

## СРАВНИТЕЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА МЕЖГОДОВУЮ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СЕЗОННЫХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Е. А. Захарчук<sup>1</sup>, М. В. Виноградов<sup>1,2</sup>, В. Н. Сухачев<sup>\*,1,2</sup> и Н. А. Тихонова<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Санкт-Петербургский Государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup>Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, г. Москва, Россия\* **Контакт:** Владимир Николаевич Сухачев, Syhachev@mail.ru

С помощью продолжительных среднесуточных мареографных наблюдений за уровнем моря, спутниковых альтиметрических измерений и данных реанализов метеорологических и гидрофизических полей исследуются особенности и физические механизмы межгодовой изменчивости сезонных колебаний уровня Балтийского моря. Показано, что за период 1889–2022 гг. в Стокгольме в межгодовых изменениях амплитуд гармоник  $S_a$ ,  $S_{sa}$ ,  $S_{ta}$ ,  $S_{qa}$  не отмечаются статистически значимые линейные тренды, но наблюдаются долгопериодные циклы с временными масштабами от 20–35 до 55 лет и очень значительными изменениями амплитуд от 0,5–1,0 до 25–27 сантиметров. В последние десятилетия у гармоник  $S_a$ ,  $S_{sa}$ ,  $S_{ta}$  наблюдается заметное уменьшение амплитуд и дисперсии колебаний. Результаты взаимного корреляционного и множественного регрессионного анализов аномалий сезонных колебаний уровня моря и различных гидрометеорологических процессов свидетельствуют, что самый большой вклад в межгодовую изменчивость сезонных колебаний уровня моря оказывают изменения касательного трения ветра. Вторыми по значимости процессами являются изменения атмосферного давления над морем и водообмена между Балтийским и Северным морями. Самое незначительное воздействие на межгодовую изменчивость характеристик сезонных колебаний уровня моря оказывают изменения составляющих пресного баланса и плотности воды.

**Ключевые слова:** уровень моря, спутниковые альтиметрические измерения, данные реанализа, сезонные колебания, скользящий гармонический анализ, межгодовая изменчивость, тренды, касательное напряжение трения ветра, атмосферное давление, стерические колебания, пресноводный баланс, водообмен, множественный регрессионный анализ.

**Цитирование:** Захарчук, Е. А., М. В. Виноградов, В. Н. Сухачев и Н. А. Тихонова

Сравнительное влияние гидрометеорологических процессов на межгодовую изменчивость сезонных колебаний уровня Балтийского моря // Russian Journal of Earth Sciences. — 2024. — Т. 24. — ES4013. — DOI: 10.2205/2024es000922 — EDN: RNZFKL

## 1. Введение

Сезонные колебания уровня играют важную роль в динамике вод почти полностью замкнутого, мелководного Балтийского моря. Они являются индикаторами изменений метеорологических процессов, наблюдающегося потепления климата [Гордеева и Малинин, 2014; Männikus et al., 2020], водообмена с Северным морем [Ekman, 2009; Gustafsson and Andersson, 2001; Samuelsson and Stigebrandt, 1996] и оказывают заметное воздействие на берега и прибрежную инфраструктуру Балтики [Labuz and Kowalewska-Kalkowska, 2011; Weisse et al., 2021]. В отдельные годы отмечается заметный вклад сезонных колебаний Балтийского моря в опасные подъёмы уровня на востоке Финского залива [Захарчук и Тихонова, 2011]. Исследования на востоке Финского залива показывают, что в 95% случаев, опасные подъёмы уровня в Кронштадте происходили в годы с положительной аномалией сезонных колебаний уровня моря. Результаты численного гидродинамического моделирования свободных колебаний Балтийского моря

<https://elibrary.ru/rnzfkl>

Получено: 17 января 2024 г.

Принято: 12 июля 2024 г.

Опубликовано: 17 декабря 2024 г.



© 2024. Коллектив авторов.

свидетельствуют, что в стратифицированном море генерируются бароклинные моды собственных колебаний с периодами около одного года, величина которых сравнима со средними многолетними оценками годовых колебаний уровня, полученными на основе анализа мареографных и спутниковых альтиметрических данных [Zakharchuk et al., 2021].

Обладая выраженной ритмикой сезонные колебания имеют наибольшие амплитудные максимумы в спектрах среднемесячных значений уровня Балтики [Медведев, 2014; Ekman and Stigebrandt, 1990].

Теоретические исследования свидетельствуют, что сезонные вариации уровня моря вызываются сезонными изменениями касательного трения ветра, атмосферного давления, морских течений, плотности морской воды, количества атмосферных осадков, испарения с поверхности моря, материкового стока и водообмена с прилегающими морскими бассейнами [Фукс, 2003; Gill and Niller, 1973; Leppäranta and Myrberg, 2009].

Выраженными характерными особенностями среднего многолетнего сезонного хода уровня Балтийского моря являются весенний минимум, осенне-зимний максимум и асимметрия сезонных изменений уровня, проявляющаяся в сравнительно быстром понижении уровня моря зимой-весной, в течение 4–5 месяцев, до минимального значения в апреле-мае, и более продолжительном подъёме уровня летом и осенью, в течение 7–8 месяцев, до максимума в ноябре-январе [Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР: Проект «Моря СССР». Том III Балтийское море. Выпуск I Гидрометеорологические условия, 1992; Захарчук и др., 2022; Cheng et al., 2018; Männikus et al., 2020; Zakharchuk et al., 2022].

По мнению исследователей, сезонное понижение уровня Балтийского моря зимой и весной происходит из-за наблюдающегося в этот период роста атмосферного давления, уменьшения количества атмосферных осадков, низких значений материкового стока, увеличения плотности морских вод, снижения скорости юго-западных ветров и смене их направления на северо-восточные румбы, что способствует усилению оттока вод из Балтийского моря в Северное [Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР: Проект «Моря СССР». Том III Балтийское море. Выпуск I Гидрометеорологические условия, 1992; Lisitzin, 1974; Zakharchuk et al., 2022].

Среднее многолетнее сезонное повышение уровня Балтики от весны к зиме является следствием весеннего увеличения речного стока, летнего роста количества атмосферных осадков, осенне-зимнего понижения атмосферного давления и плотности морских вод, а также осеннего усиления юго-западных ветров, способствующих притоку вод из Северного моря в Балтийское [Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР: Проект «Моря СССР». Том III Балтийское море. Выпуск I Гидрометеорологические условия, 1992; Zakharchuk et al., 2022].

Асимметрия среднего сезонного хода уровня Балтики связана с тем, что метеорологические и океанологические процессы, вызывающие понижение уровня моря имеют весенние экстремумы, в то время, как у процессов, которые приводят к росту уровня моря, экстремальные значения разнесены во времени: максимумы речного стока наблюдаются весной, а у количества атмосферных осадков – летом, минимальные значения атмосферного давления и максимумы юго-западных ветров отмечаются осенью и зимой [Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР: Проект «Моря СССР». Том III Балтийское море. Выпуск I Гидрометеорологические условия, 1992; Zakharchuk et al., 2022].

В ряде работ изучались причины сезонного хода уровня Балтийского моря. В начале 1970-х годов Е. Лисицына предположила, что такие компоненты водного баланса, как водообмен через Датские проливы и речной сток, могут быть основными факторами, ответственными за стационарные сезонные изменения уровня Балтийского моря [Lisitzin, 1974]. Позднее была подтверждена важность водообмена с Северным морем для сезонных колебаний уровня моря [Ekman, 2009; Gustafsson and Andersson, 2001; Samuelsson and Stigebrandt, 1996], в то время как корреляции сезонных колебаний уровня Балтики с речным стоком выявлено не было [Stramska et al., 2013]. Johansson

and Kahma [2016] обнаружили хорошую связь между рядами среднемесячных значений зонального компонента геострофического ветра и мареографных измерений уровня Балтийского моря, за исключением юго-западной части. Они показали, что с изменчивостью зональной составляющей геострофического ветра может быть связано примерно 75% изменчивости объема воды Балтийского моря.

Значительное увеличение к концу XX века количества станций мареографных измерений уровня способствовало появлению работ, в которых исследовались региональные различия в изменении характеристик сезонных колебаний уровня в прибрежных районах Балтийского моря. В работах [Захарчук и др., 2022; Медведев, 2014; Ekman, 1996] с помощью гармонического анализа многолетних рядов мареографных измерений уровня моря изучалась пространственная изменчивость амплитуд сезонных колебаний в береговой зоне Балтийского моря. Результаты свидетельствовали об увеличении амплитуды годовой гармоники  $S_a$  от 4–6 см в Датских проливах до 12–14,5 см в вершинах Финского и Ботнического заливов [Захарчук и др., 2022; Медведев, 2014; Ekman, 1996]. Амплитуды полугодовой гармоники  $S_{sa}$  оказались в несколько раз меньше и менялись от 1–3 см в пр. Каттегат и Датских проливах, до 5–6 см в Финском заливе, в районе Аландских островов, а также у восточного побережья Швеции в Ботническом море [Захарчук и др., 2022; Медведев, 2014; Ekman, 1996]. Средние амплитуды треть годовых ( $S_{ta}$ ) и четверть годовых ( $S_{qa}$ ) гармоник оказались значительно меньше амплитуд гармоник  $S_a$  и  $S_{sa}$  и варьировали от 0.1–0.8 см на юго-западе моря до максимальных значений 1,4–2,6 см в Финском заливе [Захарчук и др., 2022; Медведев, 2014].

Большая продолжительность рядов измерений уровня моря (153–200 лет) на некоторых мареографных станциях Балтики позволила оценить межгодовую изменчивость сезонных колебаний в XIX – начале XXI века [Захарчук и др., 2022; Медведев, 2014; Ekman and Stigebrandt, 1990; Hünicke and Zorita, 2008; Plag and Tsimplis, 1999]. Результаты Ekman and Stigebrandt [1990] показали наличие значимого положительного тренда в изменениях годовой компоненты уровня моря за период 1825–1984 гг, который они связывали с вековыми изменениями океанографических условий в северо-восточной части Северной Атлантики за счет движения океанического полярного фронта [Ekman and Stigebrandt, 1990]. Однако, исследование межгодовой изменчивости гармоники  $S_a$  в Стокгольме за более поздний период 1889–2020 гг. показало уже наличие незначимого положительного линейного тренда, на фоне которого наблюдались цикличности в изменениях амплитуды гармоники  $S_a$  с периодами около 20–30 и 60 лет, причем самое значительное уменьшение амплитуд годовых колебаний уровня моря в различных районах Балтики отмечалось с начала 1980-х по настоящее время, когда в изменениях амплитуд гармоники  $S_a$  в этот период в разных районах моря отмечались значимые отрицательные тренды, в то время как в изменениях гармоник  $S_{sa}$ ,  $S_{ta}$ ,  $S_{qa}$  трендов не наблюдалось [Захарчук и др., 2022]. Межгодовые изменения гармоники  $S_a$  авторы связывали с Североатлантическим колебанием и общей тенденцией потепления климата [Медведев, 2014; Plag and Tsimplis, 1999], с вековыми изменениями атмосферных осадков в регионе Балтийского моря [Hünicke and Zorita, 2008], а также с межгодовыми изменениями ветра и атмосферного давления [Захарчук и др., 2022].

С. Барбоса и Р. Доннер исследовали годовые изменения уровня Балтийского моря за период 1900–2012 гг. по данным его среднемесячных значений на 9 береговых станциях с помощью дискретного вейвлет-анализа [Barbosa and Donner, 2016]. Они не оценивали линейный тренд в изменении амплитуды годовой компоненты сезонных колебаний уровня, который выделялся другими авторами [Захарчук и др., 2022; Ekman and Stigebrandt, 1990; Hünicke and Zorita, 2008; Plag and Tsimplis, 1999], но обнаружили чередующиеся периоды высоких и низких амплитуд в изменениях годового цикла сезонных колебаний уровня [Barbosa and Donner, 2016]. В работе [Zakharchuk et al., 2022] эти особенности межгодовых изменений годовых колебаний связывались с их амплитудной модуляцией, однако причины этой модуляции не исследовались.

