

Стационарное и нестационарное описание сезонной изменчивости уровня Балтийского моря по данным мареографических измерений

Е. А. Захарчук^{1, 2}, В. Н. Сухачев^{1, 2}, ✉, Н. А. Тихонова^{1, 2},
Е. Н. Литина^{1, 2}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

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

✉ syhachev@mail.ru

Поступила в редакцию 16.06.2022; одобрена после рецензирования 11.08.2022;
принята к публикации 09.09.2022.

Аннотация

Цель. Основной целью данной работы является оценивание в стационарном приближении величин амплитудно-фазовых характеристик сезонных колебаний уровня Балтийского моря за период 1971–2020 гг. и исследование особенностей и возможных причин их нестационарности.

Методы и результаты. Обосновывается описание сезонных колебаний суммой четырех гармоник: годовой (Sa), полугодовой (Ssa), третьгодовой (Sta) и четвертьгодовой (Sqa). С помощью гармонического анализа рядов среднесуточных значений мареографических измерений уровня моря оцениваются средние значения сезонных колебаний уровня Балтийского моря, а также их межгодовая изменчивость. Результаты свидетельствуют, что амплитуды гармоник Sa , Ssa , Sta и Sqa выделяются достоверно для всех рассматриваемых береговых пунктов. Особенности распределения в пространстве фазы свидетельствуют о статистически достоверном распространении возмущений уровня моря с периодом один год с юго-запада на север и северо-восток. Для других составляющих сезонных колебаний уровня моря (Ssa , Sta и Sqa) пространственные изменения фазы очень маленькие и сравнимы со среднеквадратическими ошибками их расчета. В межгодовых изменениях сезонных колебаний уровня Балтийского моря хорошо выражена амплитудная модуляция с периодом огибающей около 20 лет для гармоники Sa и приблизительно от 2 до 10 лет для гармоник Ssa , Sta и Sqa . Во временном ходе амплитуд гармоники Sa в период 1971–2020 гг. для всех станций отмечается значимый отрицательный тренд. Для выяснения причин выявленных особенностей межгодовых изменений гармоники Sa проводится нестационарный гармонический анализ рядов атмосферного давления, ветра и стерических колебаний уровня моря.

Выводы. Показано, что основное влияние на наблюдающиеся в последние полвека изменения годовых колебаний уровня моря оказывают аномалии годовых колебаний ветра и, в меньшей степени, атмосферного давления.

Ключевые слова: уровень моря, сезонные колебания, гармонический анализ, межгодовая изменчивость, тренды, ветер, атмосферное давление, стерические колебания

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

Для цитирования: Стационарное и нестационарное описание сезонной изменчивости уровня Балтийского моря по данным мареографических измерений / Е. А. Захарчук [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 6. С. 655–678. EDN XXXFYV doi:10.22449/0233-7584-2022-6-655-678

Stationary and Non-Stationary Description of the Seasonal Sea Level Oscillations in the Baltic Sea Based on the Tide Gauge Data

E. A. Zakharchuk^{1,2}, V. N. Sukhachev^{1,2}✉, N. A. Tikhonova^{1,2},
E. N. Litina^{1,2}

¹ St Petersburg University, Saint Petersburg, Russia

² N. N. Zubov State Oceanographic Institute, Moscow, Russia

✉ syhachev@mail.ru

Abstract

Purpose. The main purpose of the paper is to estimate in a stationary approximation the magnitudes of the amplitude-phase characteristics of the sea level seasonal fluctuations in the Baltic Sea in 1971–2020, and to study the features and possible reasons for their non-stationarity.

Methods and Results. The description of seasonal fluctuations is substantiated by a sum of 4 harmonics: the annual (*Sa*), semi-annual (*Ssa*), third-annual (*Sta*) and quarter-annual (*Sqa*) ones. The average values of the Baltic Sea level seasonal fluctuations, as well as their interannual variability are estimated using a harmonic analysis of the average daily values of the sea level mareographic measurements. The results indicate that the amplitudes of the harmonics *Sa*, *Ssa*, *Sta* and *Sqa* are reliably distinguished for all the coastal points under study. The features of the phase spatial distribution testify to a statistically reliable propagation of the sea level disturbances with a one-year period from the southwest to the north and to the northeast. For the other components of the sea level seasonal fluctuations (*Ssa*, *Sta* and *Sqa*), the spatial phase changes are very small and comparable to the standard errors of their calculation. The amplitude modulation with a period of about 20 years for the *Ssa* harmonic and approximately 2–10 years for the *Ssa*, *Sta* and *Sqa* ones is well pronounced in the interannual changes in the Baltic Sea level seasonal fluctuations. A significant negative trend for all the stations is observed in the time series of the *Sa* harmonic amplitudes in 1971–2020. In order to clarify the reasons of the revealed features of the *Sa* harmonic interannual changes, a non-stationary harmonic analysis of the atmospheric pressure series, wind and the sea level steric fluctuations is done in the study.

Conclusions. It is shown that the changes in the annual sea level fluctuations observed in 1971–2020 are mostly influenced by the anomalies of annual wind fluctuations, and to a lesser extent, by those of the atmospheric pressure.

Keywords: sea level, seasonal fluctuations, harmonic analysis, interannual variability, trends, wind, atmospheric pressure, steric fluctuations

Acknowledgements: the study was carried out with financial support of the Russian Science Foundation grant No. 22-27-00209

For citation: Zakharchuk, E.A., Sukhachev, V.N., Tikhonova, N.A. and Litina, E.N., 2022. Stationary and Non-Stationary Description of the Seasonal Sea Level Oscillations in the Baltic Sea Based on the Tide Gauge Data. *Physical Oceanography*, 29(6), pp. 619-635. doi:10.22449/1573-160X-2022-6-619-635

Введение

Сезонный ход уровня Балтийского моря проявляется в его понижении зимой до минимального значения в апреле – мае и повышении летом – осенью до максимума в ноябре – январе [1–3]. Эту сезонную ритмику в положении уровенной поверхности Балтики связывают с сезонными изменениями ветра, атмосферного давления, течений, плотности морской воды и составляющих водного баланса (осадки, испарение, материковый сток и водообмен с Северным морем) [4]. Квазистационарная компонента сезонных колебаний уровня Балтийского моря хорошо выражена и достоверно выделяется с помощью гармонического и спектрального анализов многолетних рядов среднемесячных значений уровня моря [1, 5, 6].

Сезонные колебания уровня играют важную роль в гидрологическом режиме Балтийского моря. Они оказывают заметное воздействие на берега и прибрежную инфраструктуру Балтики [7, 8], являются индикаторами ее водообмена с Северным морем [9–11]. Сезонные колебания уровня являются также индикаторами происходящих изменений метеорологических процессов [4] и наблюдающегося потепления климата [12]. Наши исследования показывают, что вклад сезонных колебаний Балтийского моря в опасные подъемы уровня на востоке Финского залива в отдельные годы может достигать 26% [13]. Численные эксперименты на трехмерной бароклинной модели свидетельствуют, что значительные по амплитуде собственные колебания Балтийского моря возбуждаются не только в диапазоне периодов от часов до 2 сут, как это считалось ранее [14], но также и в диапазоне сезонной изменчивости [15].

Исследования пространственной изменчивости сезонных колебаний уровня Балтийского моря проводились по результатам гармонического анализа многолетних рядов среднемесячных значений уровня, полученных на основе мареографических измерений [5, 6]. Результаты свидетельствовали, что амплитуда колебаний с годовым периодом меняется от 4–6 см в Датских проливах до почти 13 см в Финском заливе и на севере Ботнического залива. Амплитуды полугодовой компоненты сезонных колебаний оказались в несколько раз меньше и менялись от 1–2 см в прол. Каттегат и Датских проливах до 5 см в Финском заливе и в мелководной части Балтики в районе Аландских о-вов, где они достигали 5,7 см, а также у восточного побережья Швеции в Ботническом море (5,1–5,6 см) и в центральной части Финского залива (5,2 см) [5, 6]. Значение фазы годовых колебаний увеличивалось при движении от Датских проливов через открытую часть Балтики к вершине Ботнического залива на 30°. Фаза полугодовой гармоники в Балтийском море менялась от 20° в прол. Каттегат и на севере Ботнического залива до 50° на самом юге Ботнического моря [6].

Авторы работы [16] с помощью скользящего Фурье-анализа ряда среднемесячных значений уровня моря на ст. Стокгольм за период 1825–1984 гг. оценили межгодовую изменчивость амплитуд годовых и полугодовых составляющих сезонных колебаний. Их результаты показали наличие значимого положительного тренда в изменениях годовой компоненты уровня моря. Они предположили, что этот тренд может быть связан с вековыми изменениями океанографических условий в северо-восточной части Северной Атлантики, проявлениями которых являются движения океанического полярного фронта [16]. В другой своей работе, исследуя вековые изменения сезонных колебаний уровня на ст. Стокгольм, автор [17] приходит к выводу, что они связаны с межгодовыми изменениями сезонных колебаний ветра в переходной зоне между Северным и Балтийским морями.

