом Юг, 2012. — С. 88–91. — DOI: [10.31519/conferencearticle\\_5b5ce38b9c90f6.81613295](https://doi.org/10.31519/conferencearticle_5b5ce38b9c90f6.81613295).
- Захарчук Е. А., Литина Е. Н., Клеванцов Ю. П. и др. Нестационарность гидрометеорологических процессов Балтийского моря в условиях меняющегося климата // Труды ГОИН. — 2017а. — № 218. — С. 6–62.
- 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, № 4. — С. 781–805. — DOI: [10.21638/spbu07.2021.408](https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.408).
- Захарчук Е. А., Сухачев В. Н., Тихонова Н. А. и др. Стационарное и нестационарное описание сезонной изменчивости уровня Балтийского моря по данным мареографических измерений // Морской гидрофизический журнал. — 2022. — Т. 38, № 6. — С. 655–678. — DOI: [10.22449/0233-7584-2022-6-655-678](https://doi.org/10.22449/0233-7584-2022-6-655-678).
- Захарчук Е. А., Сухачёв В. Н., Тихонова Н. А. Механизмы опасных подъёмов уровня моря в Финском заливе. — Санкт-Петербург : Издательство «Петербург XXI век», 2017b. — С. 152.
- Литина Е. Н., Захарчук Е. А., Тихонова Н. А. Динамика гипоксических зон в Балтийском море на рубеже XX и XXI веков // Водные ресурсы. — 2020. — Т. 47, № 3. — С. 322–329. — DOI: [10.31857/s0321059620030098](https://doi.org/10.31857/s0321059620030098).
- Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Учебник. — СПб : РГГМУ, 2008. — С. 408.
- Малинин В. Н. Уровень океана: настоящее и будущее. — СПб : РГГМУ, 2012. — С. 260.
- Провоторов П. П. Стерические колебания уровня моря // Колебания уровня в морях. — СПб : РГГМУ, 2003. — С. 129–138.
- РД 52.27.759–2011. Руководящий документ. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III Служба морских гидрологических прогнозов. — Москва, 2011.
- Ablain M., Meyssignac B., Zawadzki L., et al. Uncertainty in satellite estimates of global mean sea-level changes, trend and acceleration // Earth System Science Data. — 2019. — Vol. 11, no. 3. — P. 1189–1202. — DOI: [10.5194/essd-11-1189-2019](https://doi.org/10.5194/essd-11-1189-2019).
- Cazenave A., Meyssignac B., Palanisamy H. Global Sea Level Budget Assessment by World Climate Research Programme. — 2018.
- Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. — 2011. — Vol. 137, no. 656. — P. 553–597. — DOI: [10.1002/qj.828](https://doi.org/10.1002/qj.828).
- Durack P. J., Wijffels S. E., Gleckler P. J. Long-term sea-level change revisited: the role of salinity // Environmental Research Letters. — 2014. — Vol. 9, no. 11. — P. 114017. — DOI: [10.1088/1748-9326/9/11/114017](https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/11/114017).
- European Union-Copernicus Marine Service. Baltic Sea Physics Reanalysis. — 2018. — DOI: [10.48670/MOI-00013](https://doi.org/10.48670/MOI-00013). — URL: [https://data.marine.copernicus.eu/product/BALTICSEA\\_MULTIYEAR\\_PHY\\_003\\_011/description](https://data.marine.copernicus.eu/product/BALTICSEA_MULTIYEAR_PHY_003_011/description).
- Gill A. E., Niller P. P. The theory of the seasonal variability in the ocean // Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts. — 1973. — Vol. 20, no. 2. — P. 141–177. — DOI: [10.1016/0011-7471\(73\)90049-1](https://doi.org/10.1016/0011-7471(73)90049-1).
- Greatbatch R. J. A note on the representation of steric sea level in models that conserve volume rather than mass // Journal of Geophysical Research. — 1994. — Vol. 99. — P. 12767. — DOI: [10.1029/94jc00847](https://doi.org/10.1029/94jc00847).
- Hordoir R., Axell L., Löptien U., et al. Influence of sea level rise on the dynamics of salt inflows in the Baltic Sea // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2015. — Vol. 120, no. 10. — P. 6653–6668. — DOI: [10.1002/2014jc010642](https://doi.org/10.1002/2014jc010642).