В работе [Захарчук и др., 2022] с помощью взаимного корреляционного анализа рядов межгодовых изменений амплитуды годового компонента сезонных колебаний

уровня в 20 береговых пунктах Балтики было показано, что изменения амплитуды годовых колебаний на ст. Стокгольм очень хорошо связаны с ее межгодовыми изменениями в других прибрежных районах Балтийского моря.

По сравнению с мареографными данными спутниковые альтиметрические измерения открыли возможность изучения колебаний уровня в открытых районах океанов и морей. Сравнение характеристик сезонных изменений уровня моря, полученных на основе альтиметрических и мареографных измерений, показало, что спутниковая альтиметрия способна достаточно точно описывать пространственную и временную изменчивость сезонных колебаний уровня Балтийского моря [Cheng et al., 2018; Kowalczyk et al., 2021; Pajak and Kowalczyk, 2019; Stramska and Chudziak, 2013; Zakharchuk et al., 2022].

На основе результатов гармонического анализа спутниковых альтиметрических данных было показано, что годовые возмущения в поле уровня Балтийского моря распространяются с юго-запада на северо-восток в виде низкочастотных волн со скоростями 15–36 см/с, которые хорошо согласуются с теоретическими фазовыми скоростями бароклинных волн Кельвина [Zakharchuk et al., 2022].

Cheng et al. [2018] использовали метод циклостационарных эмпирических ортогональных функций для исследования закономерностей пространственной структуры и временных изменений годового цикла уровня в Балтийском море на основе среднемесячных данных спутниковой альтиметрии за период 1993–2014 гг. [Cheng et al., 2018]. Для исследования причин межгодовых изменений оценок годового хода уровня Балтики проводился взаимный корреляционный анализ между главными компонентами годового хода уровня моря, рассчитанными по спутниковым альтиметрическим данным, и главными компонентами различных метеорологических параметров (зональным ветром, значениями индекса Северо-Атлантического колебания, атмосферным давлением и температурой воздуха). Результаты показали во всех случаях высокие оценки коэффициентов корреляции, достигающие значений 0,60–0,80 [Cheng et al., 2018].

В работе Zakharchuk et al. [2022] для более представительной оценки корреляционных связей между межгодовыми изменениями сезонных колебаний уровня моря и различных гидрометеорологических процессов, было предложено исключать перед взаимным корреляционным анализом стационарную компоненту из рядов гармоник Sa, Ssa, Sta, Sqa, полученных с помощью скользящего гармонического анализа, у всех гидрометеорологических процессов. По сравнению с другими работами в статье Zakharchuk et al. [2022] оценивались корреляции не только с компонентами скорости ветра, температурой воздуха и атмосферным давлением, но также и со всеми составляющими водного баланса (осадками, испарением, речным стоком и водообменом с Северным морем). Результаты взаимного корреляционного анализа показали, что для всех 4-х гармоник отмечается высокая корреляция с межгодовыми изменениями ветра и атмосферного давления; для 3-х гармоник (Ssa, Sta, Sqa) была выявлена высокая связь с изменениями водообмена. С температурой воздуха высокие значения коэффициентов корреляции были отмечены только для гармоники Sa. Для всех четырёх гармоник не было обнаружено связи с изменениями осадков, испарения, материкового стока [Zakharchuk et al., 2022].

В перечисленных работах не исследовалось влияние на изменения сезонных колебаний уровня моря межгодовых изменений плотности водных масс Балтийского моря, хотя высокие коэффициенты корреляции между изменениями гармоники Sa и годовыми колебаниями температуры воздуха, выявленные в работах [Cheng et al., 2018; Zakharchuk et al., 2022], могут свидетельствовать о наличии связи с термостерической составляющей уровня моря.

В ряде работ исследовалась связь между сезонными колебаниями уровня моря и изменениями ветра [Barbosa and Donner, 2016; Cheng et al., 2018; Johansson and Kahma, 2016; Zakharchuk et al., 2022]. Однако колебания уровня вызываются не самим ветром, а касательным напряжением трения ветра, которое имеет квадратичную зави-

симость от ветра. Поэтому, физически, более правильно будет оценивать корреляцию между колебаниями уровня и касательным напряжением трения ветра.

Плохо изученным остаётся вопрос о долях влияния различных метеорологических и гидрологических процессов на межгодовую изменчивость сезонных колебаний уровня моря. Взаимный корреляционный анализ позволяет получить представление лишь о качественной характеристике связи между процессами. Для сравнительных количественных оценок таких связей следует использовать другие методические подходы.

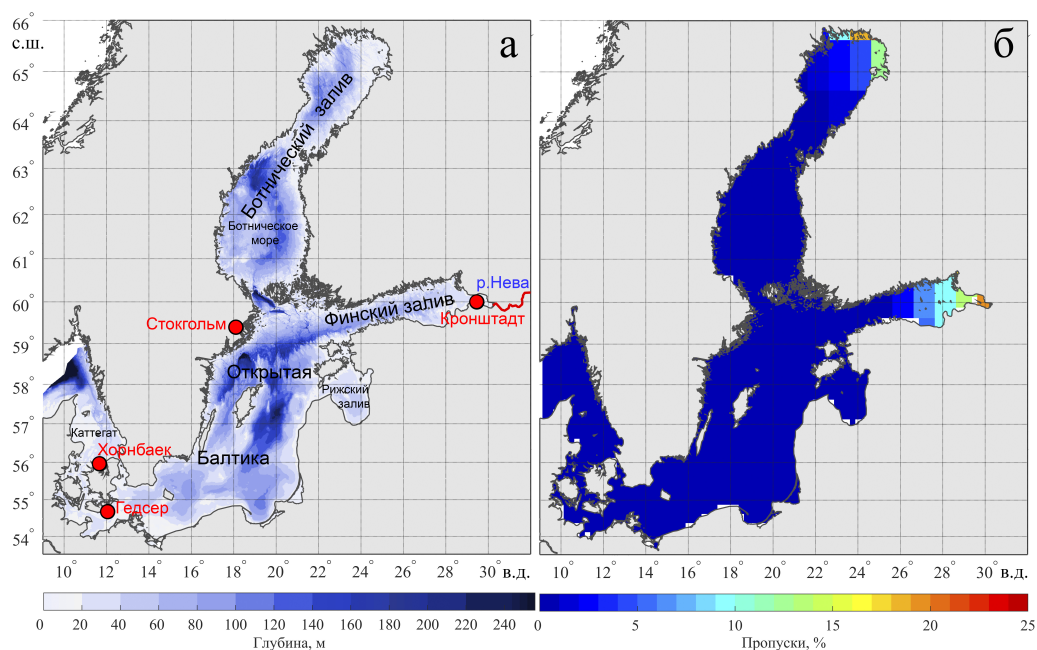
В данной статье мы постарались учесть перечисленные недостатки и методические ограничения при исследовании сезонных колебаний уровня Балтийского моря.

Цель работы – исследовать с помощью длительных мареографных измерений уровня моря в Стокгольме особенности межгодовых изменений сезонных колебаний за период 1889–2022 гг. и оценить на основе спутниковых альтиметрических измерений уровня моря, а также данных реанализов метеорологических и гидрофизических полей, сравнительные количественные вклады влияния изменений касательного напряжения трения ветра, атмосферного давления, плотности воды и компонент водного баланса на межгодовую изменчивость составляющих сезонных колебаний уровня Балтийского моря в период 1993–2022 гг.

## 2. Данные и методы

Для исследования причин межгодовых изменений характеристик сезонных колебаний уровня Балтийского моря привлекались следующие данные:

1. Мареографные измерения уровня моря с временным шагом одни сутки на станциях Стокгольм за период с 1889 по 2022 г., Гедсер (1993–2021 гг.), Хорнбаек (1993–2021 гг.), полученные с ресурса E.U. Copernicus Marine Service Information (<https://doi.org/10.48670/moi-00032>), и Кронштадт за период с 1971 по 2015 гг. (см. рис. 1а), предоставленные Северо-Западным Управлением Росгидромета (<http://www.meteo.nw.ru>).



**Рис. 1.** Батиметрия Балтийского моря и местоположение мареографных станций (красные кружки (а)). Количество пропусков (в процентах от общего количества членов ряда) в узлах сеточной области альтиметрических данных (б).

2. Среднесуточные данные о стоке Невы за период 1971–2015 гг. предоставленные Северо-Западным Управлением Росгидромета (<http://www.meteo.nw.ru>).

3. Массив комбинированных альтиметрических данных нескольких спутников: Jason-3, Sentinel-3A, HY-2A, Saral/AltiKa, Cryosat-2, Jason-2, Jason-1, T/P, ENVISAT, GFO, ERS1/2, включающий поля аномалий уровня моря (SLA) с пространственным разрешением  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  и дискретностью 1 сутки (E.U. Copernicus Marine Service Information (<https://doi.org/10.48670/moi-00145>), полученный методом оптимальной интерполяции за период 1993–2021 гг. [Bretherton et al., 1976; Pujol et al., 2016]. При создании массива в исходные альтиметрические данные была введена поправка на орбитальную ошибку, коррекции на инструментальные ошибки, поправка на влияние тропосферы и ионосферы на запаздывание зондирующего и отраженного импульса альтиметра [Le Traon et al., 1998]. Кроме этого, из альтиметрических данных были исключены колебания, связанные со статическим эффектом атмосферного давления, воздействие ветровых волн, океанских и земных приливов.

В большинстве работ, посвящённых исследованиям сезонного хода уровня Балтийского моря, использовались данные среднемесячных значений уровня [Медведев, 2014; Ekman, 1996; Ekman and Stigebrandt, 1990; Hünnicke and Zorita, 2008; Plag and Tsimplis, 1999]. Однако в работе [Захарчук и др., 2022] было показано, что для более точной оценки характеристик сезонных колебаний уровня моря следует использовать ряды не среднемесячных, а среднесуточных значений уровня моря. Поэтому в данной работе используются данные среднесуточных значений спутниковых альтиметрических и мареографных наблюдений за уровнем Балтийского моря.

Альтиметрические данные проверялись на наличие пропусков. Наибольшее количество пропусков, варьирующее от 2 до 25%, связано с наличием припайного и дрейфующего льда в зимний период и приходится на северную часть Ботнического залива, а также на центральную и восточную части Финского залива (рис. 16).

4. Данные реанализа метеорологических полей ERA5 о скорости и направлении ветра на высоте 10 м и атмосферного давления на уровне моря с пространственным разрешением  $0,25 \times 0,25$  градусов за период 1993–2022 гг. (<https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>).
5. Данные регионального реанализа гидрофизических полей Baltic Sea Physics Reanalysis (BALTIKSEA\_MULTITYEAR\_PHY\_003\_011) о температуре, солёности Балтики на разных горизонтах с пространственным разрешением  $2 \times 2$  км и 56 слоями по вертикали (толщина слоев меняется в зависимости от глубины от 3 до 22 м) за период 1993–2022 гг. (<https://doi.org/10.48670/moi-00013>). Эти данные получены с помощью численной реализации гидродинамической модели NEMO v3.6 (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 v3.6 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/>).