Более поздние исследования также обнаружили положительный тренд в изменениях амплитуд годовой компоненты сезонных колебаний уровня в Балтийском море, который авторами связывался с Североатлантическим колебанием в десятилетних масштабах времени и с общей тенденцией потепления климата [18], а также с вековыми изменениями атмосферных осадков в регионе Балтийского моря [19].

Авторы работы [20] исследовали межгодовые изменения годовой компоненты сезонных колебаний уровня Балтийского моря за период 1900–2012 гг.

по данным его среднемесячных значений на 9 береговых станциях с помощью дискретного вейвлет-анализа. Они не выявили положительного линейного тренда в изменении амплитуды годовой компоненты сезонных колебаний уровня, который выделялся другими авторами [16, 18, 19], однако обнаружили чередующиеся периоды высоких и низких амплитуд в изменениях годового цикла сезонных колебаний уровня.

В работе [21] по спутниковым альтиметрическим данным оценивалась сезонная изменчивость уровня в одной точке открытой Балтики путем 18-летнего осреднения значений уровня за каждые сутки и за каждый месяц года. Полученные результаты сравнивались с подобными оценками, выполненными по данным мареографических наблюдений уровня на нескольких береговых станциях. В этой работе также исследовалась взаимосвязь между среднемесячными альтиметрическими значениями уровня и данными о речном стоке 75 самых больших рек, впадающих в Балтийское море. Сравнение не выявило корреляции между анализируемыми процессами [21].

Авторы работы [2] 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, мареографических измерений уровня моря и данных регионального модельного реанализа физических процессов Балтийского моря за период 1993–2014 гг. По мнению авторов, максимумы годового хода уровня наблюдались с декабря по февраль, а минимумы в апреле – мае. Для исследования причин межгодовых изменений оценок годового хода уровня Балтики авторы провели взаимный корреляционный анализ между главными компонентами годового хода уровня моря, рассчитанными по спутниковым альтиметрическим данным, и главными компонентами различных метеорологических параметров (зональный ветер, значения индекса Североатлантического колебания, атмосферное давление и температура воздуха). Результаты показали во всех случаях высокие оценки коэффициентов корреляции, достигающие значений 0,60–0,80.

Анализ перечисленных работ свидетельствует, что оценки характеристик сезонных колебаний уровня Балтийского моря проводились в подавляющем числе случаев на основе многолетних рядов среднемесячных значений уровня, полученных по данным мареографических наблюдений на сети береговых гидрометеорологических станций и спутниковой альтиметрии. Однако автор работы [22] показал, что вследствие неэквидистантности среднемесячных данных оценки амплитуд и фаз составляющих сезонных колебаний уровня имеют погрешности и для улучшения точности оценок их следует рассчитывать по рядам среднесуточных или ежечасных значений уровня. Исследования межгодовых изменений сезонных колебаний по среднемесячным данным, выполненные с помощью гармонического анализа путем расчетов их амплитуд и фаз за каждый год [6], показывают уменьшение рядов уровня до 12 значений в год, что сказывается на точности их оценок. Исследования сезонных колебаний, полученных на основе многолетнего осреднения среднесуточных значений уровня за каждые сутки года [21], нельзя считать достоверными, так как они содержат вклады квазистационарных колебаний из низкочастотного диапазона синоптического масштаба изменчивости, которые выявляются даже при

визуальном анализе сглаженных таким образом среднесуточных рядов уровня [21]. Причины межгодовых изменений характеристик сезонных колебаний уровня Балтийского моря остаются недостаточно изученными.

Цель данной работы – оценить с помощью гармонического анализа рядов среднесуточных значений мареографических измерений уровня моря амплитудно-фазовые характеристики четырех составляющих сезонных колебаний уровня Балтийского моря (Sa , Ssa , Sta , Sqa) за период 1971–2020 гг. в стационарном приближении и с учетом нестационарности процесса, а также исследовать возможные причины их межгодовых изменений.

Данные и методы

Для исследования сезонных колебаний уровня Балтийского моря использовались среднесуточные и среднемесячные данные мареографических измерений на 29 береговых станциях Балтийского моря (рис. 1) различной продолжительности, которые были получены с ресурсов *E.U. Copernicus Marine Service Information* (URL: <http://marine.copernicus.eu>) и *PSMSL* (URL: <http://psmsl.org/>) [23], а для ст. Пионерский, Кронштадт, Горный Институт и Выборг – из Северо-Западного управления Росгидромета. В табл. 1 приведено описание этого массива данных. Для 24 станций продолжительность среднесуточных рядов составила 50 лет (1971–2020 гг.), для ст. Пионерский – 43 года (1977–2020 гг.). Наибольшую продолжительность имел ряд среднесуточных значений уровня на ст. Стокгольм за 1889–2020 гг. Для сравнения также были использованы данные среднемесячных значений уровня моря на 6 станциях за различный период времени (табл. 1).

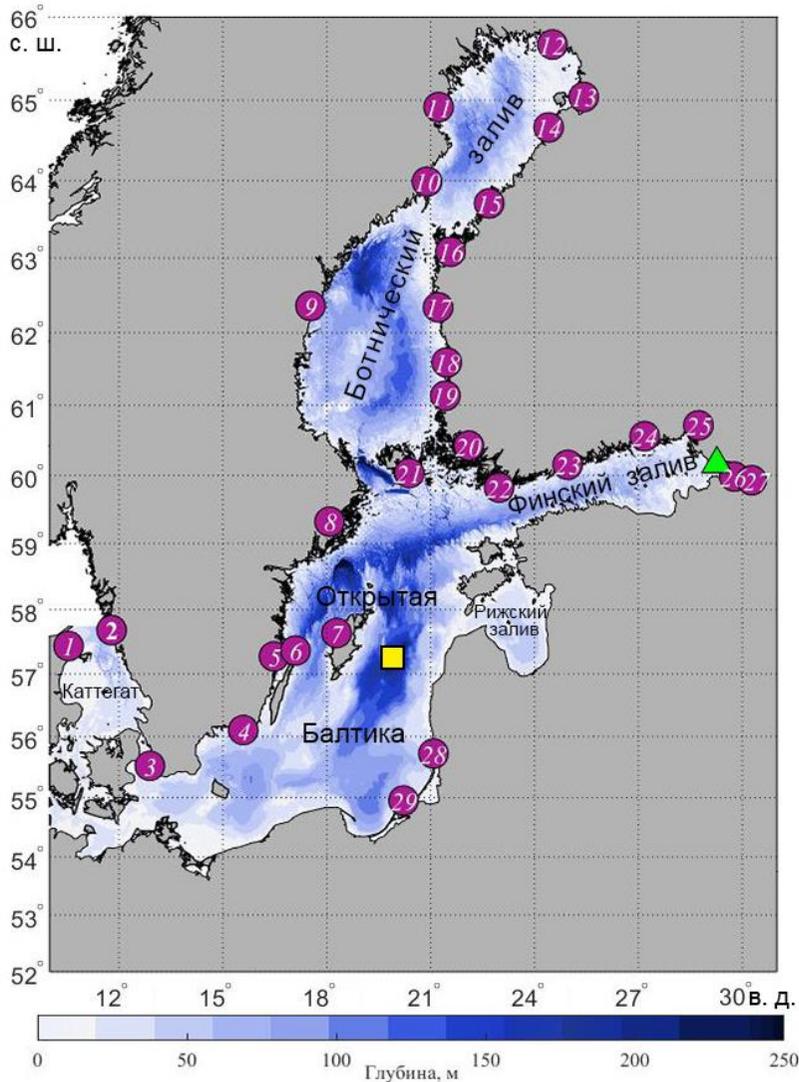
У подавляющего большинства рядов данных уровня моря количество пропусков было меньше 1%, и только в шести случаях их количество изменялось в диапазоне 2,1–8,1% (табл. 1).

