

Влияние касательного трения ветра, атмосферного давления, плотности воды и составляющих водного баланса на межгодовую изменчивость сезонных колебаний уровня балтийского моря

Е. А. Захарчук^{1,2} (0000-0001-6079-5739), В. Н. Сухачев^{*,1,3} (0000-0003-4821-4342), Н. А. Тихонова^{1,3} (0000-0002-4546-4920), М. В. Виноградов^{1,3} (0009-0003-3744-8204)

¹Санкт-Петербургский Государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

²Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Мурманск, Россия

³Государственный океанографический институт имени Н.Н.Зубова, г. Москва, Россия

* **Контакт:** Сухачев Владимир Николаевич, Syhachev@mail.ru

Аннотация: 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} отмечаются статистически не значимые положительные линейные тренды, на фоне которых наблюдаются долгопериодные циклы с временными масштабами, приблизительно, 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 трение ветра, атмосферное давление, стерические колебания, пресный баланс, водообмен, множественный регрессионный анализ

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 [Männikus et al., 2020; Гордеева & Малинин, 2014], водообмена с Северным морем [Ekman, 2009; Gustafsson &

Andersson, 2001; Samuelsson & Stigebrandt, 1996] и оказывают заметное воздействие на берега и прибрежную инфраструктуру Балтики [Łabuz & 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 свидетельствуют, что в стратифицированном море генерируются быстро затухающие 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 [E. Zakharchuk et al., 2021].

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

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 [Gill & Niller, 1973; Leppäranta & Myrberg, 2009; Фукс, 2003].

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 [Cheng et al., 2018; Männikus et al., 2020; E. A. Zakharchuk et al., 2022; Захарчук et al., 2022; Терзиев et al., 1992].

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 [Lisitzina, 1974; E. A. Zakharchuk et al., 2022; Терзиев et al., 1992].

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 [Е. А. Zakharchuk et al., 2022; Терзиев et al., 1992].

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 [Е. А. Zakharchuk et al., 2022; Терзиев et al., 1992].

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 [Lisitzina, 1974]. Позднее была подтверждена важность водообмена с Северным морем для сезонных колебаний уровня моря [Ekman, 2009; Gustafsson & Andersson, 2001; Samuelsson & Stigebrandt, 1996], в то время как корреляции сезонных колебаний уровня Балтики с речным стоком выявлено не было [Stramska et al., 2013]. Johansson and Kahma [Johansson & Kahma, 2016] обнаружили хорошую связь между рядами среднемесячных значений зональной компоненты 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 [Ekman, 1996; Захарчук et al., 2022; Медведев, 2014] 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 [Ekman, 1996; Захарчук et al., 2022; Медведев, 2014]. 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 [Ekman, 1996; Захарчук et al., 2022; Медведев, 2014]. Средние амплитуды треть годовых (St_a) и четверть годовых (Sq_a) 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 et al., 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 [Ekman & Stigebrandt, 1990; Hünicke & Zorita, 2008; Plag & Tsimplis, 1999; Захарчук et al., 2022; Медведев, 2014]. Результаты Ekman and Stigebrandt [Ekman & 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 & Stigebrandt, 1990]. Однако, исследование межгодовой изменчивости гармоник S_a в Стокгольме за более поздний период 1889 – 2020 гг. показало уже наличие не значимого положительного линейного тренда, на фоне которого наблюдались цикличности в изменениях амплитуды гармоник 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 гармоник S_a в этот период в разных районах моря отмечались значимые отрицательные тренды, в то время как в изменениях гармоник S_{sa} , St_a , Sq_a трендов не наблюдалось [Захарчук et al., 2022]. Межгодовые изменения гармоник S_a авторы связывали с Североатлантическим колебанием и общей тенденцией потепления климата [Plag & Tsimplis, 1999; Медведев, 2014], с вековыми изменениями атмосферных осадков в регионе Балтийского моря [Hünicke & Zorita, 2008], а также с межгодовыми изменениями ветра и атмосферного давления [Захарчук et al., 2022].

Barbosa and Donner 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 & Donner, 2016]. Они не оценивали линейный тренд в изменении амплитуды годовой компоненты сезонных колебаний уровня, который выделялся другими авторами [Ekman & Stigebrandt, 1990; Hünicke & Zorita, 2008; Plag & Tsimplis, 1999; Захарчук et al., 2022], но обнаружили чередующиеся периоды высоких и низких амплитуд в изменениях годового цикла сезонных колебаний уровня

[Barbosa & Donner, 2016]. В работе [E. A. Zakharchuk et al., 2022] эти особенности межгодовых изменений годовых колебаний связывались с их амплитудной модуляцией, однако причины этой модуляции не исследовались.

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; Rajak & Kowalczyk, 2019; Stramska & Chudziak, 2013; E. A. Zakharchuk et al., 2022].

В работе Zakharchuk et al [E. A. 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 [E. A. Zakharchuk et al., 2022].

Cheng et al [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. [E. A. 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 S_a , S_{sa} , S_{ta} , S_{qa} , полученных с помощью скользящего гармонического анализа, у всех гидрометеорологических процессов. По сравнению с другими работами в статье Zakharchuk et al. [E. A. 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 [E. A. 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; E. A. 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. Однако колебания уровня вызываются не самим ветром, а его касательным напряжением, которое имеет квадратичную зависимость от ветра. Поэтому, физически, более правильно будет оценивать корреляцию между колебаниями уровня и касательным трением ветра.