Выделение сезонных колебаний в исходных рядах уровня моря и других гидрометеорологических процессов производилось с помощью гармонического анализа. Амплитуды ( $A$ ) и фазы ( $G$ ) сезонных колебаний уровня в стационарном приближении  $\zeta(t)$  рассчитывались с помощью гармонического анализа, выполненного по методу наименьших квадратов, с учетом рекомендаций, представленных в работе Г. Н. Войнова

[Voinov, 2002]. Оценивались 4 гармоники: годовая ( $S_a$ ) – 365,2 сут, полугодовая ( $S_{sa}$ ) – 182,6 сут, третьегодовая ( $S_{ta}$ ) – 121,8 сут и четвертьгодовая ( $S_{qa}$ ) – 91,3 сут.

$$\begin{aligned} \overline{\zeta(t)} = & A_{sa} \cos(\omega_{sa}t - G_{sa}) + A_{ssa} \cos(\omega_{ssa}t - G_{ssa}) + \\ & + A_{sta} \cos(\omega_{sta}t - G_{sta}) + A_{sqa} \cos(\omega_{sqa}t - G_{sqa}), \end{aligned} \quad (1)$$

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

Чтобы исследовать особенности межгодовой изменчивости сезонных колебаний, ряд уровня моря в Стокгольме подвергался скользящему гармоническому анализу [Plag and Tsimplis, 1999; Zakharchuk et al., 2022]. Для годовой гармоники  $S_a$  период квазистационарности (отрезок ряда для расчетов) принимался равным 1 год, и скользящий гармонический анализа проводился без перекрытия (т.е. за каждый последующий год). Для других гармоник эта процедура проводилась с перекрытием. Для полугодовой компоненты  $S_{sa}$  период квазистационарности принимался равным 1 год, и скользящие проводилось с перекрытием через каждые полгода; для треть-годовой гармоники  $S_{ta}$  период квазистационарности принимался равным 8 месяцев, и скользящие проводилось через каждые 4 месяца; для четверть-годовой гармоники  $S_{qa}$  период квазистационарности принимался равным 6 месяцев, и скользящие проводилось через каждые 3 месяца. По оцененным амплитудам и фазам для каждого периода квазистационарности предвычислялись ряды компонент сезонных колебаний, которые затем склеивались в ряд  $\zeta(t)$ , описывающий межгодовые изменения каждой компоненты сезонных колебаний. В местах соединений предвычисленных рядов иногда отмечались резкие скачки уровня по высоте, которые сглаживались методом кубического сплайна [de Boor, 1978] с окном сглаживания 60 суток (последние 30 суток предыдущего периода квазистационарности и первые 30 суток следующего периода квазистационарности).

Среднеквадратические ошибки расчета амплитуд гармоник, оцененных с помощью скользящего гармонического анализа вычислялись следующим образом. По остаточным рядам, полученным для каждого периода квазистационарности, оценивались амплитуды на частотах гармоник  $S_a$ ,  $S_{sa}$ ,  $S_{ta}$ ,  $S_{qa}$ . По рядам этих амплитуд оценивалось их среднеквадратическое отклонение, которое принималось за среднеквадратическую ошибку расчета амплитуд исследуемых гармоник [Zakharchuk et al., 2022]

В полученных по результатам скользящего гармонического анализа рядах амплитуд гармоник  $S_a$ ,  $S_{sa}$ ,  $S_{ta}$ ,  $S_{qa}$  выделялись линейные тренды. Значимость линейных трендов в межгодовых изменениях амплитуд гармоник  $S_a$ ,  $S_{sa}$ ,  $S_{ta}$ ,  $S_{qa}$  оценивалась с помощью критерия Стьюдента [Малинин, 2008].

Для исследования причин и механизмов современных изменений характеристик сезонных колебаний уровня Балтийского моря проводился взаимный корреляционный и множественный регрессионный анализы межгодовых вариаций уровня моря на частоте гармоник  $S_a$ ,  $S_{sa}$ ,  $S_{ta}$ ,  $S_{qa}$ , рассчитанных с помощью спутниковых альтиметрических данных, с такими же колебаниями различных гидрометеорологических процессов, оцененных на основе, описанных выше, данных реанализов метеорологических и гидрофизических полей: касательного напряжения трения ветра ( $\vec{\tau}_w$ ), атмосферного давления ( $P_a$ ), стерических колебаний уровня моря ( $\zeta_\rho$ ), атмосферных осадков ( $Pr$ ), речного стока ( $R$ ), испарения ( $E$ ), водообмена между Балтийским и Северным морями через Датские проливы ( $Q$ ).

Вектор касательного напряжения трения ветра ( $\vec{\tau}_w$ ) рассчитывался по известной формуле:

$$\vec{\tau}_w = c\rho_0\vec{W}|\vec{W}|$$

где  $c$  – безразмерный коэффициент,  $\rho_0$  – плотность воздуха,  $\vec{W}$  – вектор скорости ветра.

Стерические колебания уровня моря ( $\zeta_\rho$ ) рассчитывались по данным о температуре ( $T$ ) и солёности ( $S$ ) воды из регионального реанализа

BALTICSEA\_MULTIIYEAR\_PHY\_003\_011 (<https://doi.org/10.48670/moi-00013>). Несмотря на то, что для этого реанализа используется численная гидродинамическая модель NEMO v3.6, основанная на приближении Буссинеска, которое не позволяет описывать изменение объема столба морской воды без изменения его массы [Greatbatch, 1994], применяемые в рамках данного реанализа алгоритмы усвоения спутниковой и контактной информации об изменении  $T$  и  $S$ , дают возможность подстраивать рассчитанные по модели поля океанологических характеристик к их наблюдаемым значениям. В работе [Захарчук и др., 2023] было проведено сравнение стерических колебаний уровня в нескольких районах Балтики, оцененных по данным контактных измерений  $T$  и  $S$ , и по данным регионального реанализа. Результаты сравнения свидетельствовали, что данные регионального реанализа по  $T$  и  $S$  позволяют достаточно точно воспроизводить колебания уровня моря, вызванные изменениями плотности вод Балтийского моря [Захарчук и др., 2023].

Стерические колебания уровня моря оценивались по следующей формуле [Белоненко и Колдунов, 2006]:

$$\frac{\Delta\zeta_p}{\Delta t} = - \sum_{i=1}^n \frac{1}{\rho_0} \frac{\Delta\rho_i}{\Delta t} \Delta z_i,$$

где  $\frac{\Delta\zeta_p}{\Delta t}$  – 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. Плотность воды ( $\rho$ ) рассчитывалась по уравнению состояния, описанному в работе [Jackett and McDougall, 1995].

Расчет водообмена ( $Q$ ) через Датские проливы выполнялся по методике, описанной в работах Jakobsen et al. [2010] и Mohrholz [2018], по формуле:

$$Q = \sqrt{\frac{\Delta\zeta_s - B}{K_f}},$$

где  $K_f$  – эмпирический коэффициент трения. Согласно [Jakobsen et al., 2010] для проливов он равен от  $1,6 \times 10^{-10} \text{ с}^2 \text{ м}^{-5}$  до  $2 \times 10^{-11} \text{ с}^2 \text{ м}^{-5}$ ;  $B$  – коррекционная добавка на разницу уровней моря за счет градиента плотности вдоль пролива (бароклиническая добавка). Обычно величина этой добавки составляет несколько сантиметров;  $\Delta\zeta_s$  – разница уровня моря между Каттегатом и Западной Балтикой. Для оценки разности уровня моря ( $\Delta\zeta_s$ ) использовались ряды синхронных ежечасных мареографных наблюдений за уровнем моря на станциях Гедсер и Хорнбаек за период 1993–2021 гг. Данные по уровню моря были получены с ресурса Copernicus Marine Service (<http://marine.copernicus.eu>). Исходные ряды уровня усреднялись до суток и затем из данных уровня моря на станции Хорнбаек вычитались синхронные значения уровня моря на станции Гедсер.

Следуя методическим рекомендациям, изложенным в работе [Zakharchuk et al., 2022], перед взаимным корреляционным и множественным регрессионным анализами из рядов составляющих сезонных колебаний уровня моря, полученных с помощью скользящего гармонического анализа  $\zeta(t)$ , вычитались ряды составляющих  $\bar{\zeta}(t)$ , рассчитанные на основе стационарного гармонического анализа (1):

$$\zeta(t)' = \zeta(t) - \bar{\zeta}(t),$$

где  $\zeta(t)'$  – аномалии составляющих сезонных колебаний уровня моря.

Такая же процедура была произведена для рядов нестационарных составляющих других гидрометеорологических процессов, в результате чего были получены ряды аномалий касательного напряжения трения ветра  $\vec{\tau}_w(t)'$ , атмосферного давления  $P_a(t)'$ , стерических колебаний уровня моря  $\zeta\rho(t)'$ , атмосферных осадков  $Pr(t)'$ , речного стока  $R(t)'$ , испарения  $E(t)'$ , водообмена между Балтийским и Северным морями через Датские проливы  $Q(t)'$ .



Взаимный корреляционный анализ между аномалиями составляющих сезонных колебаний уровня моря  $\zeta(t)'$  и различными скалярными гидрометеорологическими процессами  $P(t)'$ ,  $\zeta\rho(t)'$ ,  $Pr(t)'$ ,  $R(t)'$ ,  $E(t)'$ ,  $Q(t)'$  производился путем оценивания нормированной взаимной корреляционной функции:

$$r_{\zeta,\eta}(\tau) = \frac{K_{\zeta,\eta}(\tau)}{\sqrt{K_{\zeta}(0)K_{\eta}(0)}} \quad (2)$$

где  $K_{\zeta}(0)$ ,  $K_{\eta}(0)$  – дисперсии двух скалярных процессов  $\zeta(t)$  и  $\eta(t)$ , а  $K_{\zeta,\eta}(\tau) = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} \zeta(t)\eta(t+\tau)dt$  – их взаимная ковариационная функция,  $\tau$  – временной сдвиг.

Оценка взаимосвязи между аномалиями составляющих сезонных колебаний уровня моря  $\zeta(t)'$ , и касательного напряжения трения ветра  $\vec{\tau}_w(t)'$  производилась путём расчета множественных коэффициентов корреляции по методике взаимного корреляционного анализа между скалярными и векторными процессами, изложенной в работе В. А. Рожкова [Рожков, 2002]. Следуя этой методике, в начале, оценивались матрицы коэффициентов взаимных корреляций следующего вида:

$$D_{\eta\mathbf{V}} = \begin{vmatrix} r_{\eta\eta} & r_{\eta u} & r_{\eta v} \\ r_{u\eta} & r_{uu} & r_{uv} \\ r_{v\eta} & r_{vu} & r_{vv} \end{vmatrix}, \quad D_{uv} = \begin{vmatrix} r_{uu} & r_{uv} \\ r_{vu} & r_{vv} \end{vmatrix}$$

где  $D_{\eta\mathbf{V}}$  и  $D_{uv}$  – определители матриц,  $\eta$  – скалярный процесс,  $\mathbf{V}$  – векторный процесс,  $u, v$  – составляющие векторного процесса на параллель и меридиан, соответственно,  $r_{\eta\eta}$ ,  $r_{\eta v}$ ,  $r_{uv}$ , ...,  $r_{vv}$  – коэффициенты взаимной корреляции.

Затем, рассчитывался множественный коэффициент корреляции ( $M$ ) между скалярным ( $\eta$ ) и векторным процессами ( $\mathbf{V}$ ):

$$M_{\eta\mathbf{V}} = \sqrt{1 - \frac{D_{\eta\mathbf{V}}}{D_{uv}}} \quad (3)$$

Коэффициенты корреляции, рассчитанные по формулам (2) и (3), оценивались на разных временных сдвигах и, затем, выбирались их максимальные значения (см. рис. 3).

Для того, чтобы количественно оценить относительные вклады различных гидрометеорологических процессов в межгодовую изменчивость составляющих сезонных колебаний уровня Балтийского моря проводился множественный регрессионный анализ. С этой целью уравнения множественной регрессии записывались в следующем виде:

$$\zeta_{sa}(t)' = a_0 + a_1[\tau u_{sa}(t)'] + a_2[\tau v_{sa}(t)'] + a_3[P_{sa}(t)'] + a_4[\zeta\rho_{sa}(t)'] + a_5[Pr_{sa}(t)'] + a_6[R_{sa}(t)'] + a_7[Q_{sa}(t)'] + a_8[E_{sa}(t)'], \quad (4)$$

$$\zeta_{ssa}(t)' = a_0 + a_1[\tau u_{ssa}(t)'] + a_2[\tau v_{ssa}(t)'] + a_3[P_{ssa}(t)'] + a_4[\zeta\rho_{ssa}(t)'] + a_5[Pr_{ssa}(t)'] + a_6[R_{ssa}(t)'] + a_7[Q_{ssa}(t)'] + a_8[E_{ssa}(t)'], \quad (5)$$

$$\zeta_{sta}(t)' = a_0 + a_1[\tau u_{sta}(t)'] + a_2[\tau v_{sta}(t)'] + a_3[P_{sta}(t)'] + a_4[\zeta\rho_{sta}(t)'] + a_5[Pr_{sta}(t)'] + a_6[R_{sta}(t)'] + a_7[Q_{sta}(t)'] + a_8[E_{sta}(t)'], \quad (6)$$

$$\zeta_{sqa}(t)' = a_0 + a_1[\tau u_{sqa}(t)'] + a_2[\tau v_{sqa}(t)'] + a_3[P_{sqa}(t)'] + a_4[\zeta\rho_{sqa}(t)'] + a_5[Pr_{sqa}(t)'] + a_6[R_{sqa}(t)'] + a_7[Q_{sqa}(t)'] + a_8[E_{sqa}(t)'], \quad (7)$$

где  $a_0$  – свободный член уравнения множественной регрессии, а  $a_1, a_2, \dots, a_8$  – коэффициенты этого уравнения,  $\tau u(t)'$ ,  $\tau v(t)'$  – зональная и меридиональная компоненты аномалий сезонных колебаний касательного напряжения трения ветра  $\vec{\tau}_w(t)'$ , остальные члены уравнений описаны в тексте выше. Перед проведением регрессионного анализа

все переменные, входящие в уравнение (4)–(7) приводились к безразмерному виду, путём нормирования рядов на их ср. кв. отклонения.