- Hughes S. L., Holliday N. P., Gaillard F. Variability in the ICES/NAFO region between 1950 and 2009: observations from the ICES Report on Ocean Climate // ICES Journal of Marine Science. — 2012. — Vol. 69, no. 5. — P. 706–719. — DOI: [10.1093/icesjms/fss044](https://doi.org/10.1093/icesjms/fss044).
- Jackett D. R., McDougall T. J. Minimal Adjustment of Hydrographic Profiles to Achieve Static Stability // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. — 1995. — Vol. 12, no. 2. — P. 381–389. — DOI: [10.1175/1520-0426\(1995\)012<0381:maohpt>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1995)012<0381:maohpt>2.0.co;2).
- Köhl A., Stammer D., Cornuelle B. Interannual to Decadal Changes in the ECCO Global Synthesis // Journal of Physical Oceanography. — 2007. — Vol. 37, no. 2. — P. 313–337. — DOI: [10.1175/jpo3014.1](https://doi.org/10.1175/jpo3014.1).
- Lehmann A., Myrberg K., Post P., *et al.* Salinity dynamics of the Baltic Sea // Earth System Dynamics. — 2022. — Vol. 13, no. 1. — P. 373–392. — DOI: [10.5194/esd-13-373-2022](https://doi.org/10.5194/esd-13-373-2022).
- Leppäranta M., Myrberg K. Physical Oceanography of the Baltic Sea. — Springer Berlin Heidelberg, 2009. — P. 378. — DOI: [10.1007/978-3-540-79703-6](https://doi.org/10.1007/978-3-540-79703-6).
- Liblik T., Lips U. Stratification Has Strengthened in the Baltic Sea - An Analysis of 35 Years of Observational Data // Frontiers in Earth Science. — 2019. — Vol. 7. — DOI: [10.3389/feart.2019.00174](https://doi.org/10.3389/feart.2019.00174).
- Lisitzin E. The influence of water density variations on sea level in the Northern Baltic // The International Hydrographic Review. — 1959. — Vol. 36, no. 1. — P. 154–159.
- Lisitzin E. Sea-Level Changes. — Amsterdam : Elsevier Science & Technology Books, 1974. — P. 285.
- Marmefelt E., Omstedt A. Deep water properties in the Gulf of Bothnia // Continental Shelf Research. — 1993. — Vol. 13, no. 2/3. — P. 169–187. — DOI: [10.1016/0278-4343\(93\)90104-6](https://doi.org/10.1016/0278-4343(93)90104-6).
- Matthaus W. The history of investigation of salt water inflows into the Baltic Sea - from the early beginning to recent results // Marine Science Reports. — Rostock-Warnemuende, Germany : Baltic Sea Research Institute (IOW), 2006. — P. 73.
- Meier H. E. M. Modeling the pathways and ages of inflowing salt- and freshwater in the Baltic Sea // Estuarine, Coastal and Shelf Science. — 2007. — Vol. 74, no. 4. — P. 610–627. — DOI: [10.1016/j.ecss.2007.05.019](https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.05.019).
- Menéndez M., Woodworth P. L. Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tide-gauge data set // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2010. — Vol. 115, no. C10. — DOI: [10.1029/2009jc005997](https://doi.org/10.1029/2009jc005997).
- Nerger L., Hiller W., Schröter J. A comparison of error subspace Kalman filters // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. — 2005. — Vol. 57, no. 5. — P. 715–735. — DOI: [10.3402/tellusa.v57i5.14732](https://doi.org/10.3402/tellusa.v57i5.14732).