Плохо изученным остаётся вопрос о сравнительных количественных вкладах различных метеорологических и гидрологических процессов в 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 трения ветра, атмосферного давления, плотности воды и компонент водного баланса на межгодовую изменчивость составляющих сезонных колебаний уровня Балтийского моря в период 1993 – 2022 гг.

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), Хорнбаек (1993-2021), полученные с ресурса E.U. Copernicus Marine Service Information (<http://marine.copernicus.eu>), и Кронштадт за период с 1971 по 2015 гг. (см. рис. 1а), предоставленные Северо-Западным Управлением Росгидромета (<http://www.meteo.nw.ru>).

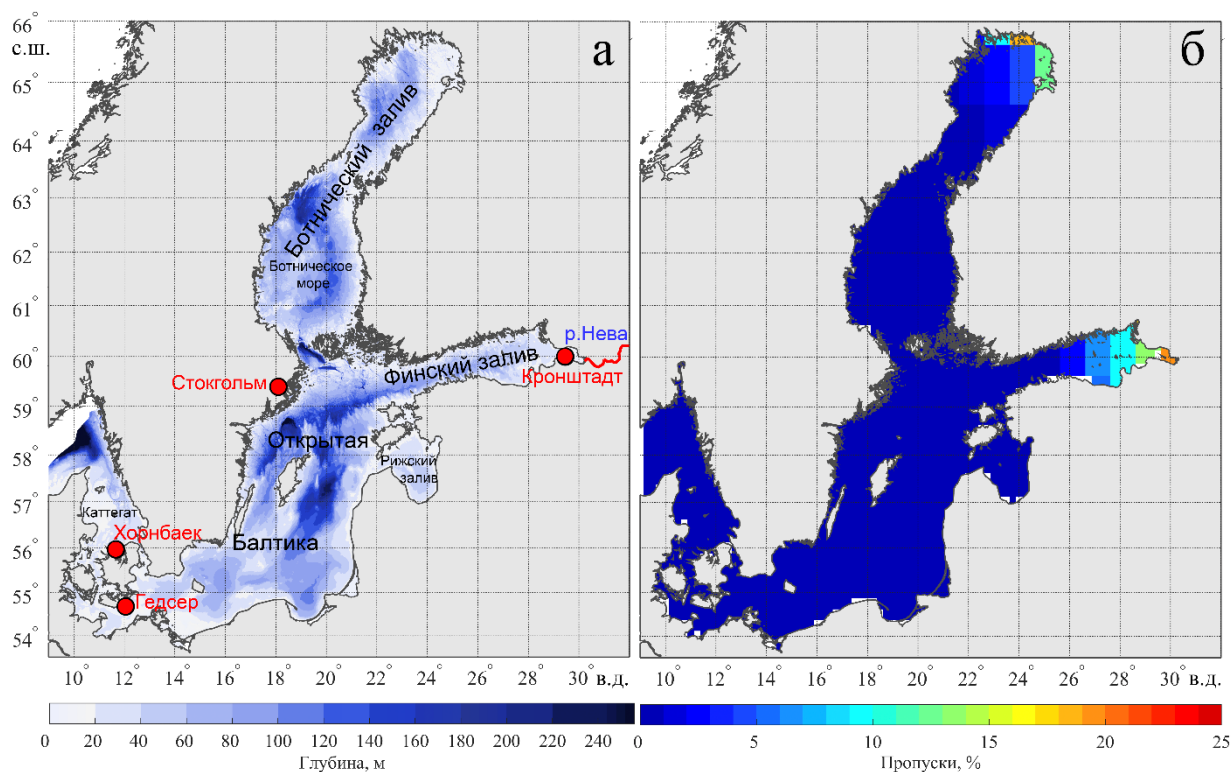


Рис. 1. Батиметрия Балтийского моря и местоположение мареографных станций (красные кружки (а). Количество пропусков (в процентах от общего количества членов ряда) в узлах сеточной области альтиметрических данных (б)

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 <http://marine.copernicus.eu>), 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 [Ekman, 1996; Ekman & Stigebrandt, 1990; Hünicke & Zorita, 2008; Plag & Tsimplis, 1999; Медведев, 2014]. Однако в работе [Захарчук et al., 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. 1б).

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 x 0,25 градусов за период 1993-2022 гг. (DOI: 10.24381/cds.adbb2d47).

5. Данные регионального реанализа гидрофизических полей Baltic Sea Physics Reanalysis (BAL TICSEA_MULT IYEAR_PHY_003_011) о температуре, солёности Балтики на разных горизонтах с пространственным разрешением 2 × 2 км и 56 слоями по вертикали (толщина слоев меняется в зависимости от глубины от 3 до 22 м) за период 01.01.1993-31.12.2022 (<https://doi.org/10.48670/moi-00013>). Эти данные получены с помощью численной реализации гидродинамической модели NEMO 3,6 (Nucleus for European Modeling of the Ocean) [Hordoир 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>].

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 $\overline{\zeta}(t)$ 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, третьгодовая (S_{ta}) – 121,8 сут и четвертьгодовая (S_{qa}) – 91,3 сут.