Количественные оценки относительных вкладов каждого гидрометеорологического предиктора из уравнений (4)–(7) рассчитывались следующим образом:

$$B_i = \frac{|a_i|}{\sum_{i=1}^n |a_i|} \cdot 100\%,$$

где  $B_i$  – процентный вклад  $i$ -ого гидрометеорологического фактора в межгодовую изменчивость аномалий сезонных гармоник  $S_a, S_{sa}, S_{ta}, S_{qa}$ ,  $a_i$  – коэффициенты математического разложения уравнения множественной регрессии ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), где  $n = 8$ .

### 3. Результаты и их интерпретация

#### 3.1. Изменчивость амплитуд составляющих сезонных колебаний уровня моря в Стокгольме за период с 1889–2022 гг.

На [рис. 2](#) представлены результаты скользящего гармонического анализа 133-летнего ряда среднесуточных значений уровня моря в Стокгольме, которые демонстрируют очень значительную межгодовую изменчивость амплитуд у всех 4-х гармоник сезонных колебаний. В зависимости от года они меняются от 0,5–1,0 до 25–27 сантиметров. У всех 4-х гармоник выделяются положительные линейные тренды, которые не являются статистически значимыми. Сглаживание рядов полиномом 15 степени демонстрирует, что в межгодовой изменчивости составляющих сезонных колебаний наблюдаются долгопериодные циклы с временными масштабами от 20–35 до 55 лет. Наибольшая величина амплитуд этих циклическостей отмечается для годовой гармоники  $S_a$ , с увеличением частоты её обертонов размах колебаний долгопериодных циклов уменьшается ([рис. 2](#)). Для гармоники  $S_a$  с конца 1890-х до начала 1980-х годов отмечается квазициклическое увеличение её амплитуд после чего, до настоящего времени, наблюдается резкое волнообразное их уменьшение ([рис. 2](#)). Максимальные значения дисперсии годовых колебаний наблюдались в 1920-е, 1940-е – 1950-е и в конце 1970-х начале 1980-х годов. После этого периода дисперсия годовых колебаний резко уменьшалась, достигнув в самом начале 2000-х годов второго, после 1910-х годов, минимума ([рис. 2](#)). В работе [Захарчук и др. \[2022\]](#) было показано, что резкое уменьшение амплитуд гармоники  $S_a$  в последние десятилетия обусловлено снижением интенсивности годовых колебаний ветра, и, в меньшей степени, атмосферного давления [[Захарчук и др., 2022](#)].

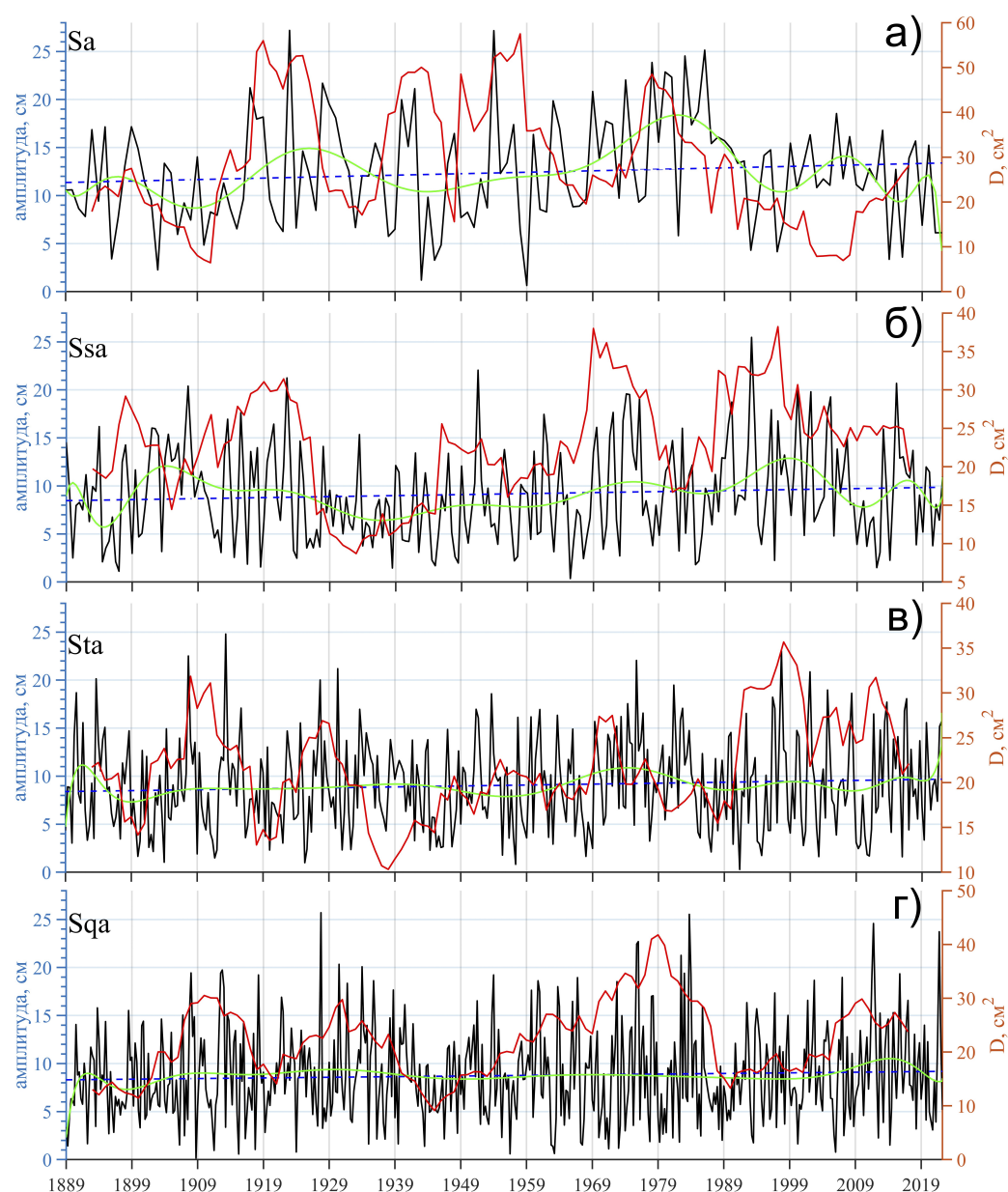
Межгодовая изменчивость полугодовой гармоники  $S_{sa}$  демонстрирует выраженный период увеличения её амплитуд и дисперсии в 1890-е – 1920-е годы, после чего они уменьшались до 1930-х – 1940-х годов, затем отмечался продолжительный рост амплитуд и дисперсии до 1990-х годов. В последние двадцать лет наблюдается снижение амплитуд и дисперсии полугодовых колебаний ([рис. 2](#)).

Дисперсия третьгодовых колебаний ( $S_{ta}$ ) циклически уменьшалась с 1880-х годов, достигнув своего основного минимума в 1930-х годах, после чего она росла до начала 2000-х годов. В последние 20 лет дисперсия третьгодовых колебаний уровня в Стокгольме слабо уменьшается ([рис. 2](#)).

Самые низкие значения дисперсии четвертьгодовых колебаний ( $S_{qa}$ ) отмечались в 1940-е годы, а самые большие – в 1970-е и в начале 1980-х годов. В последние 20 лет наблюдается слабый рост их дисперсии ([рис. 2](#)).

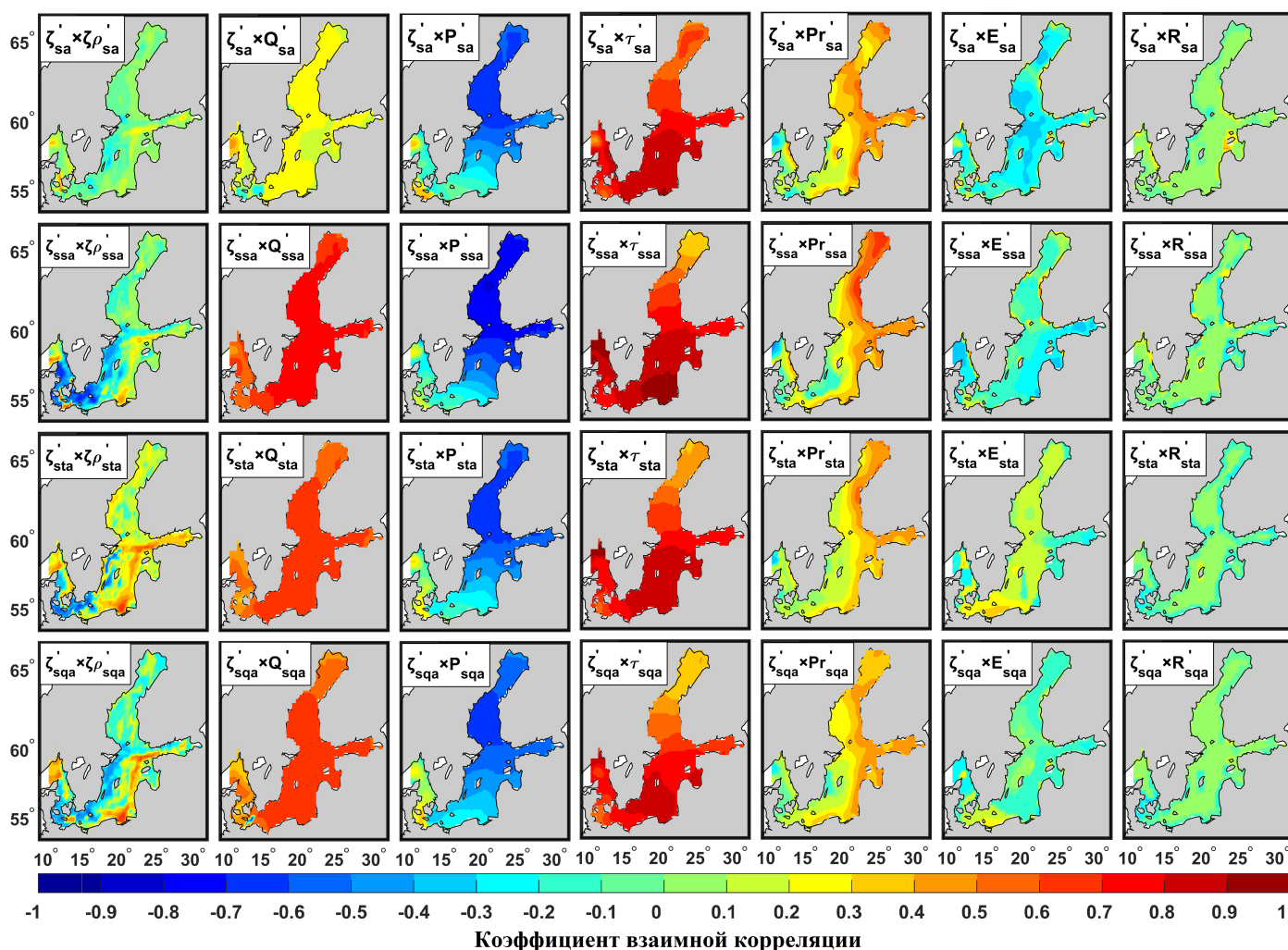
#### 3.2. Взаимный корреляционный анализ изменчивости сезонных колебаний уровня моря, рассчитанных по альтиметрическим данным, и гидрометеорологических процессов

Результаты взаимного корреляционного анализа между аномалиями составляющих сезонных колебаний уровня моря, рассчитанными по альтиметрическим данным, и различных гидрометеорологических процессов, представленные на [рис. 3](#), свидетельствуют, что самые большие коэффициенты корреляции, достигающие 0,8–1,0, отмечаются между аномалиями сезонных колебаний уровня моря  $\zeta(t)'$  и касательного



**Рис. 2.** Межгодовые изменения амплитуд годовой (Sa), полугодовой (Ssa), третьгодовой (Sta), и четвертьгодовой (Sqa) компонент сезонных колебаний уровня моря в Стокгольме, рассчитанных по мареографным измерениям за период с 1889–2022 гг. (черная линия). Линейный тренд обозначен прямой синей пунктирной линией; зелёная линия – полином 15 степени, красная линия – изменение дисперсии амплитуд гармоник (правая шкала), рассчитанной с периодом скольжения 10 лет и перекрытием 1 год.