- North Sea Region Climate Change Assessment / ed. by M. Quante, F. Colijn. — Springer International Publishing, 2016. — P. 573. — DOI: [10.1007/978-3-319-39745-0](https://doi.org/10.1007/978-3-319-39745-0).
- Oppenheimer M., Glavovic B. C., Hinkel J., *et al.* Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities // The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. — Cambridge University Press, 2022. — P. 321–446. — DOI: [10.1017/9781009157964.006](https://doi.org/10.1017/9781009157964.006).
- Passaro M., Müller F. L., Oelmann J., *et al.* Absolute Baltic Sea Level Trends in the Satellite Altimetry Era: A Revisit // Frontiers in Marine Science. — 2021. — Vol. 8. — DOI: [10.3389/fmars.2021.647607](https://doi.org/10.3389/fmars.2021.647607).
- Pemberton P., Löptien U., Hordoir R., *et al.* Sea-ice evaluation of NEMO-Nordic 1.0: a NEMO-LIM3.6-based ocean-sea-ice model setup for the North Sea and Baltic Sea // Geoscientific Model Development. — 2017. — Vol. 10, no. 8. — P. 3105–3123. — DOI: [10.5194/gmd-10-3105-2017](https://doi.org/10.5194/gmd-10-3105-2017).
- Placke M., Meier H. E. M., Gräwe U. *u dp.* Long-Term Mean Circulation of the Baltic Sea as Represented by Various Ocean Circulation Models // Frontiers in Marine Science. — 2018. — T. 5. — DOI: [10.3389/fmars.2018.00287](https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00287). — URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2018.00287>.
- Plag H.-P., Tsimplis M. N. Temporal variability of the seasonal sea-level cycle in the North Sea and Baltic Sea in relation to climate variability // Global and Planetary Change. — 1999. — Vol. 20, no. 2/3. — P. 173–203. — DOI: [10.1016/S0921-8181\(98\)00069-1](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(98)00069-1).
- Pugh D. Tides, Surges and Mean Sea Level: A Handbook for Engineers and Scientists. — John Wiley & Sons, Chichester, 1987. — 472 c.
- Schrum C., Hubner U., Jacob D., *et al.* A coupled atmosphere/ice/ocean model for the North Sea and the Baltic Sea // Climate Dynamics. — 2003. — Vol. 21, no. 2. — P. 131–151. — DOI: [10.1007/s00382-003-0322-8](https://doi.org/10.1007/s00382-003-0322-8).
- Stammer D., Cazenave A., Ponte R. M., *et al.* Causes for Contemporary Regional Sea Level Changes // Annual Review of Marine Science. — 2013. — Vol. 5, no. 1. — P. 21–46. — DOI: [10.1146/annurev-marine-121211-172406](https://doi.org/10.1146/annurev-marine-121211-172406).
- Storto A., Bonaduce A., Feng X., *et al.* Steric Sea Level Changes from Ocean Reanalyses at Global and Regional Scales // Water. — 2019. — Vol. 11, no. 10. — P. 1987. — DOI: [10.3390/w11101987](https://doi.org/10.3390/w11101987).
- Understanding sea-level rise and variability / ed. by J. A. Church, P. L. Woodworth, T. Aarup, *et al.* — Wiley, 2010. — P. 456. — DOI: [10.1002/9781444323276](https://doi.org/10.1002/9781444323276).