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

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 & Tsimplis, 1999; E. A. 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 скольжение проводилось с перекрытием через каждые полгода; для треть-годовой гармоники S_{ta} период квазистационарности принимался равным 8 месяцев, и скольжение проводилось через каждые 4 месяца; для четверть-годовой гармоники S_{qa} период квазистационарности принимался равным 6 месяцев, и скольжение 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 [R. & de Boor, 1980] 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 [Захарчук 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 трения ветра ($\vec{\tau}_w$), атмосферного давления (P_a), стерических колебаний уровня моря (ζ_ρ), атмосферных осадков (Pr), речного стока (R), испарения (E), водообмена между Балтийским и Северным морями через Датские проливы (Q).

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

$$\vec{\tau}_w = c\rho_0\vec{W}|\vec{W}| \quad (2)$$

где c – безразмерный коэффициент, ρ_0 – плотность воздуха, \vec{W} – вектор скорости ветра.

Стерические колебания уровня моря (ζ_ρ) рассчитывались по данным о температуре (T) и солёности (S) воды из регионального реанализа BALTICSEA_MULTIYEAR_PHY_003_011 (<https://doi.org/10.48670/moi-00013>). Несмотря на то, что для этого реанализа используется численная гидродинамическая модель NEMO 3,6, основанная на приближении Буссинеска, которое не позволяет описывать изменение объёма 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 et al., 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 et al., 2023].

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

$$\frac{\Delta\zeta_{\rho}}{\Delta t} = - \sum_{i=1}^n \frac{1}{\rho_0} \frac{\Delta\rho_i}{\Delta t} \Delta z_i \quad (3)$$

где $\frac{\Delta\zeta_{\rho}}{\Delta t}$ - стерические изменения уровня моря за отрезок времени Δt , ρ_0 – средняя плотность воды, $\frac{\Delta\rho_i}{\Delta t}$ – изменение во времени плотности воды в каждом i -м слое ($i= 1,2,3,\dots,n$), Δz_i – толщина каждого слоя. Плотность воды (ρ) рассчитывалась по уравнению состояния, описанному в работе [Jackett & McDougall, 1995].

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

$$Q = \sqrt{\frac{\Delta\zeta_s - B}{K_f}} \quad (4)$$

где K_f – эмпирический коэффициент трения. Согласно [Jakobsen et al., 2010] для проливов он равен от $1,6 \cdot 10^{-10} \text{ с}^2\text{м}^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-11} \text{ с}^2\text{м}^{-5}$; B – коррекционная добавка на разницу уровней моря за счет градиента плотности вдоль пролива (бароклинная 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 с 1993 по 2021 год. 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 [E. A. 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 $\overline{\zeta(t)}$, рассчитанные на основе стационарного гармонического анализа (1):

$$\zeta(t)' = \zeta(t) - \overline{\zeta(t)} \quad (5)$$

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 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:

$$r_{\zeta,\eta}(\tau) = \frac{K_{\zeta,\eta}(\tau)}{\sqrt{K_{\zeta}(0)K_{\eta}(0)}} \quad (6)$$

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, τ – временной сдвиг.

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

$$D_{\eta\mathbf{V}} = \begin{vmatrix} r_{\eta\eta} & r_{\eta u} & r_{\eta v} \\ r_{u\eta} & r_{uu} & r_{uv} \\ r_{v\eta} & r_{vu} & r_{vv} \end{vmatrix}, D_{uv} = \begin{vmatrix} r_{uu} & r_{uv} \\ r_{vu} & r_{vv} \end{vmatrix} \quad (7)$$

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

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

$$M_{\eta\mathbf{V}} = \sqrt{1 - \frac{D_{\eta\mathbf{V}}}{D_{uv}}} \quad (8)$$

Для оценки сравнительных количественных вкладов 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:

$$\zeta_{sa}(t)' = a_0 + a_1[\tau u_{sa}(t)'] + a_2[\tau v_{sa}(t)'] + a_3[P_{sa}(t)'] + a_4[\zeta\rho_{sa}(t)'] + a_5[Pr_{sa}(t)'] + a_6[R_{sa}(t)'] + a_7[Q_{sa}(t)'] + a_8[E_{sa}(t)'] \quad (9)$$

$$\zeta_{ssa}(t)' = a_0 + a_1[\tau u_{ssa}(t)'] + a_2[\tau v_{ssa}(t)'] + a_3[P_{ssa}(t)'] + a_4[\zeta\rho_{ssa}(t)'] + a_5[Pr_{ssa}(t)'] + a_6[R_{ssa}(t)'] + a_7[Q_{ssa}(t)'] + a_8[E_{ssa}(t)'] \quad (10)$$

$$\zeta_{sta}(t)' = a_0 + a_1[\tau u_{sta}(t)'] + a_2[\tau v_{sta}(t)'] + a_3[P_{sta}(t)'] + a_4[\zeta \rho_{sta}(t)'] + a_5[Pr_{sta}(t)'] + a_6[R_{sta}(t)'] + a_7[Q_{sta}(t)'] + a_8[E_{sta}(t)'] \quad (11)$$

$$\zeta_{sqa}(t)' = a_0 + a_1[\tau u_{sqa}(t)'] + a_2[\tau v_{sqa}(t)'] + a_3[P_{sqa}(t)'] + a_4[\zeta \rho_{sqa}(t)'] + a_5[Pr_{sqa}(t)'] + a_6[R_{sqa}(t)'] + a_7[Q_{sqa}(t)'] + a_8[E_{sqa}(t)'] \quad (12)$$

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 трения ветра $\vec{\tau}_w(t)'$, остальные члены уравнений описаны в тексте выше.