Амплитуды (A) и фазы (G) сезонных колебаний уровня в стационарном приближении рассчитывались с помощью гармонического анализа, выполненного по методу наименьших квадратов, с учетом рекомендаций, представленных в работе [24]. Оценивались четыре гармоники: годовая (Sa) – 365,2 сут, полугодовая (Ssa) – 182,6 сут, третьегодовая (Sta) – 121,8 сут и четвертьгодовая (Sqa) – 91,3 сут:

$$A(t) = A_{Sa} \cos(\omega_{Sa} t - G_{Sa}) + A_{Ssa} \cos(\omega_{Ssa} t - G_{Ssa}) + A_{Sta} \cos(\omega_{Sta} t - G_{Sta}) + A_{Sqa} \cos(\omega_{Sqa} t - G_{Sqa}), \quad (1)$$

где A_{Sa} , A_{Ssa} , A_{Sta} , A_{Sqa} – амплитуды указанных гармоник соответственно; G_{Sa} , G_{Ssa} , G_{Sta} , G_{Sqa} – фазы этих гармоник; ω_{Sa} , ω_{Ssa} , ω_{Sta} , ω_{Sqa} – частоты гармоник; t – время. По оцененным амплитудам и фазам предвычислялись ряды всех четырех гармоник сезонных колебаний уровня моря.

Выбор четырех гармоник для описания сезонного хода уровня моря, а не двух, как это было сделано в других работах [5, 16, 25], был продиктован сравнением наблюдающегося по мареографическим данным сезонного хода уровня с его описанием двумя (Sa , Ssa) и четырьмя (Sa , Ssa , Sta , Sqa) гармониками, которое показано на рис. 2.



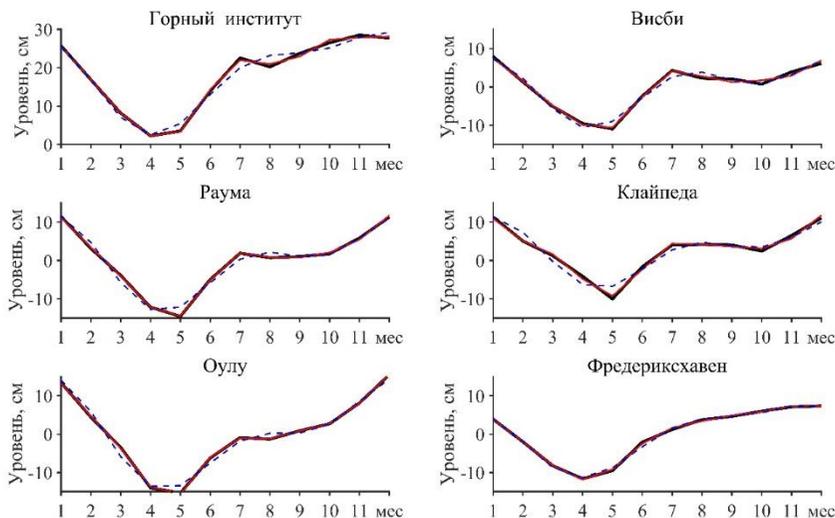
Р и с. 1. Батиметрия Балтийского моря (оттенки синего цвета). Цифрами показано местоположение станций мареографических измерений уровня: 1 – Фредериксхавен; 2 – Гётеборг; 3 – Клагсхамн; 4 – Кангсхолмфорт; 5 – Оскарсхамн; 6 – Оландс; 7 – Висби; 8 – Стокгольм; 9 – Спикарна; 10 – Ратан; 11 – Фуруогрунд; 12 – Кеми; 13 – Оулу; 14 – Раахе; 15 – Пиетерсари; 16 – Васа; 17 – Каскинен; 18 – Пори; 19 – Раума; 20 – Турку; 21 – Дегерби; 22 – Ханко; 23 – Хельсинки; 24 – Хамина; 25 – Выборг; 26 – Кронштадт; 27 – Горный институт; 28 – Клайпеда; 29 – Пионерский; зеленым треугольником обозначена ст. Озерки; желтым квадратом – ст. ВУ-15

Fig. 1. Bathymetry of the Baltic Sea (shades of blue color). Circles with numbers denote the location of the sea level mareographic measurement stations: 1 – Frederikshavn; 2 – Gothenburg; 3 – Klagshamn; 4 – Kangsholmfort; 5 – Oskarshamn; 6 – Olands; 7 – Visby; 8 – Stockholm; 9 – Spikarna; 10 – Ratan; 11 – Furuogrund; 12 – Kemi; 13 – Oulu; 14 – Raahе; 15 – Pietersari; 16 – Vasa; 17 – Kaskinen; 18 – Pori; 19 – Rauma; 20 – Turku; 21 – Degerbi; 22 – Hanko; 23 – Helsinki; 24 – Hamina; 25 – Vyborg; 26 – Kronstadt; 27 – Gornyy Institut; 28 – Klaipeda; 29 – Pionerskij. Green triangle indicates the hydrometeorological station Ozerki, yellow square – the BY-15 station

Таблица 1
Table 1

Данные мареографических измерений уровня на береговых станциях Балтийского моря
Data of the sea level mareographic measurements at the coastal stations in the Baltic Sea

№ / No	Название станции / Station name	Координаты / Coordinates		Интервал измерений / Measurement interval	Период измерений / Measurement period		Количество измерений / Number of measurements	Пропуски, % / Gaps, %
		°с.ш. / N	°в.д. / E		начало / beginning	конец / end		
1	Фредериксхавен / Frederikshavn	57,4	10,5	1 мес / 1 month	1889	2017	1541	0,0
2	Гётеборг / Готенхамн / Gothenburg	57,7	11,8	1 сут / 1 day	1971	2020	18263	0,0
3	Клагсхамн / Klagshamn	55,5	12,9	1 сут / 1 day	1971	2020	18263	0,0
4	Кангсхольмфорт / Kangsholmfort	56,1	15,6	1 сут / 1 day	1971	2020	18263	0,0
5	Оскарсхамн / Oskarshamn	57,3	16,5	1 сут / 1 day	1971	2020	18263	0,4
6	Оландс / Olands	57,4	17,1	1 сут / 1 day	1971	2020	18263	4,0
7	Висби / Visby	57,6	18,3	1 сут / 1 day	1971	2020	18263	0,2
7	Висби / Visby	57,6	18,3	1 мес / 1 day	1916	2020	1260	0,0
8	Стокгольм / Stockholm	59,3	18,1	1 сут / 1 day	1889	2020	18263	0,0
9	Спикарна / Spikarna	62,4	17,5	1 сут / 1 day	1971	2020	18263	0,1
10	Рапан / Raan	64,0	20,9	1 сут / 1 day	1971	2020	18263	0,0
11	Фуруоунд / Furuogrund	64,9	21,2	1 сут / 1 day	1971	2020	18263	0,2
12	Кеми / Kemi	65,7	24,5	1 сут / 1 day	1971	2020	18263	2,4
13	Оулу / Oulu	65,0	25,4	1 сут / 1 day	1971	2020	18263	0,1
13	Оулу / Oulu	65,0	25,4	1 мес / 1 month	1889	2019	1572	4,3
14	Раахе / Raahе	64,7	24,4	1 сут / 1 day	1971	2020	18263	0,1
15	Пиетерсари / Pietersari	63,7	22,7	1 сут / 1 day	1971	2020	18263	0,1
16	Васа / Vasa	63,1	21,6	1 сут / 1 day	1971	2020	18263	0,1
17	Каскинен / Kaskinen	62,3	21,2	1 сут / 1 day	1971	2020	18263	0,5
18	Пори / Pori	61,6	21,5	1 сут / 1 day	1971	2020	18263	2,1
19	Раума / Rauma	61,1	21,4	1 сут / 1 day	1971	2020	18263	0,1
19	Раума / Rauma	61,1	21,4	1 мес / 1 month	1933	2019	1044	0,6
20	Турку / Turku	60,4	22,1	1 сут / 1 day	1971	2020	18263	0,1
21	Дегерби / Degerbi	60,0	20,4	1 сут / 1 day	1971	2020	18263	0,1
22	Ханко / Hangko	59,8	23,0	1 сут / 1 day	1971	2020	18263	0,1
23	Хельсинки / Helsinki	60,2	25,0	1 сут / 1 day	1971	2020	18263	0,1
24	Хамина / Hamina	60,6	27,2	1 сут / 1 day	1971	2020	18263	0,1
25	Вьборг / Vyborg	60,7	28,7	1 сут / 1 day	1971	2020	18263	0,5
26	Кронштадт / Kronstadt	60,0	29,8	1 сут / 1 day	1971	2020	18263	0,3
27	Горный институт / Горный институт	59,9	30,3	1 сут / 1 day	1971	2004	336	0,0
28	Клапедла / Klappeda	55,7	21,1	1 мес / 1 month	1898	2018	1452	8,1
29	Пионерский / Pionerskij	55,0	20,2	1 сут / 1 day	1977	2020	16071	4,3



Р и с. 2. Наблюдающийся по мареографическим измерениям средний сезонный ход уровня на различных станциях Балтийского моря (черная кривая) и его предвычисление с помощью гармонического анализа, включающее две (S_a , S_{sa} , штриховая) и четыре (S_a , S_{sa} , S_{ta} , S_{qa} , красная кривая) гармоники

Fig. 2. Average seasonal changes in the sea level at different stations of the Baltic Sea (black curve) resulted from the mareographic measurements, and its values pre-calculated by the harmonic analysis including two (S_a , S_{sa} , dotted line) and four (S_a , S_{sa} , S_{ta} , S_{qa} , red curve) harmonics

Результаты, приведенные на рис. 2, показывают, что только на ст. Фредериксхавен средний сезонный ход уровня хорошо описывается суперпозицией гармоник S_a , S_{sa} . На других станциях при описании сезонного хода двумя гармониками происходит смещение основного минимума с мая на апрель (ст. Раума, Висби, Оулу), а также отмечается отсутствие промежуточного летнего максимума в июле, связанного с максимумом стерических изменений уровня Балтики [16] и с увеличением осадков и речного стока (ст. Горный институт), или его запаздывание на один месяц (ст. Раума, Висби, Оулу, Клайпеда). На ст. Клайпеда отмечается также заметное расхождение в значениях основного минимума среднего сезонного хода уровня при его описании двумя гармониками. Суперпозиция четырех гармоник, наоборот, во всех случаях достаточно хорошо описывает этот ход в разных районах Балтики (рис. 2). В связи с этим в данной работе для описания среднего сезонного хода уровня использовались все четыре гармоники.