- Vitousek S., Barnard P. L., Fletcher C. H., *et al.* Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sea-level rise // *Scientific Reports*. — 2017. — Vol. 7, no. 1. — DOI: [10.1038/s41598-017-01362-7](https://doi.org/10.1038/s41598-017-01362-7).
- Voinov G. N. Tides and Tidal streams // *Polar Seas Oceanography. An integrated case study of the Kara Sea* / ed. by V. A. Volkov, O. M. Johannessen, V. E. Borodachov, *et al.* — Chichester, UK : Praxis Publishing, 2002. — P. 147–214.
- WCRP Global Sea Level Budget Group. Global sea-level budget 1993-present // *Earth System Science Data*. — 2018. — Vol. 10, no. 3. — P. 1551–1590. — DOI: [10.5194/essd-10-1551-2018](https://doi.org/10.5194/essd-10-1551-2018).
- Weisse R., Dailidienė I., Hünicke B., *et al.* Sea level dynamics and coastal erosion in the Baltic Sea region // *Earth System Dynamics*. — 2021. — Vol. 12, no. 3. — P. 871–898. — DOI: [10.5194/esd-12-871-2021](https://doi.org/10.5194/esd-12-871-2021).
- Zakharchuk E. A., Sukhachev V. N., Tikhonova N. A., *et al.* Seasonal fluctuations in Baltic sea level determined from satellite altimetry // *Continental Shelf Research*. — 2022. — Vol. 249. — P. 104863. — DOI: [10.1016/j.csr.2022.104863](https://doi.org/10.1016/j.csr.2022.104863).