Результаты и их интерпретация

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, приблизительно, от 20-35 до 55 лет. Наибольшая величина этих цикличностей отмечается для годовой гармоники Sa, с увеличением частоты её обертонов размах колебаний долгопериодных циклов уменьшается (рис. 2). Для гармоники Sa 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 Е.А. Захарчука и др. [Захарчук et al., 2022] было показано, что резкое уменьшение амплитуд гармоники Sa в последние десятилетия обусловлено снижением интенсивности годовых колебаний ветра, и, в меньшей степени, атмосферного давления [Захарчук et al., 2022].

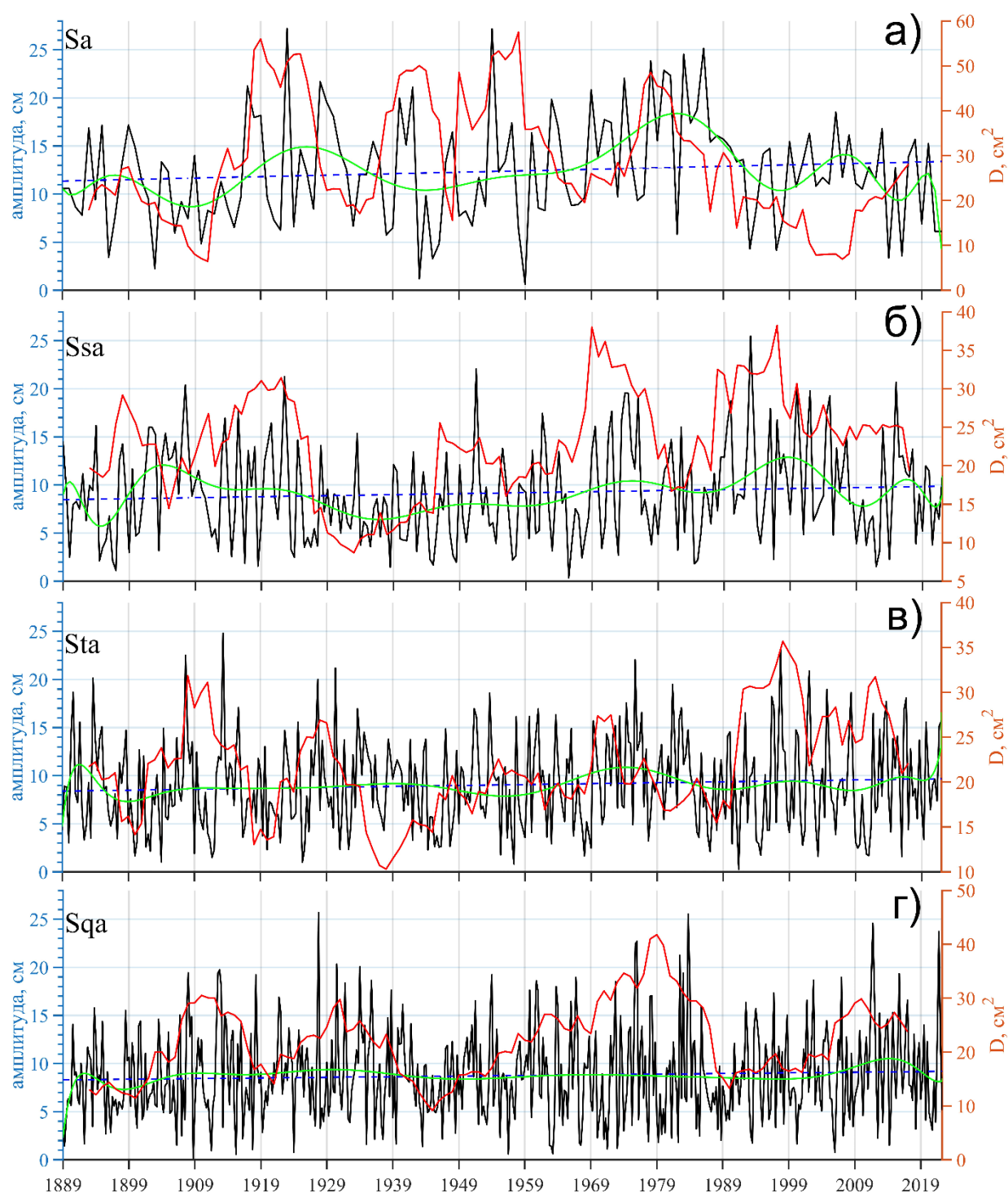


Рис. 2. Межгодовые изменения амплитуды годовой (Sa), полугодовой (Ssa), третьгодовой (Sta), и четвертьгодовой (Sqa) компонент сезонных колебаний уровня моря в Стокгольме за период с 1889 – 2022 гг. (черная линия). Линейный тренд обозначен прямой синей пунктирной линией; зелёная линия - полином 15 степени,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

Межгодовая изменчивость полугодовой гармоники Ssa 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).