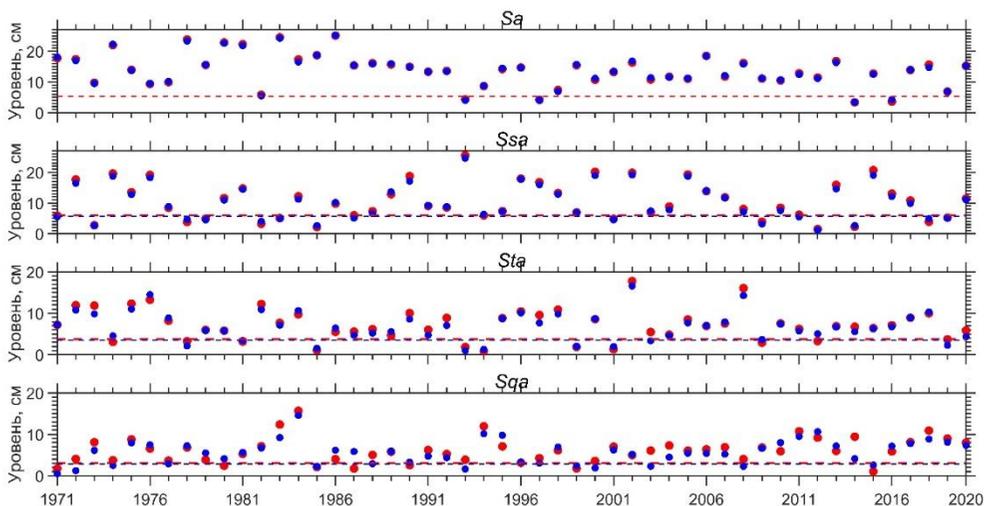
Точность амплитуд и фаз, оцененных в стационарном приближении составляющих сезонных колебаний уровня моря, оценивалась по методике, описанной в работе [26] следующим образом. Из исходного ряда среднесуточных значений уровня моря вычитался предвычисленный по формуле (1) ряд сезонных колебаний. Затем проводилось быстрое преобразование Фурье остаточного ряда. По результатам Фурье-анализа в окрестностях частоты каждой сезонной гармоники выделялись полоса частот $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ и соответствующие этим частотам значения амплитуд $A(\omega_1), A(\omega_2), \dots, A(\omega_n)$ и фаз $G(\omega_1), G(\omega_2), \dots,$

$G(\omega_n)$. Далее для полученных оценок амплитуд и фаз сезонных гармоник рассматривались их среднеквадратические ошибки:

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{\sum(A(\omega) - \overline{A(\omega)})^2}{N}}, \quad (2)$$

$$\sigma_G = \frac{\sigma_A}{A} * \frac{180}{\pi}, \quad (3)$$

где σ_A – среднеквадратическая ошибка расчета амплитуды гармоники; σ_G – среднеквадратическая ошибка расчета фазы гармоники; N – количество членов ряда; $\pi = 3,14$.



Р и с. 3. Сравнение результатов скользящего гармонического анализа рядов среднесуточных и среднемесячных значений уровня моря на ст. Стокгольм за период 1971–2020 гг. Амплитуды годовой, полугодовой, третьгодовой и четвертьгодовой компонент сезонных колебаний уровня моря рассчитаны по среднесуточным (красные кружки) и среднемесячным (синие кружки) данным. Штриховой линией обозначено значение среднеквадратической ошибки расчета амплитуды

F i g. 3. Comparison of the daily and monthly average sea levels in Stockholm in 1971–2020 resulted from a moving harmonic analysis. Amplitudes of the annual, semi-annual, third- annual and quarter-annual components of seasonal sea level fluctuations are calculated from the daily (red circles) and monthly (blue circles) average data. Dotted line indicates the mean square error in the amplitude calculation

С целью учета нестационарности сезонных колебаний ряды уровня моря подвергались скользящему гармоническому анализу [18]. На рис. 3 представлено сравнение результатов скользящего гармонического анализа рядов среднемесячных и среднесуточных значений уровня моря на ст. Стокгольм с периодом скольжения один год. Хорошо видно, что наибольшее согласие в оценках амплитуд по среднемесячным и среднесуточным рядам уровня отмечается для гармоники Sa , хотя в отдельных редких случаях результаты гармонического анализа среднемесячных и среднесуточных рядов уровня для этой гармоники

различаются на 26%. С повышением частоты обертонов годового хода уровня эти различия увеличиваются, достигая наибольших расхождений в оценках рассчитанных амплитуд у гармоник Sta и Sqa (рис. 3). Столь значительные расхождения в оценках амплитуд составляющих сезонных колебаний связаны с неэквидистантностью рядов среднемесячных значений уровня моря [22] и небольшим количеством членов ряда в окне скольжения (12), не позволяющим достаточно точно описать межгодовую изменчивость составляющих сезонных колебаний. Поэтому в данной работе для проведения скользящего гармонического анализа использовались ряды среднесуточных значений уровня моря.

Для годовой гармоник Sa период (окно) скольжения принимался равным один год и скользящий гармонический анализа проводился без перекрытия (т. е. за каждый последующий год). Для других гармоник скользящий Фурье-анализ проводился с перекрытием.

Для выделения нестационарной полугодовой компоненты Ssa период скольжения принимался равным один год и скольжение проводилось с перекрытием через каждые полгода; для выделения третьгодовой гармоник Sta период скольжения принимался равным 8 мес и скольжение проводилось через каждые 4 мес; для выделения четвертьгодовой гармоник Sqa период скольжения принимался равным 6 мес и скольжение проводилось через каждые 3 мес. По оцененным амплитудам и фазам для каждого периода скольжения предвычислялись ряды четырех компонент сезонных колебаний, которые затем соединялись в ряды $\zeta_{sa}(t)$, $\zeta_{ssa}(t)$, $\zeta_{sta}(t)$, $\zeta_{sqa}(t)$, описывающие межгодовые изменения каждой компоненты. Среднеквадратические ошибки расчета амплитуд гармоник, оцененных с помощью скользящего гармонического анализа, вычислялись следующим образом. По остаточным рядам, полученным для каждого периода скольжения, оценивались амплитуды на частотах всех четырех гармоник. По рядам этих амплитуд определялось их среднеквадратическое отклонение, которое принималось за среднеквадратическую ошибку расчета амплитуд исследуемых гармоник.

Значимость линейного тренда в межгодовых изменениях амплитуд гармоник Sa , Ssa , Sta , Sqa оценивалась с помощью критерия Стьюдента¹.

Для исследования возможных причин изменений амплитуды годовых колебаний уровня моря в последние полвека привлекались имеющиеся в нашем распоряжении ряды срочных (4 раза в сутки) инструментальных измерений атмосферного давления (Pa) на ст. Кронштадт (1979–2020 гг.), скорости и направления ветра (W) на ст. Выборг (1966–2020 гг.), Озерки (1977–2020 гг.) и Пионерский (1977–2020 гг.), а также данные судовых измерений на разных горизонтах температуры (T) и солёности (S) воды на станции международного мониторинга $BY-15$ (см. рис. 1) за период 1971–2020 гг., которые были получены из международной базы данных DAS (URL: <http://nest.su.se/das/>). Исходные данные Pa и W осреднялись до одних суток, и затем по описанной выше методике проводился скользящий гармонический анализ.

¹ Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2008. 408 с.