напряжения трения ветра  $\vec{\tau}_w(t)'$ . Однако при движении с юга на север моря связь между этими процессами снижается, и для аномалий гармоник Ssa, Sta, Sqa на севере Ботнического залива коэффициенты корреляции между  $\zeta(t)'$  и  $\vec{\tau}_w(t)'$  уменьшаются до значений 0,3–0,4 (рис. 3). Эти оценки, в основном, хорошо согласуются с результатами работы [Zakharchuk et al., 2022], в которой на основе альтиметрических данных меньшей продолжительности (1993–2018 гг.) проводился взаимный корреляционный анализ между  $\zeta(t)'$  и сезонными аномалиями не  $\vec{\tau}_w(t)'$ , а ветра. Хотя, при сравнении с работой [Zakharchuk et al., 2022], выявляются и некоторые региональные различия, например, в нашем случае для всех гармоник увеличивается корреляция в проливе Каттегат, а для гармоники Sqa и на юге открытой Балтики.



**Рис. 3.** Коэффициенты максимальной корреляции между аномалиями составляющих сезонных колебаний уровня моря, рассчитанными по альтиметрическим данным, и различных гидрометеорологических процессов (обозначения смотрите в тексте).

В Ботническом и Финском заливах, а также на севере открытой Балтики, высокая обратная связь, достигающая  $-0,6 \dots -0,8$  отмечается между  $\zeta(t)'$  и аномалиями составляющих сезонных колебаний атмосферного давления  $P(t)'$ , в то время как на юге открытой Балтики связь между  $\zeta(t)'$  и  $P(t)'$  отсутствует (рис. 3). Похожие результаты были получены в работе [Johansson and Kahma, 2016], в которой оценивалась корреляция между среднемесячными значениями уровня моря на различных мареографных станциях Балтики и изменениями атмосферного давления.

Для аномалий гармоник Ssa, Sta, Sqa на большей части акватории Балтийского моря наблюдаются высокие значения коэффициентов корреляции (0,6–0,7) между  $\zeta(t)'$  и аномалиями водообмена между Северным морем и Балтикой  $Q(t)'$ , однако связь между этими процессами отсутствует для аномалий гармоник Sa (рис. 3).

С межгодовыми изменениями атмосферных осадков  $Pr(t)'$ , высокая связь отмечается только для полугодовой гармоник Ssa на востоке и севере Ботнического залива, в то время как для других районов моря коэффициенты корреляции между  $\zeta(t)'$  и  $Pr(t)'$  низкие (рис. 3).

Для всех четырёх гармоник на большей части акватории моря отсутствует взаимосвязь между  $\zeta(t)'$  и аномалиями стерических колебаний уровня моря  $\zeta\rho(t)'$ . Исключение составляет район Гданьского залива, где для гармоник Sta и Sqa отмечаются коэффициенты корреляции со значениями до 0,6 между  $\zeta(t)'$  и  $\zeta\rho(t)'$ , а также юго-западная часть

моря, где для гармоник Ssa наблюдаются значения обратной корреляции, достигающие 0,6.

рис. 3 свидетельствует также об отсутствии связи для всех гармоник между сезонными аномалиями уровня моря  $\zeta(t)'$  и испарением  $E(t)'$ , а также речным стоком  $R(t)'$  (рис. 3). Хорошо известно, что р. Нева имеет самый большой объём речного стока, по сравнению с другими реками, впадающими в Балтийское море [Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР: Проект «Моря СССР». Том III Балтийское море. Выпуск I Гидрометеорологические условия, 1992; Leppäranta and Myrberg, 2009]. Поэтому, для проверки результатов, представленных на рис. 3, был также произведён взаимный корреляционный анализ между аномалиями сезонных составляющих уровня моря  $\zeta(t)'$ , полученными на основе мареографных измерений в Кронштадте и сезонными аномалиями стока Невы, полученными по инструментальным измерениям. Результаты такого анализа представлены в табл. 1. Они подтверждают результаты, показанные на рис. 3, свидетельствующие, что и анализ инструментальных измерений в Невской губе Финского залива для всех 4-х гармоник показывает отсутствие корреляции между  $\zeta(t)'$  и  $R(t)'$ .

**Таблица 1.** Максимальные значения коэффициентов корреляции ( $\tau$ ) между изменениями аномалий составляющих сезонных колебаний уровня моря в Кронштадте  $\zeta(t)'$  и аномалиями стока Невы  $R(t)'$

Коррелируемые процессы	$K(\tau)$
$\zeta'_{sa}(t) \times R'_{Sa}(t)$	0,19
$\zeta'_{ssa}(t) \times R'_{Ssa}(t)$	0,04
$\zeta'_{sta}(t) \times R'_{Sta}(t)$	-0,09
$\zeta'_{sqa}(t) \times R'_{Sqa}(t)$	0,19

При проведении взаимного корреляционного анализа статистически достоверные оценки временных сдвигов могут быть получены только для случаев, когда наблюдались высокие значения коэффициентов взаимной корреляции ( $>0,6$ ). Если коэффициенты корреляции меньше 0,6, то линейная связь между процессами отсутствует и не имеет смысла оценивать временные сдвиги. В нашем случае большие значения корреляции отмечается только с изменениями касательного напряжения трения ветра (до 0,8–1,0), атмосферного давления (до -0,6...-0,8), а для гармоник Ssa, Sta, Sqa – с изменениями водообмена через Датские проливы (до 0,6–0,7). Не отмечалось связи аномалий сезонных колебаний уровня моря с составляющими пресного баланса и стерическими колебаниями уровня моря (см. рис. 3).

Анализ временных сдвигов для случаев высокой корреляции ( $>0,6$ ) показал, что они отрицательные (сезонные колебания уровня запаздывают относительно сезонных колебаний гидрометеорологических процессов) и варьируют от -5 до -15 суток для касательного напряжения трения ветра, а также атмосферного давления, и от -20 до -35 суток для колебаний водообмена через Датские проливы.

### 3.3. Множественный регрессионный анализ сезонных колебаний уровня моря

Перед проведением множественного регрессионного анализа все гидрометеорологические предикторы, которые являются переменными в уравнениях (4)–(7), были проверены на степень их взаимосвязанности. В табл. 2 представлены средние по акватории Балтийского моря значения максимальных коэффициентов корреляции между гидрометеорологическими процессами. Как следует из таблицы 2, коэффициенты корреляции во всех случаях низкие. Этот результат демонстрирует, что гидрометеорологические предикторы не являются связанными, что делает их выбор репрезентативным для проведения множественного регрессионного анализа.

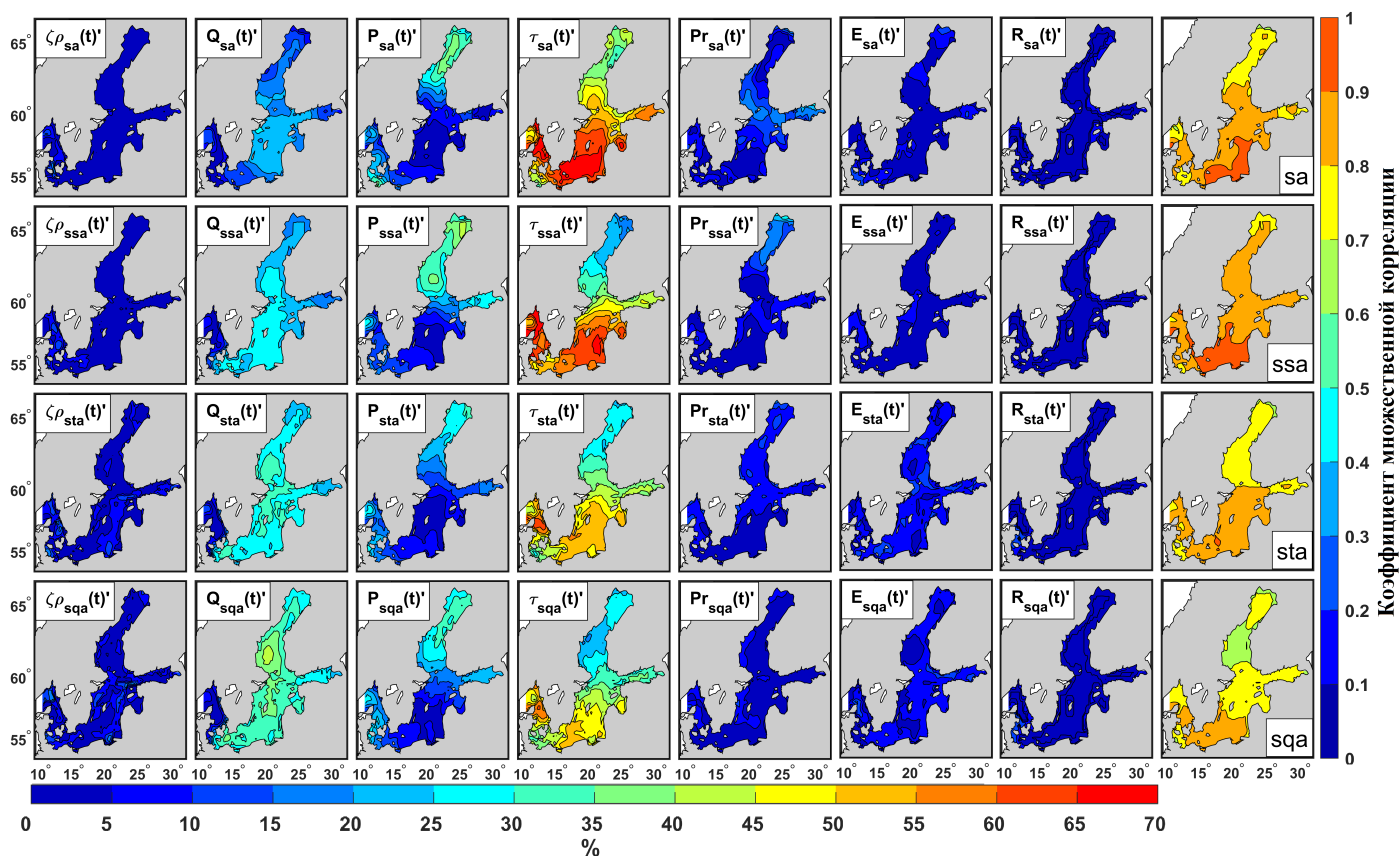
На рис. 4 представлены результаты множественного регрессионного анализа, демонстрирующие выраженные количественно вклады сезонных аномалий различных

**Таблица 2.** Средние по акватории Балтийского моря значения максимальных коэффициентов корреляции между гидрометеорологическими процессами