# STERIC OSCILLATIONS OF THE BALTIC SEA LEVEL

E. A. Zakharchuk<sup>1</sup> , V. N. Sukhachev<sup>\*\*1</sup> , N. A. Tikhonova<sup>1</sup> , and E. N. Litina<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Murmansk Marine Biological Institute of the Kola Science Center of the RAS, Murmansk, Russia

<sup>3</sup>N. N. Zubov State Oceanographic Institute, Moscow, Russia

\*\*Correspondence to: V. N. Sukhachev, syhachev@mail.ru

The main purpose of the paper is to estimate the capabilities of NEMO 3.6 regional reanalysis data for a realistic description of the Baltic Sea steric level oscillations, the spatio-temporal structure research and causes of modern sea level changes, induced by fluctuations in water density, in the range of interannual and seasonal variability scales. Comparison of the steric level oscillations series calculated from contact measurements of temperature and salinity at oceanographic stations and from regional reanalysis data is carried out by evaluating various statistical accuracy criteria. The paper shows that the reanalysis data allow reproducing the Baltic Sea steric level oscillations quite accurately. Estimates of linear trends indicate that in the period 1993–2020 in the open Baltic and in the west of the Gulf of Finland, the steric sea level is mainly decreasing, while in the Gulf of Bothnia the steric level is increasing. Harmonic analysis of steric level oscillations showed that the annual harmonic  $S_a$  in the range of seasonal variability makes a predominant contribution to steric level oscillations, its amplitude significantly exceeds the amplitudes of the harmonics  $S_{sa}$ ,  $S_{ta}$  and  $S_{qa}$ . The thermosteric component has the main influence on seasonal steric level oscillations, and only in the south-west of the sea there is a significant influence of the halosteric component. During the period under review, positive linear trends were observed in the amplitudes changes of the harmonics  $S_a$ ,  $S_{sa}$ ,  $S_{ta}$  and  $S_{qa}$  in most regions of the Baltic Sea, however, in the south-west of the open Baltic, a decrease in the amplitudes of all four harmonics of seasonal steric level oscillations was observed in the south-west part of the Open Baltic Sea. In conclusion, based on the obtained results, it is assumed that the identified modern regional changes in the Baltic Sea steric level oscillations are associated with an increase in air temperature, an increase in precipitation, a decrease in wind intensity, a desalination of the upper quasi-homogeneous layer and an increase in deep and near-bottom waters salinity caused by water exchange with salty waters of the North Sea.

Received: 22 September 2022

Accepted: 5 April 2023

Published: 17 December 2023

**Keywords:** sea level, steric oscillations, thermosteric component, halosteric component, linear trends, harmonic analysis, seasonal variability, freshwater balance components

**Citation:** Zakharchuk, E. A., V. N. Sukhachev, N. A. Tikhonova and E. N. Litina (2023), Steric Oscillations of the Baltic Sea Level, *Russian Journal of Earth Sciences*, 23, ES4014, <https://doi.org/10.2205/2023ES000846> EDN: TLODEE



© 2023. The Authors.

## References

- Ablain M., Meyssignac B., Zawadzki L., *et al.* Uncertainty in satellite estimates of global mean sea-level changes, trend and acceleration // *Earth System Science Data*. — 2019. — Vol. 11, no. 3. — P. 1189–1202. — DOI: [10.5194/essd-11-1189-2019](https://doi.org/10.5194/essd-11-1189-2019).
- Belonenko T. V., Koldunov A. V. Steric oscillations of the sea level in the North-Western Pacific // *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*. — 2006. — No. 3. — P. 81–88.