Данные T и S , полученные на станции ВУ-15, использовались для оценки изменений во времени стерических колебаний уровня моря на частоте годовой гармоники Sa . С этой целью для каждого стандартного горизонта формировались ряды среднемесячных значений T и S , которые использовались для расчета плотности морской воды (ρ) по уравнению состояния, описанному в работе [27]. Стерические изменения уровня ($\zeta\rho$) оценивались по расчетной формуле (4) из работы [28]:

$$\frac{\Delta\zeta_s}{\Delta t} = - \sum_{i=1}^n \frac{1}{\rho} \frac{\Delta\rho_i}{\Delta t} \Delta z_i, \quad (4)$$

где $\frac{\Delta\zeta_s}{\Delta t}$ – стерические изменения уровня моря за отрезок времени Δt ; $\frac{\Delta\rho_i}{\Delta t}$ – изменение плотности морской воды в слое i ($i = 1, 2, \dots, n$); Δz_i – разница между горизонтами i -го слоя.

Полученный ряд среднемесячных значений стерических колебаний $\zeta\rho(t)$ подвергался скользящему гармоническому анализу с периодом скольжения, равным 12 мес.

По результатам скользящего гармонического анализа атмосферного давления, ветра и стерических колебаний уровня моря предвычислялись ряды изменений во времени гармоники Sa этих процессов: $Pa_{sa}(t)$, $W_{sa}(t)$, $\zeta\rho_{sa}(t)$.

Для оценки связей между изменениями во времени годовых колебаний уровня моря, атмосферного давления, ветра и стерических колебаний проводился взаимный корреляционный анализ между аномалиями годовых колебаний уровня моря $\zeta_{sa}(t)' = \zeta_{sa}(t) - \overline{\zeta_{sa}(t)}$ и годовыми аномалиями $Pa_{sa}(t)' = Pa_{sa}(t) - \overline{Pa_{sa}(t)}$, $W_{sa}(t)' = W_{sa}(t) - \overline{W_{sa}(t)}$, $\zeta\rho_{sa}(t)' = \zeta\rho_{sa}(t) - \overline{\zeta\rho_{sa}(t)}$, где $\overline{\zeta_{sa}(t)}$, $\overline{Pa_{sa}(t)}$, $\overline{W_{sa}(t)}$, $\overline{\zeta\rho_{sa}(t)}$ – стационарные компоненты Sa гидрометеорологических процессов. Переход к аномалиям был вызван тем, что во всех гидрометеорологических процессах хорошо выражена стационарная годовая компонента, которая оказывает заметное влияние на результаты взаимного корреляционного анализа [29].

Между рассчитанными аномалиями годовых колебаний уровня моря $\zeta_{sa}(t)'$ и аномалиями $Pa_{sa}(t)'$, $W_{sa}(t)'$, $\zeta\rho_{sa}(t)'$ проводился взаимный корреляционный анализ.

Учитывая, что колебания ветра – векторный процесс, оценку взаимосвязи между аномалиями $\zeta_{sa}(t)'$ и $W_{sa}(t)'$ мы проводили путем расчета множественных коэффициентов корреляции по методике взаимного корреляционного анализа между скалярными и векторными процессами². Следуя этой методике, вначале оценивали матрицы коэффициентов взаимных корреляций следующего вида:

$$D_{\eta V} = \begin{vmatrix} r_{\eta\eta} & r_{\eta u} & r_{\eta v} \\ r_{u\eta} & r_{uu} & r_{uv} \\ r_{v\eta} & r_{vu} & r_{vv} \end{vmatrix}, D_{uv} = \begin{vmatrix} r_{uu} & r_{uv} \\ r_{vu} & r_{vv} \end{vmatrix}, \quad (5)$$

² Рожков В. А. Теория и методы статистического оценивания вероятностных характеристик случайных величин и функций с гидрометеорологическими примерами. СПб. : Гидрометеороиздат, 2002. Кн. 2. 780 с.

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

Затем рассчитывался множественный коэффициент корреляции между скалярным (η) и векторным (V) процессами:

$$R_{\eta V} = \sqrt{1 - \frac{D_{\eta V}}{D_{uv}}}. \quad (6)$$

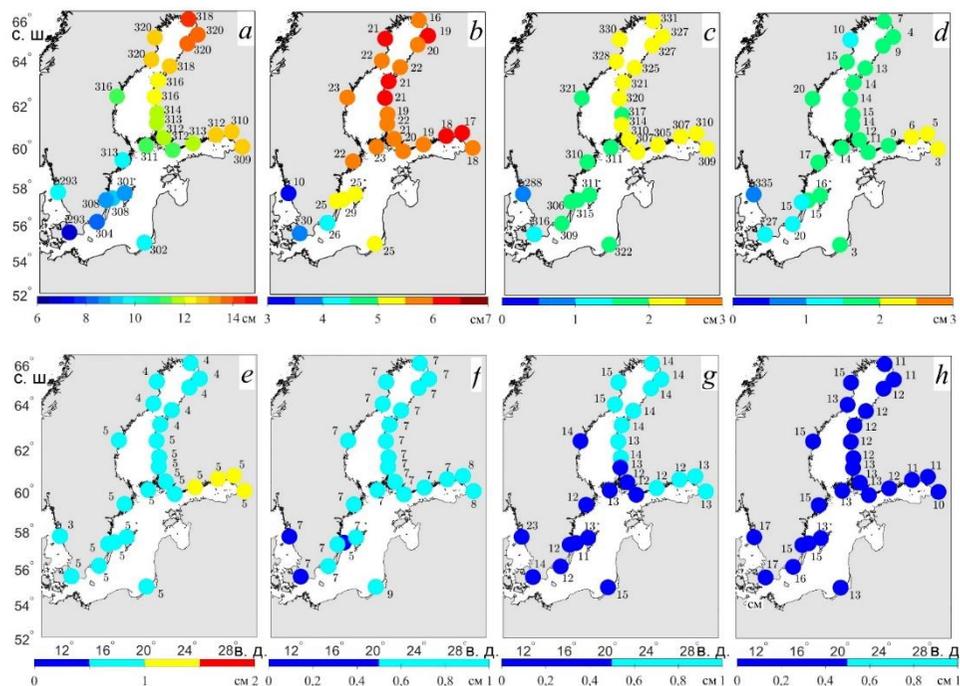
Результаты и их интерпретация

На рис. 4 приведены результаты стационарного гармонического анализа рядов среднесуточных значений уровня Балтийского моря. Они показывают, что на рассматриваемых мареографических станциях Балтийского моря средние амплитуды гармоник Sa, Ssa, Sta, Sqa выделяются достоверно. Минимальная амплитуда сезонных колебаний уровня 6,4 см с периодом один год отмечается на юго-западе Балтики у выхода из прол. Зунд (ст. Клагсхамн) (рис. 4, *a*). На севере прол. Каттегат (ст. Гётеборг) амплитуда Sa возрастает до 9,6 см. При движении от Датских проливов на восток и северо-восток амплитуда этой гармоники увеличивается до 8,7 см на ст. Оскарсхамн, до 9,9 см – на ст. Пионерский в открытой Балтике, до 11,6–12,9 см в Финском заливе (ст. Ханко, Выборг) и достигает максимальных значений 14,5 см на самом севере Ботнического залива (ст. Кеми) (рис. 4, *a*). Оценки пространственных изменений фазы гармоники Sa статистически значимые, и они свидетельствуют, что сначала максимум годовых колебаний уровня моря наступает в октябре на юго-западе Балтики (ст. Клагсхамн), а затем распространяется на север и северо-восток моря, где он отмечается в ноябре. По сравнению с предшествующим двадцатилетием 1951–1970 гг. [1] в рассматриваемый нами период амплитуды гармоники Sa увеличились на 0,9 – 2,2 см, а максимум годовых колебаний стал наступать позже на 1–2 мес.

У полугодовой гармоники Ssa средние амплитуды в 1,6–3,2 раза меньше, чем у Sa . Их наименьшие значения, достигающие 3,0 см, наблюдаются на севере прол. Каттегат (ст. Гётеборг) (рис. 4, *b*). На юго-западе открытой Балтики амплитуда Ssa немного увеличивается до 3,3 см (ст. Клагсхамн) и продолжает расти при движении на север и северо-восток, достигая максимальных значений 6,25 см на северо-востоке Финского залива (ст. Хамина). Статистически достоверное изменение фазы полугодовых колебаний отмечается только в пр. Каттегат, где она увеличивается в юго-восточном направлении на 20°. В открытой Балтике, Ботническом и Финском заливах изменения фазы незначительные и сравнимы со среднеквадратическими ошибками их оценки (рис. 4, *b*).