Гармоника 1,0 год									
Предиктор	$\zeta\rho_{sa}(t)'$	$Q_{sa}(t)'$	$P_{sa}(t)'$	$\tau u_{sa}(t)'$	$\tau v_{sa}(t)'$	$Pr_{sa}(t)'$	$E_{sa}(t)'$	$R_{sa}(t)'$	
$\zeta\rho_{sa}(t)'$	1,00								
$Q_{sa}(t)'$	0,01	1,00							
$P_{sa}(t)'$	-0,02	-0,05	1,00						
$\tau u_{sa}(t)'$	0,00	-0,26	-0,35	1,00					
$\tau v_{sa}(t)'$	-0,01	0,06	-0,21	0,33	1,00				
$Pr_{sa}(t)'$	0,00	0,22	-0,46	0,05	0,22	1,00			
$E_{sa}(t)'$	0,03	-0,08	-0,13	0,10	0,15	-0,02	1,00		
$R_{sa}(t)'$	0,24	0,01	-0,07	0,00	0,03	0,06	0,02	1,00	
Гармоника 0,5 года									
Предиктор	$\zeta\rho_{ssa}(t)'$	$Q_{ssa}(t)'$	$P_{ssa}(t)'$	$\tau u_{ssa}(t)'$	$\tau v_{ssa}(t)'$	$Pr_{ssa}(t)'$	$E_{ssa}(t)'$	$R_{ssa}(t)'$	
$\zeta\rho_{ssa}(t)'$	1,00								
$Q_{ssa}(t)'$	0,00	1,00							
$P_{ssa}(t)'$	0,04	0,09	1,00						
$\tau u_{ssa}(t)'$	-0,12	-0,35	-0,42	1,00					
$\tau v_{ssa}(t)'$	-0,02	-0,23	-0,20	0,34	1,00				
$Pr_{ssa}(t)'$	-0,05	-0,04	-0,43	0,11	0,06	1,00			
$E_{ssa}(t)'$	0,01	-0,06	-0,02	-0,01	0,18	-0,11	1,00		
$R_{ssa}(t)'$	0,09	0,04	-0,04	0,01	0,02	0,02	-0,03	1,00	
Гармоника 0,33 года									
Предиктор	$\zeta\rho_{sta}(t)'$	$Q_{sta}(t)'$	$P_{sta}(t)'$	$\tau u_{sta}(t)'$	$\tau v_{sta}(t)'$	$Pr_{sta}(t)'$	$E_{sta}(t)'$	$R_{sta}(t)'$	
$\zeta\rho_{sta}(t)'$	1,00								
$Q_{sta}(t)'$	0,04	1,00							
$P_{sta}(t)'$	0,08	0,24	1,00						
$\tau u_{sta}(t)'$	-0,11	-0,46	-0,35	1,00					
$\tau v_{sta}(t)'$	-0,05	-0,08	-0,14	0,26	1,00				
$Pr_{sta}(t)'$	0,06	-0,04	-0,45	0,02	0,15	1,00			
$E_{sta}(t)'$	-0,38	0,03	0,01	0,01	0,20	-0,18	1,00		
$R_{sta}(t)'$	-0,09	0,02	0,03	-0,02	-0,03	-0,05	0,08	1,00	
Гармоника 0,25 года									
Предиктор	$\zeta\rho_{sqa}(t)'$	$Q_{sqa}(t)'$	$P_{sqa}(t)'$	$\tau u_{sqa}(t)'$	$\tau v_{sqa}(t)'$	$Pr_{sqa}(t)'$	$E_{sqa}(t)'$	$R_{sqa}(t)'$	
$\zeta\rho_{sqa}(t)'$	1,00								
$Q_{sqa}(t)'$	-0,03	1,00							
$P_{sqa}(t)'$	0,08	0,35	1,00						
$\tau u_{sqa}(t)'$	-0,04	-0,44	-0,33	1,00					
$\tau v_{sqa}(t)'$	0,00	-0,09	-0,06	0,24	1,00				
$Pr_{sqa}(t)'$	0,07	-0,16	-0,53	0,08	0,11	1,00			
$E_{sqa}(t)'$	-0,25	0,04	-0,03	0,05	0,17	-0,22	1,00		
$R_{sqa}(t)'$	-0,05	0,04	-0,01	-0,02	-0,02	-0,05	0,10	1,00	

гидрометеорологических процессов в межгодовую изменчивость составляющих сезонных колебаний уровня Балтийского моря. Значения коэффициентов множественной корреляции для всех 4-х гармоник являются высокими и варьируют от 0,7 до 1,0 (см. рис. 4). Этот результат свидетельствует, что предложенная нами модель множественной регрессии достаточно адекватно описывает межгодовую изменчивость составляющих сезонных колебаний уровня Балтийского моря. Наибольшее воздействие на их изменения в течение последних 30 лет оказывают сезонные аномалии касательного напряжения трения ветра, вклады которых в открытой Балтике, пр. Каттегат

и Рижском заливе достигают 40–70%, уменьшаясь, в зависимости от гармоники, до 30–60% в Финском заливе, и до 15–35% в Ботническом заливе (рис. 4).



**Рис. 4.** Доли влияния (в %) различных гидрометеорологических процессов в межгодовую изменчивость аномалий составляющих сезонных колебаний уровня Балтийского моря (первые 7 столбцов). В последнем столбце представлены коэффициенты множественной корреляции.

Вторыми по значимости процессами, влияющими на межгодовую изменчивость сезонных колебаний уровня моря, являются сезонные аномалии атмосферного давления  $P(t)'$  и водообмена Балтийского и Северного морей  $Q(t)'$ . Вклады  $P(t)'$  в Ботническом заливе достигают 25–45%. Однако при движении на юг влияние  $P(t)'$  заметно ослабевает, и в открытой Балтике, а также в Рижском заливе оно составляет всего 5–15%. В Финском заливе заметное влияние  $P(t)'$ , достигающее 20–30%, отмечается только для полугодовой гармоники Ssa (рис. 4).

Рис. 4 свидетельствует, что влияние сезонных аномалий водообмена  $Q(t)'$  на межгодовую изменчивость сезонных колебаний уровня моря  $\zeta(t)'$  увеличивается при уменьшении периодов обертонов годовой волны. Если для годовой гармоники вклады  $Q(t)'$  меняются от 5 до 25%, то для четвертьгодовой гармоники Sqa они увеличиваются до 30–45% (рис. 4).

По сравнению с вкладами сезонных аномалий касательного напряжения трения ветра, атмосферного давления и водообмена через Датские проливы на  $\zeta(t)'$ , влияние других гидрометеорологических процессов на межгодовую изменчивость сезонных колебаний уровня моря заметно меньше. Вклады сезонных аномалий атмосферных осадков  $Pr(t)'$ , в основном, не превышает 5–15% и только для годовой гармонике на юге Ботнического залива и востоке Финского залива, а также для полугодовой гармонике на севере Ботнического залива, вклады  $Pr(t)'$  в изменения  $\zeta(t)'$  достигают 20–25%.

Воздействие сезонных аномалий испарения  $E(t)'$  на изменения  $\zeta(t)'$  для всех гармоник везде не превышает 5–15%.

Самые незначительные вклады в изменения  $\zeta(t)'$ , не превышающие 5–10%, оказывают сезонные аномалии стерических колебаний уровня моря  $\zeta\rho(t)'$  и речного стока  $R(t)'$ .

Наши результаты множественного регрессионного анализа заметно отличаются от оценок вклада ветра и атмосферного давления в изменения сезонных колебаний уровня Балтийского моря, полученных в работах *Johansson and Kahma* [2016] и *Barbosa and Donner* [2016] с помощью парной регрессии с использованием мареографных измерений уровня моря. В работе *Johansson and Kahma* [2016] влияние зонального ветра в межгодовую изменчивость среднемесячных значений уровня для всех прибрежных районов моря равно около 75%, в то время как наши результаты показывают снижение влияния ветра до 30–60% в Финском заливе и до 15–35% в Ботническом заливе (рис. 4). Из результатов работы [*Johansson and Kahma*, 2016] следует также, что воздействие атмосферного давления на сезонные изменения уровня моря является незначительным. Однако наши результаты показывают, что в Ботническом заливе влияние атмосферного давления достигает 45% (рис. 4). Эти различия могут быть связаны с тем, что *Johansson and Kahma* [2016] использовали для анализа среднемесячные ряды уровня, геострофического ветра и атмосферного давления, из которых, предварительно, были исключены тренды. В отличие от использованных нами среднесуточных данных, среднемесячные данные не являются эквидистантными, что приводит к ошибкам при расчете амплитуд и фаз сезонных колебаний уровня моря [*Захарчук и др.*, 2022; *Cartwright*, 1983]. Среднемесячное осреднение рядов также не исключает сигналы колебаний из низкочастотного диапазона синоптической изменчивости с периодами около 40 суток, которые хорошо выражены в нестационарных (частотно-временных) спектрах среднесуточных рядов уровня Балтики [*Захарчук*, 2008]. Кроме того, колебания уровня моря вызываются не геострофическим ветром, а касательным напряжением трения приводного ветра. Из-за трения о подстилающую поверхность приводный ветер имеет отличные от геострофического ветра направление и скорость.

Сравнение наших оценок количественного влияния касательного напряжения трения ветра на изменения годовых колебаний уровня моря с результатами работы *Barbosa and Donner* [2016], показывает хорошее согласие для Финского залива, северо-западного, а также юго-западного районов открытой Балтики, и заниженные в 1,5–2 раза, по сравнению с нашими, оценки для центральной Балтики и Каттегата. Для оценок влияния атмосферного давления, хорошее согласие с результатами работы *Barbosa and Donner* [2016] отмечается только для северной части Ботнического залива, в то время как для Финского залива и открытой Балтики у *Barbosa and Donner* [2016] отмечается существенное завышение воздействия атмосферного давления, по сравнению с нашими оценками: у нас вклады атмосферного давления в изменчивость годовых колебаний уровня моря здесь составляют 5–10%, а у них 35–52% [*Barbosa and Donner*, 2016]. Столь значительное влияние атмосферного давления на изменчивость годовых колебаний уровня моря в Финском заливе и открытой Балтике в работе *Barbosa and Donner* [2016] на наш взгляд сомнительно, так как статистический анализ изменений атмосферного давления над Балтикой показывает существенное уменьшение размаха его колебаний при движении с севера на юг моря [*Захарчук и др.*, 2017]. Несовпадение результатов *Barbosa and Donner* [2016] нашим, может быть связано с рядом причин. Во-первых, С. Барбоса и Р. Доннер анализировали, в отличие от нас, ряды среднемесячных значений уровня моря, полученные по мареографным измерениям за другой временной период (1979–2012 гг.). Во-вторых, они применили для выделения годовых колебаний уровня моря иной метод – непрерывное вейвлет-преобразование, и, в третьих, они использовали метеорологические данные других реанализов (20th century reanalysis, ERA-interim reanalysis).

#### 4. Заключение

1. Результаты скользящего гармонического анализа 133-летнего ряда (1889–2022 гг.) среднесуточных значений мареографных измерений уровня моря в Стокгольме



показывают очень значительную межгодовую изменчивость амплитуд гармоник  $S_a$ ,  $S_{sa}$ ,  $S_{st}$ ,  $S_{sq}$ . В зависимости от года они меняются от 0,5–1,0 до 25–27 сантиметров. У всех четырёх составляющих сезонных колебаний уровня моря отсутствуют статистически значимые линейные тренды, но наблюдаются долгопериодные цикличности с временными масштабами от 20–35 до 55 лет. Наибольшая величина этих цикличностей отмечается для годовой гармоник  $S_a$ , но с увеличением частоты её обертонов размах колебаний долгопериодных циклов уменьшается. В последние три десятилетия у гармоник  $S_a$ ,  $S_{sa}$ ,  $S_{st}$  наблюдается заметное уменьшение амплитуд и дисперсии колебаний. Учитывая, что в работе [Захарчук и др., 2022] была выявлена высокая корреляция (0,8–1,0) между изменчивостью сезонных колебаний уровня в Стокгольме и в других прибрежных районах Балтийского моря, можно предположить, что описанные нами особенности межгодовой изменчивости характеристик сезонных колебаний в Стокгольме свойственны и другим регионам Балтики.