Результаты взаимного корреляционного анализа между аномалиями составляющих сезонных колебаний уровня моря 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 трения ветра $\vec{\tau}_w(t)'$. Однако при движении с юга на север моря связь между этими процессами снижается, и для аномалий гармоник S_{sa} , S_{ta} , S_{qa} 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 [Е. А. 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 [Е. А. Zakharchuk et al., 2022], выявляются и некоторые региональные различия, например, в нашем случае для всех гармоник увеличивается корреляция в проливе Каттегат, а для гармоники S_{qa} и на юге открытой Балтики.

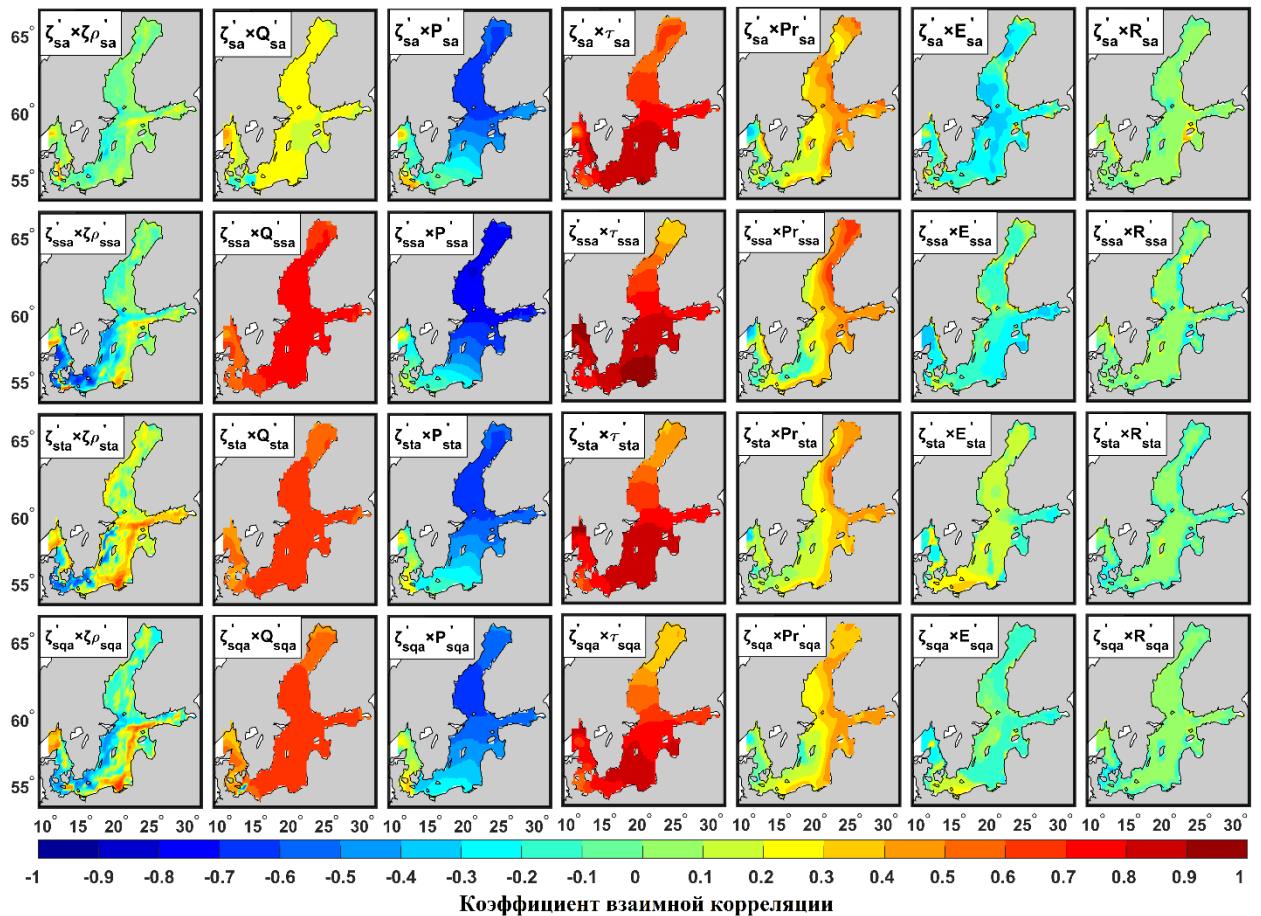


Рис. 3. Коэффициенты максимальной корреляции между аномалиями составляющих сезонных колебаний уровня моря и различных гидрометеорологических процессов (обозначения смотрите в тексте).

В Ботническом и Финском заливах, а также на севере открытой Балтики, высокая обратная связь 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 & 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 гармоники Sa (рис. 3).

С межгодовыми изменениями атмосферных осадков $Pr(t)'$, высокая связь отмечается только для полугодовой гармоники 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 гармоники Ssa наблюдаются значения обратной корреляции, достигающие 0.6.

Рисунок 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 [Leppäranta & Myrberg, 2009; Терзиев et al., 1992]. 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 таблице 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 $K(\tau)$ 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

Перед проведением множественного регрессионного анализа все гидрометеорологические предикторы, которые являются переменными в уравнениях (9)-(12), были проверены на степень их взаимосвязанности. В таблице 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.