Средние амплитуды третьегодовых (Sta) и четвертьгодовых (Sqa) гармоник значительно меньше амплитуд гармоник Sa и Ssa , они изменяются от 0,83–0,84 см на севере в пр. Каттегат (ст. Гётеборг) до максимальных значений 2,55–2,57 см на востоке Финского залива (рис. 4, *c, d*). В подавляющем большинстве

случаев амплитуды *Sta* больше, чем *Sqa*, особенно на севере Ботнического залива, где они превышают значения амплитуд *Sqa* в 1,5 раза. Только на севере пр. Каттегат (ст. Гётеборг) и на юго-востоке открытой Балтики (ст. Пионерский) амплитуда *Sta* незначительно меньше амплитуды *Sqa* (рис. 4, *c, d*). Оценки фазы этих гармоник имеют большие стандартные ошибки расчета, которые сравнимы или превышают пространственные изменения фазы этих составляющих сезонных колебаний уровня моря (рис. 4, *g, h*).



Р и с. 4. Амплитудно-фазовые характеристики годовой (*a*), полугодовой (*b*), третьгодовой (*c*) и четвертьгодовой (*d*) составляющих сезонных колебаний уровня Балтийского моря за 1971–2020 гг. по данным мареографических измерений уровня на береговых станциях; среднеквадратические ошибки оценок амплитуд и фаз годовой (*e*), полугодовой (*f*), третьгодовой (*g*) и четвертьгодовой (*h*) гармоник. Цветные кружки – амплитуда (см), цифры – фаза (°)

Fig. 4. Amplitude-phase characteristics of the annual (*a*), semi-annual (*b*), third-annual (*c*) and quarter-annual (*d*) components of seasonal fluctuations of the Baltic Sea level in 1971–2020 estimated from the sea level mareographic measurements data obtained at the coastal stations; root-mean-square errors in the amplitude and phase estimates of the annual (*e*), semi-annual (*f*), third-annual (*g*) and quarter-annual (*h*) harmonics. Colored circles denote the amplitude (cm), numbers – the phase (°).

Сравнение с результатами гармонического анализа из работы [6], в которой рассматривались более продолжительные ряды среднемесячных уровней, охватывающие периоды с начала 1800-х, 1900-х гг. до 2012 г., показывает увеличение амплитуд всех четырех гармоник за последние полвека. Особенно значительное увеличение амплитуды (в 2–6 раз) отмечается у гармоники *Sta*.

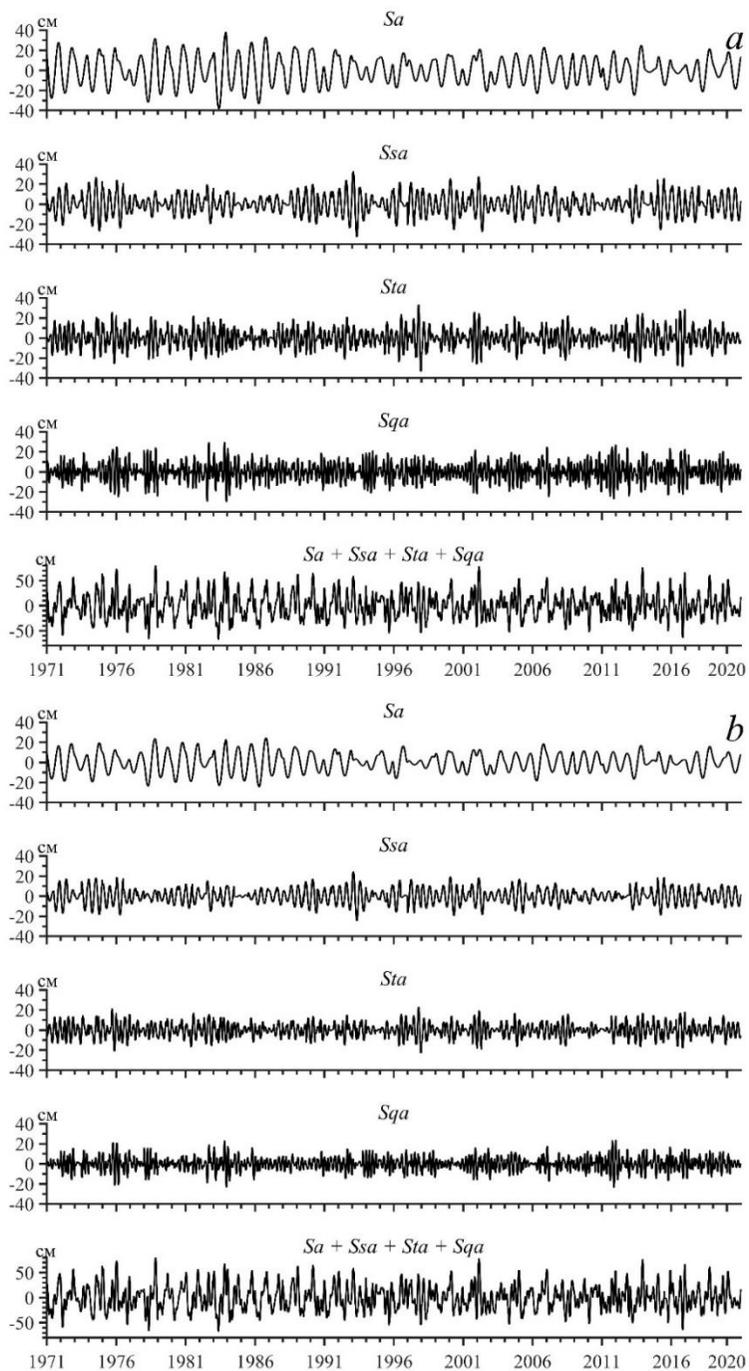


Рис. 5. Ряды составляющих сезонных колебаний уровня моря Sa , Ssa , Sta , Sqa и их суперпозиции $Sa + Ssa + Sta + Sqa$ на ст. Кронштадт (a) и Висби (b), полученные с помощью скользящего гармонического анализа

Fig. 5. The series of sea level seasonal fluctuation components Sa , Ssa , Sta , Sqa and their superpositions $Sa + Ssa + Sta + Sqa$ in Kronstadt (a) and in Visby (b) obtained using a moving harmonic analysis

На рис. 5 показаны примеры рядов составляющих сезонных колебаний уровня моря $\zeta_{sa}(t)$, $\zeta_{ssa}(t)$, $\zeta_{sta}(t)$, $\zeta_{sqa}(t)$, а также их суперпозиции в Финском заливе (ст. Кронштадт) и в открытой Балтике (ст. Висби), оцененные с помощью скользящего гармонического анализа. Отмечается значительная межгодовая изменчивость амплитуд у всех четырех компонент. В отдельные годы их амплитуды достигают 20–40 см, в другие годы они уменьшаются до нескольких сантиметров. На ст. Кронштадт самая большая амплитуда гармоники Sa отмечалась в 1983 г. В этот год произошло самое большое за всю историю Санкт-Петербурга количество наводнений (10 случаев). Во временном ходе амплитуд составляющих Sa , Ssa , Sta , Sqa хорошо прослеживается амплитудная модуляция. У годовой компоненты период модуляции равен ~ 20 годам. Подобную особенность в изменениях годовых колебаний уровня Балтийского моря отмечали авторы работы [20] по результатам анализа рядов среднемесячных значений мареографических измерений уровня моря, выполненного с помощью дискретного вейвлет-преобразования. У компонент Ssa , Sta , Sqa период модуляции изменяется приблизительно в диапазоне 2–10 лет (рис. 5).