2. Взаимный корреляционный анализ между аномалиями составляющих сезонных колебаний уровня моря, рассчитанных с помощью спутниковых альтиметрических данных, и такими же аномалиями различных гидрометеорологических процессов показал, что самая большая корреляция отмечается с изменениями касательного напряжения трения ветра (до 0,8–1,0), атмосферного давления (до –0,6...–0,8), а для гармоник  $S_{sa}$ ,  $S_{st}$ ,  $S_{sq}$  и с изменениями водообмена через Датские проливы (до 0,6–0,7). Корреляция с касательным напряжением трения ветра уменьшается при движении с юга на север до 0,3–0,4, в то время как с атмосферным давлением она, наоборот, уменьшается до –0,1...–0,2 при движении с севера на юг моря. Не отмечалось связи аномалий сезонных колебаний уровня моря с составляющими пресного баланса и стерическими колебаниями уровня моря.
3. Результаты множественного регрессионного анализа свидетельствуют, что наибольшее воздействие на межгодовые изменения сезонных колебаний уровня моря в течение последних 30 лет оказывают сезонные аномалии касательного напряжения трения ветра, вклады которых в открытой Балтике, пр. Каттегат и Рижском заливе достигают 40–70%, уменьшаясь, в зависимости от гармоник, до 30–60% в Финском заливе, и до 15–35% в Ботническом заливе. Вторыми по значимости процессами, влияющими на межгодовую изменчивость сезонных колебаний уровня моря, являются сезонные аномалии атмосферного давления и водообмена Балтийского и Северного морей, вклады которых, в зависимости от районов моря, варьируют от 5–15% до 25–45%. Вклады составляющих пресного баланса и изменений плотности воды в межгодовую изменчивость сезонных колебаний уровня моря незначительны, и не превышают 5–15%.

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

### Список литературы

- Белоненко Т. В. и Колдунов А. В. Стерические колебания уровня в северо-западной части Тихого океана // Вестник СПбГУ. — 2006. — Т. 7, № 3. — С. 81–88. — EDN: RTTKQN.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР: Проект «Моря СССР». Том III Балтийское море. Выпуск I Гидрометеорологические условия / под ред. Ф. С. Терзиева, В. А. Рожкова и А. И. Смирнова. — Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 1992. — 451 с. — EDN: QKFOVS.
- Гордеева С. М. и Малинин В. Н. Изменчивость морского уровня Финского залива. — Санкт-Петербург : РГГМУ, 2014. — 180 с. — EDN: VWABFU.
- Захарчук Е. А. Синоптическая изменчивость уровня и течений в морях, омывающих северо-западное и арктическое побережья России. — Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 2008. — 359 с. — EDN: QKIBRN.
- Захарчук Е. А., Литина Е. Н., Клеванцов Ю. П. и др. Нестационарность гидрометеорологических процессов Балтийского моря в условиях меняющегося климата // Труды ГОИИ. — 2017. — Т. 218. — С. 6–62. — EDN: YLMAZW.

- 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., Сухачев В. Н., Тихонова Н. А. *и др.* Стерические колебания уровня Балтийского моря // Russian Journal of Earth Sciences. — 2023. — Т. 23. — ES4014. — DOI: [10.2205/2023ES000846](https://doi.org/10.2205/2023ES000846).
- Захарчук Е. А. *и* Тихонова Н. А. О пространственно-временной структуре и механизмах формирования невских наводнений // Метеорология и гидрология. — 2011. — Т. 8. — С. 54–64. — EDN: NXUMIN.
- Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. — Санкт-Петербург : РГГМУ, 2008. — 408 с. — EDN: QKIFPF.
- Медведев И. П. Сезонные колебания уровня Балтийского моря // Метеорология и гидрология. — 2014. — Т. 12. — С. 42–54. — EDN: TACMRT.
- Рожков В. А. Теория и методы статистического оценивания вероятностных характеристикам случайных величин и функций с гидрометеорологическими примерами. Книга II. — Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 2002. — 780 с.
- Фукс В. Р. Гидродинамические основы интерпретации альтиметрических съемок морской поверхности // Колебания уровня в морях. — СПб : РГГМУ, 2003. — С. 79–91.
- Barbosa Susana M. *and* Donner Reik V. Long-term changes in the seasonality of Baltic sea level // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. — 2016. — Vol. 68, no. 1. — P. 30540. — DOI: [10.3402/tellusa.v68.30540](https://doi.org/10.3402/tellusa.v68.30540).
- Bretherton F. P., Davis R. E. *and* Fandry C. B. A technique for objective analysis and design of oceanographic experiments applied to MODE-73 // Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts. — 1976. — Vol. 23, no. 7. — P. 559–582. — DOI: [10.1016/0011-7471\(76\)90001-2](https://doi.org/10.1016/0011-7471(76)90001-2).
- Cartwright D. E. On the smoothing of climatological time series, with application to sea-level at Newlyn // Geophysical Journal International. — 1983. — Vol. 75, no. 3. — P. 639–658. — DOI: [10.1111/j.1365-246X.1983.tb05003.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1983.tb05003.x).
- Cheng Y., Xu Q. *and* Li X. Spatio-Temporal Variability of Annual Sea Level Cycle in the Baltic Sea // Remote Sensing. — 2018. — Vol. 10, no. 4. — P. 528–552. — DOI: [10.3390/rs10040528](https://doi.org/10.3390/rs10040528).
- de Boor C. A Practical Guide to Splines. — Springer-Verlag, 1978. — 325 p.
- Ekman M. A common pattern for interannual and periodical sea level variations in the Baltic Sea and adjacent waters // Geophysica. — 1996. — Vol. 32, no. 3. — P. 261–272.
- Ekman M. The Changing Level of the Baltic Sea during 300 Years: A Clue to Understanding the Earth. — Summer Institute for Historical Geophysics, 2009.
- Ekman M. *and* Stigebrandt A. Secular change of the seasonal variation in sea level and of the pole tide in the Baltic Sea // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 1990. — Vol. 95, no. C4. — P. 5379–5383. — DOI: [10.1029/JC095iC04p05379](https://doi.org/10.1029/JC095iC04p05379).
- Gill A. E. *and* 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: Oceans. — 1994. — Vol. 99, no. C6. — P. 12767–12771. — DOI: [10.1029/94jc00847](https://doi.org/10.1029/94jc00847).
- Gustafsson B. G. *and* Andersson H. C. Modeling the exchange of the Baltic Sea from the meridional atmospheric pressure difference across the North Sea // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2001. — Vol. 106, no. C9. — P. 19731–19744. — DOI: [10.1029/2000JC000593](https://doi.org/10.1029/2000JC000593).
- 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).
- Hünicke B. *and* Zorita E. Trends in the amplitude of Baltic Sea level annual cycle // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. — 2008. — Vol. 60, no. 1. — P. 154–164. — DOI: [10.1111/j.1600-0870.2007.00277.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2007.00277.x).
- Jackett D. R. *and* 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).
- Jakobsen F., Hansen I. S., Ottesen Hansen N.-E., *et al.* Flow resistance in the Great Belt, the biggest strait between the North Sea and the Baltic Sea // Estuarine, Coastal and Shelf Science. — 2010. — Vol. 87, no. 2. — P. 325–332. — DOI: [10.1016/j.ecss.2010.01.014](https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.01.014).
- Johansson M. M. *and* Kahma K. K. On the statistical relationship between the geostrophic wind and sea level variations in the Baltic Sea // Boreal Environment Research. — 2016. — Vol. 21. — P. 25–43.

- Kowalczyk K., Pajak K., Wieczorek B., *et al.* An Analysis of Vertical Crustal Movements along the European Coast from Satellite Altimetry, Tide Gauge, GNSS and Radar Interferometry // *Remote Sensing*. — 2021. — Vol. 13, no. 11. — P. 2173. — DOI: [10.3390/rs13112173](https://doi.org/10.3390/rs13112173).
- Labuz T. A. *and* Kowalewska-Kalkowska H. Coastal erosion caused by the heavy storm surge of November 2004 in the southern Baltic Sea // *Climate Research*. — 2011. — Vol. 48, no. 1. — P. 93–101. — DOI: [10.3354/cr00927](https://doi.org/10.3354/cr00927).
- Le Traon P. Y., Nadal F. *and* Ducet N. An Improved Mapping Method of Multisatellite Altimeter Data // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. — 1998. — Vol. 15, no. 2. — P. 522–534. — DOI: [10.1175/1520-0426\(1998\)015<0522:AIMMOM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1998)015<0522:AIMMOM>2.0.CO;2).
- Leppäranta M. *and* Myrberg K. *Physical Oceanography of the Baltic Sea*. — Springer Berlin Heidelberg, 2009. — DOI: [10.1007/978-3-540-79703-6](https://doi.org/10.1007/978-3-540-79703-6).
- Lisitzin E. *Sea-Level Changes*. — Elsevier Science & Technology Books, 1974.
- Männikus R., Soomere T. *and* Viška M. Variations in the mean, seasonal and extreme water level on the Latvian coast, the eastern Baltic Sea, during 1961–2018 // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. — 2020. — Vol. 245. — P. 106827. — DOI: [10.1016/j.ecss.2020.106827](https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106827).
- Mohrholz V. Major Baltic Inflow Statistics - Revised // *Frontiers in Marine Science*. — 2018. — Vol. 5. — DOI: [10.3389/fmars.2018.00384](https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00384).
- Nerger L., Hiller W. *and* 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).
- Pajak K. *and* Kowalczyk K. A comparison of seasonal variations of sea level in the southern Baltic Sea from altimetry and tide gauge data // *Advances in Space Research*. — 2019. — Vol. 63, no. 5. — P. 1768–1780. — DOI: [10.1016/j.asr.2018.11.022](https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.11.022).
- 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).
- Plag H.-P. *and* 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).
- Pujol M.-I., Faugère Y., Taburet G., *et al.* DUACS DT2014: the new multi-mission altimeter data set reprocessed over 20 years // *Ocean Science*. — 2016. — Vol. 12, no. 5. — P. 1067–1090. — DOI: [10.5194/os-12-1067-2016](https://doi.org/10.5194/os-12-1067-2016).
- Samuelsson M. *and* Stigebrandt A. Main characteristics of the long-term sea level variability in the Baltic sea // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. — 1996. — Vol. 48, no. 5. — DOI: [10.3402/TELLUSA.V48I5.12165](https://doi.org/10.3402/TELLUSA.V48I5.12165).
- Stramska M. *and* Chudziak N. Recent multiyear trends in the Baltic Sea level // *Oceanologia*. — 2013. — Vol. 55, no. 2. — P. 319–337. — DOI: [10.5697/oc.55-2.319](https://doi.org/10.5697/oc.55-2.319).
- Stramska M., Kowalewska-Kalkowska H. *and* Świrgoń M. Seasonal variability in the Baltic Sea level // *Oceanologia*. — 2013. — Vol. 55, no. 4. — P. 787–807. — DOI: [10.5697/oc.55-4.787](https://doi.org/10.5697/oc.55-4.787).
- Voinov G. N. *Tides and Tidal streams // Polar Seas Oceanography. An integrated case study of the Kara Sea*. — Springer, 2002. — P. 61–77.
- 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).
- Zakharchuk E. A., Tikhonova N., Zakharova E., *et al.* Spatiotemporal structure of Baltic free sea level oscillations in barotropic and baroclinic conditions from hydrodynamic modelling // *Ocean Science*. — 2021. — Vol. 17, no. 2. — P. 543–559. — DOI: [10.5194/os-17-543-2021](https://doi.org/10.5194/os-17-543-2021).

# COMPARATIVE INFLUENCE OF HYDROMETEOROLOGICAL PROCESSES ON THE INTERANNUAL VARIABILITY OF SEASONAL FLUCTUATIONS OF THE BALTIC SEA LEVEL

E. A. Zakharchuk<sup>1</sup>, M. V. Vinogradov<sup>1,2</sup>, V. N. Sukhachev<sup>\*,1,2</sup>, and N. A. Tikhonova<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>St. Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup>N. N. Zubov's State Oceanographic Institute, Roshydromet., Moscow, Russia

\*\*Correspondence to: Vladimir Sukhachev, Syhachev@mail.ru .