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

На рис.4 представлены результаты множественного регрессионного анализа, демонстрирующие сравнительные количественные вклады сезонных аномалий различных 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 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 (рис. 4).

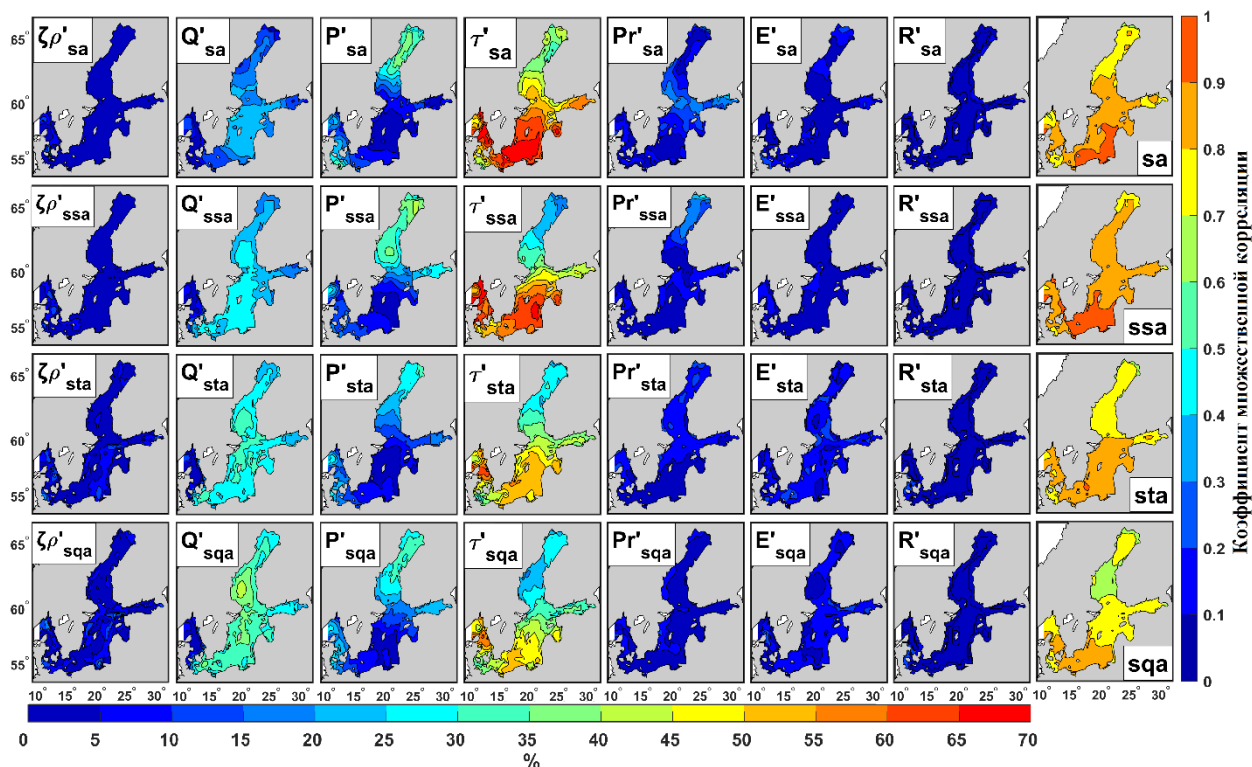


Рис.4. Сравнительные количественные вклады (в %) различных гидрометеорологических процессов в межгодовую изменчивость аномалий составляющих сезонных колебаний уровня Балтийского моря (первые 7 столбцов). В последнем столбце представлены коэффициенты множественной корреляции.

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 гармоник 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 гармоник вклады $Q(t)'$ меняются от 5 до 25%, то для четвертьгодовой гармоник Sqa они увеличиваются до 30-45% (рис. 4).

По сравнению с вкладами сезонных аномалий касательного 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 стericеских 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 [Johansson & Kahma, 2016] и Barbosa and Donner [Barbosa & Donner, 2016] с помощью парной регрессии с использованием мареографных измерений уровня моря. В работе Johansson and Kahma [Johansson & 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 & 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 [Johansson & 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 [Cartwright, 1983; Захарчук et al., 2022]. 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 трением приводного ветра. Из-за трения о подстилающую

поверхность приводный ветер имеет отличные от геострофического ветра направление и скорость.

Сравнение наших оценок количественного влияния касательного трения ветра на изменения годовых колебаний уровня моря с результатами работы Barbosa and Donner [Barbosa & 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 [Barbosa & Donner, 2016] отмечается только для северной части Ботнического залива, в то время как для Финского залива и открытой Балтики у Barbosa and Donner [Barbosa & Donner, 2016] отмечается завышение воздействия атмосферного давления в 3 – 4 раза, по сравнению с нашими оценками. Этот результат на наш взгляд сомнителен, так как статистический анализ изменений атмосферного давления над Балтикой показывает существенное уменьшение размаха его колебаний при движении с севера на юг моря [Захарчук et al., 2017]

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_{ta} , S_{qa} . В зависимости от года они меняются от 0,5-1,0 до 25-27 сантиметров. У всех четырёх составляющих сезонных колебаний уровня моря выделяются положительные линейные тренды, которые не являются статистически значимыми. В межгодовой изменчивости составляющих сезонных колебаний наблюдаются долгопериодные циклы с временными масштабами, приблизительно, 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 десятилетия у гармоник S_a , S_{sa} , S_{ta} наблюдается заметное уменьшение амплитуд и дисперсии колебаний.