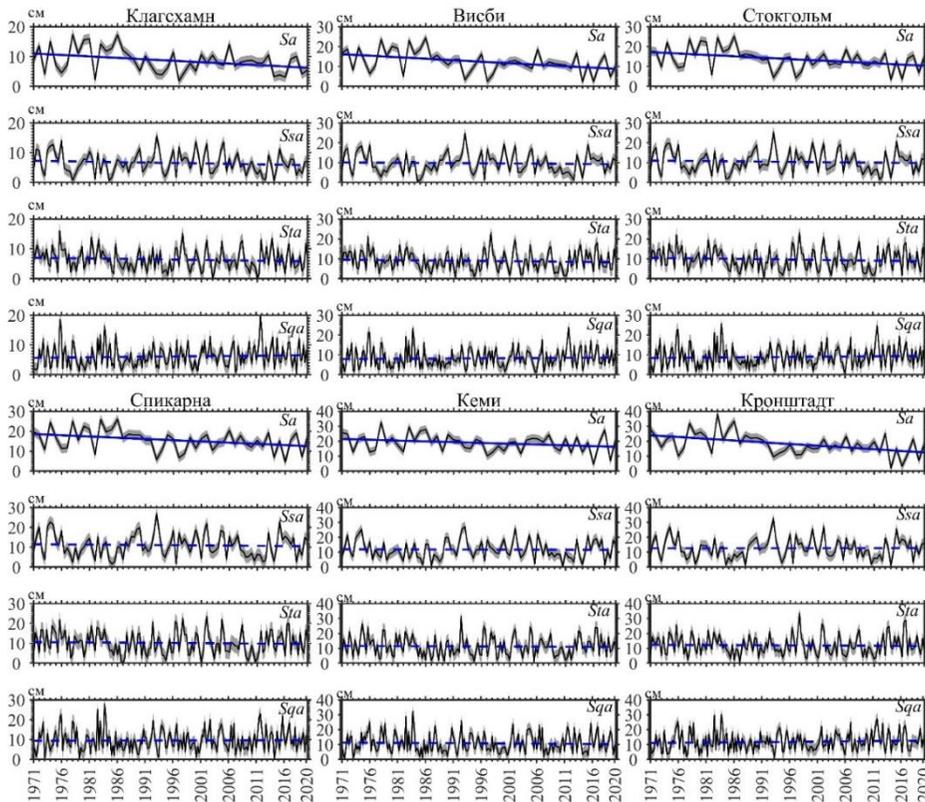
На рис. 6 показаны межгодовые изменения амплитуд гармоник Sa , Ssa , Sta , Sqa за период 1971–2020 гг. на мареографических станциях Балтийского моря. Для гармоники Sa на всех станциях отмечаются значимые отрицательные тренды, свидетельствующие, что в последние полвека в различных районах Балтики происходило уменьшение амплитуды годовой составляющей сезонных колебаний уровня. Самое большое трендовое уменьшение амплитуды у гармоники Sa отмечается на ст. Кронштадт, где она уменьшилась за полвека на 11,5 см. В отличие от гармоники Sa в межгодовой изменчивости амплитуд гармоник Ssa , Sta , Sqa не отмечается значимых линейных трендов.

Наличие значимого отрицательного тренда в изменении гармоники Sa (рис. 6) противоречит результатам работы [16], авторы которой выделили значимый положительный тренд в межгодовых изменениях амплитуды годовой гармоники на ст. Стокгольм за период 1825–1984 гг. Эти различия в знаках тренда могут быть связаны с тем, что на протяжении двух последних столетий отмечались разнонаправленные тенденции в межгодовых изменениях амплитуд годовой составляющей сезонных колебаний уровня Балтийского моря. Большая продолжительность измерений уровня моря на ст. Стокгольм позволяет более детально исследовать межгодовую изменчивость амплитуды годовой гармоники с учетом последних десятилетий.

В табл. 2 приведены результаты взаимного корреляционного анализа межгодовых изменений амплитуды годовой компоненты сезонных колебаний в районах работы различных мареографических станций, которые демонстрируют высокую связь между изменениями амплитуд годовых колебаний уровня в различных регионах моря. Коэффициенты взаимной корреляции изменяются в пределах 0,6–1,0, на ст. Стокгольм – в пределах 0,8–1,0. Эти результаты показывают, что изменения амплитуды годовых колебаний на ст. Стокгольм хорошо отражают ее межгодовые изменения во всем Балтийском море.

Рис. 7 демонстрирует изменения во времени амплитуды годовых колебаний уровня моря на ст. Стокгольм за период 1889–2020 гг., оцененные с помощью скользящего гармонического анализа. В отличие от работы [16], в которой за более ранний период 1825–1984 гг. был получен значимый положительный

тренд в изменениях амплитуды годовых колебаний уровня моря на ст. Стокгольм, в рассматриваемый нами период здесь отмечается уже статистически незначимый положительный тренд, который может свидетельствовать, что в исследуемый нами 132-летний период произошли заметные изменения в режиме гидрометеорологических процессов, определяющих межгодовые изменения годовых колебаний уровня моря. Наблюдаются разнонаправленные тенденции в изменениях амплитуды гармоники Sa . Наиболее значительное увеличение амплитуды годовых колебаний уровня моря отмечалось в периоды с начала 1900-х гг. до середины 1920-х и с 1940-х гг. до начала 1980-х, когда максимальные значения амплитуд достигали 25–27 см. С середины 1880-х гг. до конца 1890-х и с начала 1920-х гг. до начала 1940-х наблюдается заметное уменьшение амплитуды гармоники Sa , когда в отдельные годы ее значения снижались до 1,5–2,5 см. С начала 1980-х гг. по настоящее время наблюдается значительное волнообразное уменьшение амплитуды годовых колебаний.



Р и с. 6. Межгодовые изменения амплитуд четырех компонент сезонных колебаний уровня на различных береговых станциях Балтики (черные кривые). Серым цветом показана среднеквадратическая ошибка расчета амплитуды, синие сплошные и штриховые прямые линии – значимый и незначимый линейные тренды

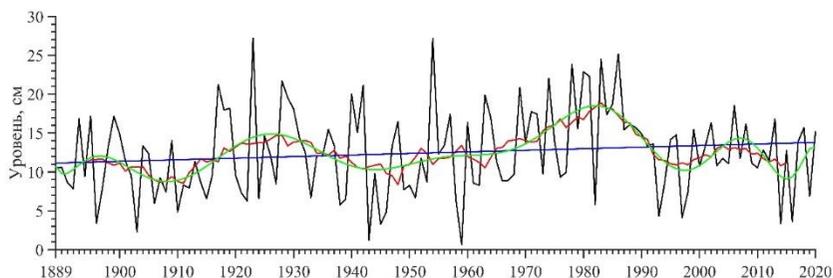
F i g. 6. Interannual changes in the amplitudes of four seasonal level fluctuation components at different coastal stations in the Baltic Sea (black curves). Gray color shows the root-mean-square error in the amplitude calculation, the blue solid and dashed straight lines are the significant and insignificant linear trends

Таблица 2
Table 2

Коэффициенты корреляции между изменениями амплитуды годовой компоненты сезонных колебаний уровня моря на различных мареографических станциях
Correlation coefficients between the changes in the annual component amplitude of the sea level seasonal fluctuations at different mareographic stations. The station names correspond to the numbers in Fig. 1

№ ст. / No	Номера станций (№) / Station numbers (№)																												
	21	11	2	24	23	17	12	3	4	5	15	14	10	19	9	8	20	7	26	29									
21	1,0	0,9	0,8	1,0	1,0	1,0	0,8	0,9	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9								
11	0,9	1,0	0,7	0,9	0,9	1,0	0,9	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8									
2	0,8	0,7	1,0	0,8	0,7	0,8	0,6	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7									
24	1,0	0,9	0,8	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	0,9									
23	1,0	0,9	0,7	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9									
17	1,0	1,0	0,8	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8									
12	0,8	0,9	0,6	0,8	0,8	0,9	1,0	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	0,8	0,8	0,7									
3	0,9	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,6	1,0	1,0	0,9	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8									
4	1,0	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9	0,9									
5	1,0	0,9	0,8	0,9	1,0	0,9	0,8	0,9	1,0	1,0	0,9	0,8	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9									
15	0,9	1,0	0,7	0,9	0,9	1,0	0,9	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8									
14	0,9	1,0	0,7	0,9	0,9	1,0	1,0	0,7	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	0,8									
10	0,9	1,0	0,7	0,9	0,9	1,0	0,9	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8									
19	1,0	1,0	0,8	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9									
9	1,0	1,0	0,8	0,9	1,0	1,0	0,9	0,8	0,9	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8									
8	1,0	0,9	0,8	1,0	1,0	1,0	0,8	0,9	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9									
20	1,0	0,9	0,8	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9									
7	1,0	0,9	0,8	0,9	1,0	0,9	0,8	0,9	1,0	1,0	0,9	0,8	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9									
26	0,9	0,9	0,7	1,0	1,0	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9									
29	0,9	0,8	0,7	0,9	0,9	0,8	0,7	0,8	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0									

Примечание. Названия станций, соответствующие номерам, см. на рис. 1.
Note. See the station names corresponding to the numbers, in Fig. 1.