- Cazenave A., Meyssignac B., Palanisamy H. Global Sea Level Budget Assessment by World Climate Research Programme. — 2018.
- Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., *et al.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. — 2011. — Vol. 137, no. 656. — P. 553–597. — DOI: [10.1002/qj.828](https://doi.org/10.1002/qj.828).
- Durack P. J., Wijffels S. E., Gleckler P. J. Long-term sea-level change revisited: the role of salinity // Environmental Research Letters. — 2014. — Vol. 9, no. 11. — P. 114017. — DOI: [10.1088/1748-9326/9/11/114017](https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/11/114017).
- European Union-Copernicus Marine Service. Baltic Sea Physics Reanalysis. — 2018. — DOI: [10.48670/MOI-00013](https://doi.org/10.48670/MOI-00013). — URL: [https://data.marine.copernicus.eu/product/BALTICSEA\\_MULTIYEAR\\_PHY\\_003\\_011/description](https://data.marine.copernicus.eu/product/BALTICSEA_MULTIYEAR_PHY_003_011/description). [https://data.marine.copernicus.eu/product/BALTICSEA\\_MULTIYEAR\\_PHY\\_003\\_011/description](https://data.marine.copernicus.eu/product/BALTICSEA_MULTIYEAR_PHY_003_011/description).
- Gill A. E., Niller P. P. The theory of the seasonal variability in the ocean // Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts. — 1973. — Vol. 20, no. 2. — P. 141–177. — DOI: [10.1016/0011-7471\(73\)90049-1](https://doi.org/10.1016/0011-7471(73)90049-1).
- Gordeeva S. M., Malinin V. N., Drozd M. V. Present variations of the Baltic sea level and water balance // Materials of XXIV International Coastal Conference, devoted to the 60th anniversary of the "Sea Coasts" Working Group of RAS Council SEA COASTS – EVOLUTION, ECOLOGY, ECONOMY. — Krasnodar : Academus Publishing, 2012. — P. 88–91. — DOI: [10.31519/conferencearticle\\_5b5ce38b9c90f6.81613295](https://doi.org/10.31519/conferencearticle_5b5ce38b9c90f6.81613295).
- Greatbatch R. J. A note on the representation of steric sea level in models that conserve volume rather than mass // Journal of Geophysical Research. — 1994. — Vol. 99. — P. 12767. — DOI: [10.1029/94jc00847](https://doi.org/10.1029/94jc00847).
- Hordoir R., Axell L., Löptien U., *et al.* Influence of sea level rise on the dynamics of salt inflows in the Baltic Sea // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2015. — Vol. 120, no. 10. — P. 6653–6668. — DOI: [10.1002/2014jc010642](https://doi.org/10.1002/2014jc010642).
- Hughes S. L., Holliday N. P., Gaillard F. Variability in the ICES/NAFO region between 1950 and 2009: observations from the ICES Report on Ocean Climate // ICES Journal of Marine Science. — 2012. — Vol. 69, no. 5. — P. 706–719. — DOI: [10.1093/icesjms/fss044](https://doi.org/10.1093/icesjms/fss044).
- Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Volume III The Baltic Sea. Issue I. Hydrometeorological conditions / ed. by F. S. Terziev, V. A. Rozhkov, A. I. Smirnova. — St. Petersburg : Hydrometeoizdat, 1992. — P. 447.
- Jackett D. R., McDougall T. J. Minimal Adjustment of Hydrographic Profiles to Achieve Static Stability // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. — 1995. — Vol. 12, no. 2. — P. 381–389. — DOI: [10.1175/1520-0426\(1995\)012<0381:maohpt>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1995)012<0381:maohpt>2.0.co;2).
- Köhl A., Stammer D., Cornuelle B. Interannual to Decadal Changes in the ECCO Global Synthesis // Journal of Physical Oceanography. — 2007. — Vol. 37, no. 2. — P. 313–337. — DOI: [10.1175/jpo3014.1](https://doi.org/10.1175/jpo3014.1).
- Lehmann A., Myrberg K., Post P., *et al.* Salinity dynamics of the Baltic Sea // Earth System Dynamics. — 2022. — Vol. 13, no. 1. — P. 373–392. — DOI: [10.5194/esd-13-373-2022](https://doi.org/10.5194/esd-13-373-2022).
- Leppäranta M., Myrberg K. Physical Oceanography of the Baltic Sea. — Springer Berlin Heidelberg, 2009. — P. 378. — DOI: [10.1007/978-3-540-79703-6](https://doi.org/10.1007/978-3-540-79703-6).
- Liblik T., Lips U. Stratification Has Strengthened in the Baltic Sea - An Analysis of 35 Years of Observational Data // Frontiers in Earth Science. — 2019. — Vol. 7. — DOI: [10.3389/feart.2019.00174](https://doi.org/10.3389/feart.2019.00174).
- Lisitzin E. The influence of water density variations on sea level in the Northern Baltic // The International Hydrographic Review. — 1959. — Vol. 36, no. 1. — P. 154–159.
- Lisitzin E. Sea-Level Changes. — Amsterdam : Elsevier Science & Technology Books, 1974. — P. 285.
- Litina E. N., Zakharchuk E. A., Tikhonova N. A. Dynamics of hypoxic zones in the Baltic Sea at the turn of the 20th and 21st centuries // Water resources. — 2020. — Vol. 47, no. 3. — P. 322–329. — DOI: [10.31857/s0321059620030098](https://doi.org/10.31857/s0321059620030098).
- Malinin V. N. Statistical methods for the analysis of hydrometeorological information. Textbook. — SPb : RSHU, 2008. — P. 408.
- Malinin V. N. Ocean level: present and future. — SPb : RSHU, 2012. — P. 260.
- Marmefelt E., Omstedt A. Deep water properties in the Gulf of Bothnia // Continental Shelf Research. — 1993. — Vol. 13, no. 2/3. — P. 169–187. — DOI: [10.1016/0278-4343\(93\)90104-6](https://doi.org/10.1016/0278-4343(93)90104-6).
- Matthaus W. The history of investigation of salt water inflows into the Baltic Sea - from the early beginning to recent results // Marine Science Reports. — Rostock-Warnemuende, Germany : Baltic Sea Research Institute (IOW), 2006. — P. 73.
- Meier H. E. M. Modeling the pathways and ages of inflowing salt- and freshwater in the Baltic Sea // Estuarine, Coastal and Shelf Science. — 2007. — Vol. 74, no. 4. — P. 610–627. — DOI: [10.1016/j.ecss.2007.05.019](https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.05.019).
- Menéndez M., Woodworth P. L. Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tide-gauge data set // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2010. — Vol. 115, no. C10. — DOI: [10.1029/2009jc005997](https://doi.org/10.1029/2009jc005997).