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 трения ветра, атмосферного давления, а для гармоник S_{sa} , S_{ta} , S_{qa} и с изменениями водообмена через Датские проливы. Корреляция с касательным трением ветра уменьшается при движении с юга на север, в то время как с атмосферным давлением она, наоборот, уменьшается 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 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%.

Список литературы

- Белоненко, Т. В., & Колдунов, А. В. (2006). Стерические колебания уровня в северо-западной части Тихого океана. *Вестник СПбГУ*, 7(3), 81–88.
- Гордеева, С. М., & Малинин, В. Н. (2014). *Изменчивость морского уровня Финского залива*. РГГМУ.
- Захарчук, Е. А. (2008). *Синоптическая изменчивость уровня и течений в морях, омывающих северо-западное и арктическое побережья России*. Гидрометеиздат.
- Захарчук, Е. А., Литина, Е. Н., Клеванцов, Ю. П., Сухачёв, В. Н., & Тихонова, Н. А. (2017). Нестационарность гидрометеорологических процессов Балтийского моря в условиях меняющегося климата. *Труды ГОИН*, 218, 6–62.
- Захарчук, Е. А., Литина, Е. Н., Сухачев, В. Н., & Тихонова, Н. А. (2023). Стерические колебания уровня Балтийского моря. *Russian Journal of Earth Sciences*, 23(4).
- Захарчук, Е. А., Сухачев, В. Н., Тихонова, Н. А., & Литина, Е. Н. (2022). Стационарное и нестационарное описание сезонной изменчивости уровня Балтийского моря по данным мареографических измерений. *Морской Гидрофизический Журнал*, 38(6), 655–678.
- Малинин, В. Н. (2008). *Статистические методы анализа гидрометеорологической информации*. РГГМУ.
- Медведев, И. П. (2014). Сезонные колебания уровня Балтийского моря. *Метеорология и Гидрология*, 12, 42–54.
- Рожков, В. А. (2002). *Теория и методы статистического оценивания вероятностных характеристик случайных величин и функций с гидрометеорологическими примерами. Книга II*. Гидрометеиздат.

- Терзиев, Ф. С., Рожков, В. А., & Смирнова, А. И. (Eds.). (1992). *Проект «Моря СССР». Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том III Балтийское море. Выпуск I Гидрометеорологические условия*. Гидрометеиздат.
- Фукс, В. Р. (2003). Гидродинамические основы интерпретации альтиметрических съемок морской поверхности. In *Колебания уровня в морях* (pp. 79–91). РГГМУ.
- Barbosa, S. M., & Donner, R. V. (2016). Long-term changes in the seasonality of Baltic sea level. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 68(1). <https://doi.org/10.3402/tellusa.v68.30540>
- Bretherton, F. P., Davis, R. E., & Fandry, C. B. (1976). A technique for objective analysis and design of oceanographic experiments applied to MODE-73. *Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 23(7). [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(76\)90001-2](https://doi.org/10.1016/0011-7471(76)90001-2)
- Cartwright, D. E. (1983). On the smoothing of climatological time series, with application to sea-level at Newlyn. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 75(3). <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1983.tb05003.x>
- Cheng, Y., Xu, Q., & Li, X. (2018). Spatio-temporal variability of annual sea level cycle in the Baltic Sea. *Remote Sensing*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/rs10040528>
- Ekman, M. (1996). A common pattern for interannual and periodical sea level variations in the Baltic Sea and adjacent waters. *Geophysica*, 32(3).
- Ekman, M. (2009). The Changing Level of the Baltic Sea during 300 Years: A Clue to Understanding the Earth. In *Summer Institute for Historical Geophysics, Åland Islands*.
- Ekman, M., & Stigebrandt, A. (1990). Secular change of the seasonal variation in sea level and of the pole tide in the Baltic Sea. *Journal of Geophysical Research*, 95(C4). <https://doi.org/10.1029/jc095ic04p05379>
- Gill, A. E., & Niller, P. P. (1973). The theory of the seasonal variability in the ocean. *Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 20(2). [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(73\)90049-1](https://doi.org/10.1016/0011-7471(73)90049-1)
- Greatbatch, R. J. (1994). A note on the representation of steric sea level in models that conserve volume rather than mass. *Journal of Geophysical Research*, 99(C6). <https://doi.org/10.1029/94jc00847>
- Gustafsson, B. G., & Andersson, H. C. (2001). Modeling the exchange of the Baltic Sea from the meridional atmospheric pressure difference across the North Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C9). <https://doi.org/10.1029/2000jc000593>
- Hordoir, R., Axell, L., Löptien, U., Dietze, H., & Kuznetsov, I. (2015). Influence of sea level rise on the dynamics of salt inflows in the Baltic Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(10). <https://doi.org/10.1002/2014JC010642>