With the help of long-term average daily tide gauge observations of sea level, satellite altimetry measurements and data from reanalyses of meteorological and hydrophysical fields, the features and physical mechanisms of interannual variability of seasonal fluctuations in the level of the Baltic Sea are investigated. It is shown that for the period 1889–2022 in Stockholm, in interannual changes in the amplitudes of harmonics  $S_a$ ,  $S_{sa}$ ,  $S_{ta}$ ,  $S_{qa}$ , there are statistically insignificant positive linear trends, against the background of which long-term cycles with time scales approximately from 20–35 to 55 years and very significant changes in amplitudes from 0.5–1.0 to 25–27 centimeters are observed. In recent decades, the harmonics  $S_a$ ,  $S_{sa}$ , and  $S_{ta}$  have seen a noticeable decrease in the amplitudes and dispersion of oscillations. The results of mutual correlation and multiple regression analyses of anomalies of seasonal fluctuations in sea level and various hydrometeorological processes indicate that the largest contribution to the interannual variability of seasonal fluctuations in sea level is made by changes in the tangential friction of the wind. The second most important processes are changes in atmospheric pressure over the sea and water exchange between the Baltic and North Seas. Changes in freshwater balance and density have the smallest impact on interannual variability in seasonal sea-level patterns.

**Keywords:** sea level, satellite altimeter measurements, reanalysis data, seasonal fluctuations, moving harmonic analysis, interannual variability, trends, wind stress, atmospheric pressure, steric sea level oscillations, fresh balance, water exchange, multiple regression analysis.

Received: 17 January 2024

Accepted: 12 July 2024

Published: 17 December 2024



© 2024. The Authors.

**Citation:** Zakharchuk, E. A., M. V. Vinogradov, V. N. Sukhachev, and N. A. Tikhonova (2024), Comparative Influence of Hydrometeorological Processes on the Interannual Variability of Seasonal Fluctuations of the Baltic Sea Level, *Russian Journal of Earth Sciences*, 24, ES4013, <https://doi.org/10.2205/2024ES000922>, EDN: RNZFKL

## References

- Barbosa Susana M. *and* Donner Reik V. Long-term changes in the seasonality of Baltic sea level // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. — 2016. — Vol. 68, no. 1. — P. 30540. — DOI: [10.3402/tellusa.v68.30540](https://doi.org/10.3402/tellusa.v68.30540).
- Belonenko T. V. *and* Koldunov A. V. Steric oscillations of the sea level in the north-western Pacific // *Vestnik of St. Petersburg State University*. — 2006. — Vol. 7, no. 3. — P. 81–88. — EDN: RTTKQN.
- Boor C. de. *A Practical Guide to Splines*. — Springer-Verlag, 1978. — P. 325.
- Bretherton F. P., Davis R. E. *and* Fandry C. B. A technique for objective analysis and design of oceanographic experiments applied to MODE-73 // *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. — 1976. — Vol. 23, no. 7. — P. 559–582. — DOI: [10.1016/0011-7471\(76\)90001-2](https://doi.org/10.1016/0011-7471(76)90001-2).
- Cartwright D. E. On the smoothing of climatological time series, with application to sea-level at Newlyn // *Geophysical Journal International*. — 1983. — Vol. 75, no. 3. — P. 639–658. — DOI: [10.1111/j.1365-246X.1983.tb05003.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1983.tb05003.x).
- Cheng Y., Xu Q. *and* Li X. Spatio-Temporal Variability of Annual Sea Level Cycle in the Baltic Sea // *Remote Sensing*. — 2018. — Vol. 10, no. 4. — P. 528–552. — DOI: [10.3390/rs10040528](https://doi.org/10.3390/rs10040528).
- Ekman M. A common pattern for interannual and periodical sea level variations in the Baltic Sea and adjacent waters // *Geophysica*. — 1996. — Vol. 32, no. 3. — P. 261–272.

- Ekman M. The Changing Level of the Baltic Sea during 300 Years: A Clue to Understanding the Earth. — Summer Institute for Historical Geophysics, 2009.
- Ekman M. *and* Stigebrandt A. Secular change of the seasonal variation in sea level and of the pole tide in the Baltic Sea // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1990. — Vol. 95, no. C4. — P. 5379–5383. — DOI: [10.1029/JC095iC04p05379](https://doi.org/10.1029/JC095iC04p05379).
- Fuchs V. R. Hydrodynamic principles of interpretation of altimetry surveys of the sea surface // *Sea level variations*. — Saint Petersburg : RSHU, 2003. — P. 79–91.
- Gill A. E. *and* 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. *and* Malinin V. N. Gulf of Finland sea level Variability. — Saint Petersburg : RSHU, 2014. — P. 180. — EDN: VWABFU.
- Greatbatch R. J. A note on the representation of steric sea level in models that conserve volume rather than mass // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1994. — Vol. 99, no. C6. — P. 12767–12771. — DOI: [10.1029/94jc00847](https://doi.org/10.1029/94jc00847).
- Gustafsson B. G. *and* Andersson H. C. Modeling the exchange of the Baltic Sea from the meridional atmospheric pressure difference across the North Sea // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2001. — Vol. 106, no. C9. — P. 19731–19744. — DOI: [10.1029/2000JC000593](https://doi.org/10.1029/2000JC000593).
- 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).
- Hünicke B. *and* Zorita E. Trends in the amplitude of Baltic Sea level annual cycle // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. — 2008. — Vol. 60, no. 1. — P. 154–164. — DOI: [10.1111/j.1600-0870.2007.00277.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2007.00277.x).
- Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR: Project "Seas of the USSR". Volume III Baltic Sea. Issue I Hydrometeorological conditions / ed. by F. S. Terzieva, V. A. Rozhkova *and* A. I. Smirnova. — Saint Petersburg : Gidrometeoizdat, 1992. — P. 451. — EDN: QKFOVS.
- Jackett D. R. *and* 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).
- Jakobsen F., Hansen I. S., Ottesen Hansen N.-E., *et al.* Flow resistance in the Great Belt, the biggest strait between the North Sea and the Baltic Sea // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. — 2010. — Vol. 87, no. 2. — P. 325–332. — DOI: [10.1016/j.ecss.2010.01.014](https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.01.014).
- Johansson M. M. *and* Kahma K. K. On the statistical relationship between the geostrophic wind and sea level variations in the Baltic Sea // *Boreal Environment Research*. — 2016. — Vol. 21. — P. 25–43.
- Kowalczyk K., Pajak K., Wiczorek B., *et al.* An Analysis of Vertical Crustal Movements along the European Coast from Satellite Altimetry, Tide Gauge, GNSS and Radar Interferometry // *Remote Sensing*. — 2021. — Vol. 13, no. 11. — P. 2173. — DOI: [10.3390/rs13112173](https://doi.org/10.3390/rs13112173).
- Labuz T. A. *and* Kowalewska-Kalkowska H. Coastal erosion caused by the heavy storm surge of November 2004 in the southern Baltic Sea // *Climate Research*. — 2011. — Vol. 48, no. 1. — P. 93–101. — DOI: [10.3354/cr00927](https://doi.org/10.3354/cr00927).
- Le Traon P. Y., Nadal F. *and* Ducet N. An Improved Mapping Method of Multisatellite Altimeter Data // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. — 1998. — Vol. 15, no. 2. — P. 522–534. — DOI: [10.1175/1520-0426\(1998\)015<0522:AIMMOM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1998)015<0522:AIMMOM>2.0.CO;2).
- Leppäranta M. *and* Myrberg K. *Physical Oceanography of the Baltic Sea*. — Springer Berlin Heidelberg, 2009. — DOI: [10.1007/978-3-540-79703-6](https://doi.org/10.1007/978-3-540-79703-6).
- Lisitzin E. *Sea-Level Changes*. — Elsevier Science & Technology Books, 1974.
- Malinin V. N. *Statistical methods of hydrometeorological information analysis*. — Saint Petersburg : RSHU, 2008. — P. 408. — EDN: QKIFPF.
- Männikus R., Soomere T. *and* Viška M. Variations in the mean, seasonal and extreme water level on the Latvian coast, the eastern Baltic Sea, during 1961-2018 // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. — 2020. — Vol. 245. — P. 106827. — DOI: [10.1016/j.ecss.2020.106827](https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106827).
- Medvedev I. P. Seasonal fluctuations of the Baltic Sea level // *Russian Meteorology and Hydrology*. — 2014. — Vol. 39, no. 12. — P. 814–822. — DOI: [10.3103/S106837391412005X](https://doi.org/10.3103/S106837391412005X).
- Mohrholz V. Major Baltic Inflow Statistics - Revised // *Frontiers in Marine Science*. — 2018. — Vol. 5. — DOI: [10.3389/fmars.2018.00384](https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00384).
- Nerger L., Hiller W. *and* 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).

- Pajak K. and Kowalczyk K. A comparison of seasonal variations of sea level in the southern Baltic Sea from altimetry and tide gauge data // *Advances in Space Research*. — 2019. — Vol. 63, no. 5. — P. 1768–1780. — DOI: [10.1016/j.asr.2018.11.022](https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.11.022).
- 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).
- Plag H.-P. and 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).
- Pujol M.-I., Faugère Y., Taburet G., *et al.* DUACS DT2014: the new multi-mission altimeter data set reprocessed over 20 years // *Ocean Science*. — 2016. — Vol. 12, no. 5. — P. 1067–1090. — DOI: [10.5194/os-12-1067-2016](https://doi.org/10.5194/os-12-1067-2016).
- Rozhkov V. A. Theory and methods of statistical estimation of probability characteristics of random variables and functions with hydrometeorological examples. Book II. — Saint Petersburg : Gidrometeoizdat, 2002. — P. 780.
- Samuelsson M. and Stigebrandt A. Main characteristics of the long-term sea level variability in the Baltic sea // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. — 1996. — Vol. 48, no. 5. — P. 672. — DOI: [10.3402/TELLUSA.V48I5.12165](https://doi.org/10.3402/TELLUSA.V48I5.12165).
- Stramska M. and Chudziak N. Recent multiyear trends in the Baltic Sea level // *Oceanologia*. — 2013. — Vol. 55, no. 2. — P. 319–337. — DOI: [10.5697/oc.55-2.319](https://doi.org/10.5697/oc.55-2.319).
- Stramska M., Kowalewska-Kalkowska H. and Świrgoń M. Seasonal variability in the Baltic Sea level // *Oceanologia*. — 2013. — Vol. 55, no. 4. — P. 787–807. — DOI: [10.5697/oc.55-4.787](https://doi.org/10.5697/oc.55-4.787).
- Voinov G. N. Tides and Tidal streams // *Polar Seas Oceanography. An integrated case study of the Kara Sea*. — Springer, 2002. — P. 61–77.
- 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. Synoptic variability of sea level and currents in the seas washing the northwestern and arctic coasts of Russia. — Saint Petersburg : Gidrometeoizdat, 2008. — P. 359. — EDN: QKIBRH.
- Zakharchuk E. A., Litina E. N., Klevantsov Yu. P., *et al.* Nonstationarity of the hydrometeorological processes in the Baltic sea at climate changing conditions // *Proceedings of SOI*. — 2017. — Vol. 218. — P. 6–62. — EDN: YLMAZW.
- 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. 29, no. 6. — P. 636–658. — DOI: [10.22449/1573-160X-2022-6-636-658](https://doi.org/10.22449/1573-160X-2022-6-636-658).
- Zakharchuk E. A., Sukhachev V. N., Tikhonova N. A., *et al.* Steric Oscillations of the Baltic Sea Level // *Russian Journal of Earth Sciences*. — 2023. — Vol. 23. — ES4014. — DOI: [10.2205/2023ES000846](https://doi.org/10.2205/2023ES000846).
- Zakharchuk E. A., Tikhonova N., Zakharova E., *et al.* Spatiotemporal structure of Baltic free sea level oscillations in barotropic and baroclinic conditions from hydrodynamic modelling // *Ocean Science*. — 2021. — Vol. 17, no. 2. — P. 543–559. — DOI: [10.5194/os-17-543-2021](https://doi.org/10.5194/os-17-543-2021).
- Zakharchuk E. A. and Tikhonova N. A. On the spatiotemporal structure and mechanisms of the Neva River flood formation // *Russian Meteorology and Hydrology*. — 2011. — Vol. 36, no. 8. — P. 534–541. — DOI: [10.3103/S106837391108005X](https://doi.org/10.3103/S106837391108005X).