- Nerger L., Hiller W., Schröter J. A comparison of error subspace Kalman filters // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. — 2005. — Vol. 57, no. 5. — P. 715–735. — DOI: [10.3402/tellusa.v57i5.14732](https://doi.org/10.3402/tellusa.v57i5.14732).
- North Sea Region Climate Change Assessment / ed. by M. Quante, F. Colijn. — Springer International Publishing, 2016. — P. 573. — DOI: [10.1007/978-3-319-39745-0](https://doi.org/10.1007/978-3-319-39745-0).
- Oppenheimer M., Glavovic B. C., Hinkel J., *et al.* Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities // *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. — Cambridge University Press, 2022. — P. 321–446. — DOI: [10.1017/9781009157964.006](https://doi.org/10.1017/9781009157964.006).
- Passaro M., Müller F. L., Oelmann J., *et al.* Absolute Baltic Sea Level Trends in the Satellite Altimetry Era: A Revisit // *Frontiers in Marine Science*. — 2021. — Vol. 8. — DOI: [10.3389/fmars.2021.647607](https://doi.org/10.3389/fmars.2021.647607).
- Pemberton P., Löptien U., Hordoir R., *et al.* Sea-ice evaluation of NEMO-Nordic 1.0: a NEMO-LIM3.6-based ocean-sea-ice model setup for the North Sea and Baltic Sea // *Geoscientific Model Development*. — 2017. — Vol. 10, no. 8. — P. 3105–3123. — DOI: [10.5194/gmd-10-3105-2017](https://doi.org/10.5194/gmd-10-3105-2017).
- 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. — Vol. 5. — DOI: [10.3389/fmars.2018.00287](https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00287). — URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2018.00287>.
- Plag H.-P., Tsimplis M. N. Temporal variability of the seasonal sea-level cycle in the North Sea and Baltic Sea in relation to climate variability // *Global and Planetary Change*. — 1999. — Vol. 20, no. 2/3. — P. 173–203. — DOI: [10.1016/S0921-8181\(98\)00069-1](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(98)00069-1).
- Provotorov P. P. Steric Sea Levels // *Sea level fluctuations*. — SPb : RSHU, 2003. — P. 129–138.
- Pugh D. Tides, Surges and Mean Sea Level: A Handbook for Engineers and Scientists. — John Wiley & Sons, Chichester, 1987. — 472 p.
- RD 52.27.759–2011. Guidance document. Forecast service guide. Section 3. Part III Marine Hydrological Forecast Service. — Moscow, 2011.
- Schrum C., Hubner U., Jacob D., *et al.* A coupled atmosphere/ice/ocean model for the North Sea and the Baltic Sea // *Climate Dynamics*. — 2003. — Vol. 21, no. 2. — P. 131–151. — DOI: [10.1007/s00382-003-0322-8](https://doi.org/10.1007/s00382-003-0322-8).
- Stammer D., Cazenave A., Ponte R. M., *et al.* Causes for Contemporary Regional Sea Level Changes // *Annual Review of Marine Science*. — 2013. — Vol. 5, no. 1. — P. 21–46. — DOI: [10.1146/annurev-marine-121211-172406](https://doi.org/10.1146/annurev-marine-121211-172406).
- Storto A., Bonaduce A., Feng X., *et al.* Steric Sea Level Changes from Ocean Reanalyses at Global and Regional Scales // *Water*. — 2019. — Vol. 11, no. 10. — P. 1987. — DOI: [10.3390/w11101987](https://doi.org/10.3390/w11101987).
- Understanding sea-level rise and variability / ed. by J. A. Church, P. L. Woodworth, T. Aarup, *et al.* — Wiley, 2010. — P. 456. — DOI: [10.1002/9781444323276](https://doi.org/10.1002/9781444323276).
- Vitousek S., Barnard P. L., Fletcher C. H., *et al.* Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sea-level rise // *Scientific Reports*. — 2017. — Vol. 7, no. 1. — DOI: [10.1038/s41598-017-01362-7](https://doi.org/10.1038/s41598-017-01362-7).
- Voinov G. N. Tides and Tidal streams // *Polar Seas Oceanography. An integrated case study of the Kara Sea* / ed. by V. A. Volkov, O. M. Johannessen, V. E. Borodachov, *et al.* — Chichester, UK : Praxis Publishing, 2002. — P. 147–214.
- WCRP Global Sea Level Budget Group. Global sea-level budget 1993-present // *Earth System Science Data*. — 2018. — Vol. 10, no. 3. — P. 1551–1590. — DOI: [10.5194/essd-10-1551-2018](https://doi.org/10.5194/essd-10-1551-2018).
- Weisse R., Dailidienė I., Hünicke B., *et al.* Sea level dynamics and coastal erosion in the Baltic Sea region // *Earth System Dynamics*. — 2021. — Vol. 12, no. 3. — P. 871–898. — DOI: [10.5194/esd-12-871-2021](https://doi.org/10.5194/esd-12-871-2021).
- Zakharchuk E. A., Litina E. N., Klevantsov Y. P., *et al.* Nonstationarity of the hydrometeorological processes in the Baltic Sea at climate changing conditions // *Proceedings of GOIN*. — 2017a. — No. 218. — P. 6–62.
- Zakharchuk E. A., Sukhachev V. N., Tikhonova N. A. Mechanisms of dangerous sea level rise in the Gulf of Finland. — St. Petersburg : Publishing house "Petersburg XXI century", 2017b. — P. 152.
- Zakharchuk E. A., Sukhachev V. N., Tikhonova N. A. Storm surges in the Gulf of Finland of the Baltic Sea // *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. — 2021. — Vol. 66, no. 4. — P. 781–805. — DOI: [10.21638/spbu07.2021.408](https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.408).
- Zakharchuk E. A., Sukhachev V. N., Tikhonova N. A., *et al.* Seasonal fluctuations in Baltic sea level determined from satellite altimetry // *Continental Shelf Research*. — 2022a. — Vol. 249. — P. 104863. — DOI: [10.1016/j.csr.2022.104863](https://doi.org/10.1016/j.csr.2022.104863).
- Zakharchuk E. A., Sukhachev V. N., Tikhonova N. A., *et al.* Stationary and non-stationary description of the seasonal sea level oscillations in the Baltic Sea based on the tide gauge data // *Physical Oceanography*. — 2022b. — Vol. 38, no. 6. — P. 655–678. — DOI: [10.22449/0233-7584-2022-6-655-678](https://doi.org/10.22449/0233-7584-2022-6-655-678).