- Hünicke, B., & Zorita, E. (2008). Trends in the amplitude of Baltic Sea level annual cycle. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 60 A(1).
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2007.00277.x>
- Jackett, D. R., & Mcdougall, T. J. (1995). Minimal Adjustment of Hydrographic Profiles to Achieve Static Stability. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 12(2).
[https://doi.org/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., & Østrup-Rasmussen, F. (2010). Flow resistance in the Great Belt, the biggest strait between the North Sea and the Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 87(2). <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.01.014>
- Johansson, M. M., & Kahma, K. K. (2016). On the statistical relationship between the geostrophic wind and sea level variations in the Baltic Sea. *Boreal Environment Research*, 21(1–2).
- Kowalczyk, K., Pajak, K., Wieczorek, B., & Naumowicz, B. (2021). An analysis of vertical crustal movements along the European coast from satellite altimetry, tide gauge, GNSS and radar interferometry. *Remote Sensing*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/rs13112173>
- Łabuz, T. A., & Kowalewska-Kalkowska, H. (2011). Coastal erosion caused by the heavy storm surge of November 2004 in the southern Baltic Sea. *Climate Research*, 48(1).
<https://doi.org/10.3354/cr00927>
- Le Traon, P. Y., Nadal, F., & Ducet, N. (1998). An improved mapping method of multisatellite altimeter data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15(2).
[https://doi.org/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., & Myrberg, K. (2009). Physical Oceanography of the Baltic Sea. In *Physical Oceanography of the Baltic Sea*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-79703-6>
- Lisitzina, E. (1974). *Sea-Level Changes* (1st Edition). ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY.
- Männikus, R., Soomere, T., & Viška, M. (2020). 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*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106827>
- Mohrholz, V. (2018). Major Baltic inflow statistics - Revised. *Frontiers in Marine Science*, 5(OCT). <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00384>
- Nerger, L., Hiller, W., & Schröter, J. (2005). A comparison of error subspace Kalman filters. In *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography* (Vol. 57, Issue 5).
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2005.00141.x>
- Pajak, K., & Kowalczyk, K. (2019). A comparison of seasonal variations of sea level in the southern Baltic Sea from altimetry and tide gauge data. *Advances in Space Research*, 63(5).
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.11.022>

- Pemberton, P., Löptien, U., Hordoir, R., Höglund, A., Schimanke, S., Axell, L., & Haapala, J. (2017). 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*, *10*(8). <https://doi.org/10.5194/gmd-10-3105-2017>
- Plag, H. P., & Tsimplis, M. N. (1999). Temporal variability of the seasonal sea-level cycle in the North Sea and Baltic Sea in relation to climate variability. *Global and Planetary Change*, *20*(2–3). [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(98\)00069-1](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(98)00069-1)
- Pujol, M. I., Faugère, Y., Taburet, G., Dupuy, S., Pelloquin, C., Ablain, M., & Picot, N. (2016). DUACS DT2014: The new multi-mission altimeter data set reprocessed over 20 years. *Ocean Science*, *12*(5). <https://doi.org/10.5194/os-12-1067-2016>
- R., J., & de Boor, C. (1980). A Practical Guide to Splines. *Mathematics of Computation*, *34*(149). <https://doi.org/10.2307/2006241>
- Samuelsson, M., & Stigebrandt, A. (1996). Main characteristics of the long-term sea level variability in the Baltic sea. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, *48*(5). <https://doi.org/10.3402/tellusa.v48i5.12165>
- Stramska, M., & Chudziak, N. (2013). Recent multiyear trends in the Baltic Sea level**This work was supported through the SatBałtyk project funded by the European Union through the European Regional Development Fund, (contract No. POIG.01.01.02-22-011/09 entitled ‘The Satellite Monitoring of the Baltic Sea Environment’). *Oceanologia*, *55*(2). <https://doi.org/10.5697/oc.55-2.319>
- Stramska, M., Kowalewska-Kalkowska, H., & Świrgoń, M. (2013). Seasonal variability in the Baltic Sea level. *Oceanologia*. <https://doi.org/10.5697/oc.55-4.787>
- Voinov, G. N. (2002). Tides and Tidal streams. In V. A. Volkov, O. M. Johannessen, V. E. Borodachov, G. N. Voinov, L. H. Pettersson, L. P. Bobylev, & A. V. Kouraev (Eds.), *Polar Seas Oceanography. An integrated case study of the Kara Sea* (pp. 61–77).
- Weisse, R., Dailidienė, I., Hünicke, B., Kahma, K., Madsen, K., Omstedt, A., Parnell, K., Schöne, T., Soomere, T., Zhang, W., & Zorita, E. (2021). Sea level dynamics and coastal erosion in the Baltic Sea region. In *Earth System Dynamics* (Vol. 12, Issue 3). <https://doi.org/10.5194/esd-12-871-2021>
- Zakharchuk, E. A., Sukhachev, V. N., Tikhonova, N. A., Kouraev, A., & Zakharova, E. (2022). Seasonal fluctuations in Baltic sea level determined from satellite altimetry. *Continental Shelf Research*, *249*. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2022.104863>
- Zakharchuk, E., Tikhonova, N., Zakharova, E., & Kouraev, A. (2021). Spatiotemporal structure of Baltic free sea level oscillations in barotropic and baroclinic conditions from hydrodynamic modelling. *Ocean Science*, *17*, 543–559. <https://doi.org/10.5194/os-17-543-2021>