Р и с. 7. Межгодовые изменения амплитуды годовой компоненты сезонных колебаний уровня моря на ст. Стокгольм за период 1889–2020 гг. (черная кривая), линейный тренд (синяя прямая), полином 15-й степени (зеленая кривая), 11-летнее скользящее среднее (красная кривая)

F i g. 7. Interannual changes in the annual component amplitude of the seasonal sea level fluctuations in Stockholm in 1889–2020 (black curve), linear trend (blue straight line), the 15th grade polynomial (green curve), 11-year moving average (red curve)

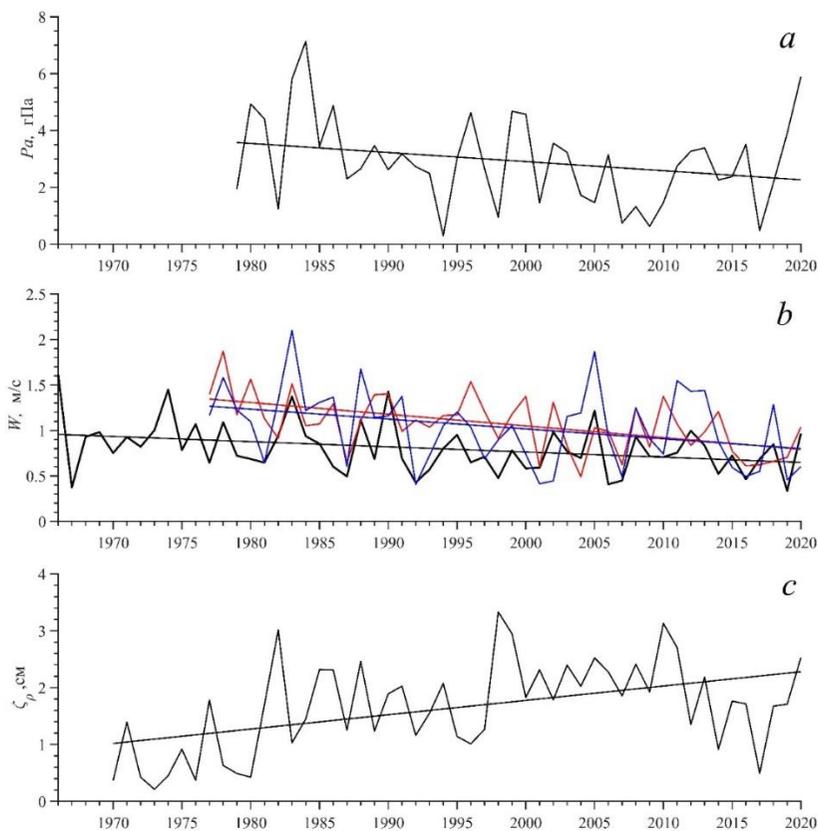
Возникает вопрос о физических механизмах столь значительных изменений во времени характеристик годовых колебаний уровня Балтийского моря и, в частности, о причинах значимого отрицательного тренда в вариациях их амплитуд в последние полвека (рис. 6).

Изучение причин сезонных колебаний уровня моря должно строиться на теоретических представлениях о механизмах его крупномасштабных колебаний. Наиболее полно эти механизмы описаны на основе анализа формализованного уравнения гидростатики [30], а также проинтегрированного по глубине уравнения неразрывности массы [31, 32]. В этих уравнениях скорость изменения уровня моря связана с вариациями динамических, стерических и воднобалансовых процессов. Влияние динамических процессов на изменения сезонных колебаний уровня моря определяется сезонными изменениями атмосферного давления и ветра [30–32]. Стерическая составляющая сезонных возмущений уровня моря связана с сезонными изменениями плотности морской воды [30]. Колебания уровня Балтийского моря, вызываемые изменениями водного баланса, обуславливаются сезонными изменениями атмосферных осадков, материкового стока, испарения и водообмена с Северным морем [32].

Для исследования причин нестационарности годовых колебаний уровня Балтики использовались взаимный корреляционный и регрессионный анализы колебаний уровня моря с различными гидрометеорологическими процессами [2, 18, 19, 21, 33]. Результаты, представленные в перечисленных работах, показали, что наблюдается высокая корреляция между изменениями во времени годовых колебаний уровня моря и зонального ветра, атмосферного давления и температуры воздуха, в то время как с колебаниями речного стока корреляция отсутствовала [21]. Регрессионный анализ также показал определяющий вклад колебаний ветра и атмосферного давления в описание межгодовой изменчивости сезонных колебаний уровня Балтийского моря [20, 33].

В работе [29] для более представительной оценки корреляции между многолетними изменениями составляющих сезонных колебаний уровня Балтийского моря, оцененных по спутниковым альтиметрическим данным, и различных гидрометеорологических процессов было предложено перейти к их аномалиям путем исключения стационарной компоненты из рядов

нестационарных составляющих сезонных колебаний уровня моря и других процессов, полученных с помощью скользящего гармонического анализа. Результаты такого анализа свидетельствовали, что для всех четырех гармоник (Sa , Ssa , Sta , Sqa) отсутствовала связь между аномалиями уровня моря и составляющими пресного баланса (осадки, испарение, материковый сток), в то время как с аномалиями ветра и атмосферного давления отмечалась высокая корреляция [29]. Кроме этого, для гармоники Sa отмечалась высокая связь с годовыми аномалиями температуры воздуха (которые могут быть связаны с термостерическими колебаниями уровня моря), а с годовыми аномалиями водного транспорта через Датские проливы коэффициенты корреляции были низкими. Для гармоник Ssa , Sta , Sqa , наоборот, отмечались высокие коэффициенты корреляции между сезонными аномалиями уровня моря и водного транспорта [29].



Р и с. 8. Межгодовые изменения амплитуды годовой компоненты сезонных колебаний атмосферного давления на ст. Кронштадт (a), скорости ветра на ст. Выборг (черная кривая), Озерки (красная кривая), Пионерский (синяя кривая) (b) и стерических колебаний уровня моря на ст. ВУ-15 (c). Прямые линии – значимые линейные тренды

Fig. 8. Interannual changes in the amplitude of seasonal fluctuations annual component in the atmospheric pressure in Kronstadt (a), wind speed at the hydrometeorological stations Vyborg (black curve), Ozerki (red curve), Pionerskij (blue curve) (b), and steric fluctuations of the sea level at the ВУ-station 15 (c). Straight lines are the significant linear trends

Учитывая результаты перечисленных работ, можно предположить, что наблюдающиеся в последние полвека значимые отрицательные тренды в изменениях амплитуд годовых колебаний уровня должны быть связаны с изменениями годовых колебаний ветра, атмосферного давления и плотности морской воды.

На рис. 8 показаны межгодовые изменения амплитуд гармоника Sa атмосферного давления и ветра на гидрометеорологических станциях Балтийского моря, а также стерических колебаний уровня на станции ВУ-15, полученные по результатам скользящего гармонического анализа. Хорошо видно, что так же, как у изменений годовых колебаний уровня моря (рис. 6), в последние полвека отмечаются значимые отрицательные тренды в изменениях амплитуды годовых колебаний атмосферного давления и ветра (рис. 8, *a*, *b*). Результаты взаимного корреляционного анализа, приведенного ниже, свидетельствуют, что между изменениями годовых аномалий уровня моря $\zeta_{sa}(t)'$ и атмосферного давления $Pa_{sa}(t)'$, а также изменчивостью ветра $W_{sa}(t)'$ на разных станциях отмечаются высокие значения коэффициентов корреляции, достигающие 0,66–0,78, что хорошо согласуется с результатами других работ [2, 18, 19, 21, 33]. Однако в вариациях амплитуды стерических колебаний с периодом один год, наоборот, наблюдается значимый положительный тренд (рис. 8, *c*).

Ниже приведены максимальные значения коэффициентов корреляции R и временные сдвиги τ (в скобках) между аномалиями годовых колебаний уровня моря $\zeta_{sa}(t)'$ и годовыми аномалиями атмосферного давления $Pa_{sa}(t)'$, ветра $W_{sa}(t)'$ и стерических колебаний уровня $\zeta_{\rho_{sa}}(t)'$ в разных районах Балтики:

- $\zeta_{sa}(t)'$ на ст. Кронштадт – $Pa_{sa}(t)'$ на ст. Кронштадт – 0,74 (0)
- $\zeta_{sa}(t)'$ на ст. Кронштадт – $W_{sa}(t)'$ на ст. Озерки – 0,67 (0)
- $\zeta_{sa}(t)'$ на ст. Пионерский – $W_{sa}(t)'$ на ст. Пионерский – 0,78 (0)
- $\zeta_{sa}(t)'$ на ст. Выборг – $W_{sa}(t)'$ на ст. Выборг – 0,66 (0)
- $\zeta_{sa}(t)'$ на ст. Висби – $\zeta_{\rho_{sa}}(t)'$ на ст. ВУ-15 – 0,09 (–1)
- $\zeta_{sa}(t)'$ на ст. Клайпеда – $\zeta_{\rho_{sa}}(t)'$ на ст. ВУ-15 – 0,16 (–1).

Размах изменений амплитуд годовых колебаний атмосферного давления на ст. Кронштадт достигает 6,7 гПа (0,3–7,0 гПа), а их трендовое уменьшение составляет 1,3 гПа (рис. 8, *a*). Согласно закону «обратного барометра», таким изменениям атмосферного давления соответствуют вариации статических колебаний уровня моря в диапазоне 0,3–7,0 см и 1,3 см – в изменениях тренда. Хотя это заметные изменения уровня, но они не являются определяющими для объяснения суммарных изменений амплитуд уровня моря у гармоника Sa на ст. Кронштадт, где амплитуды $\zeta_{sa}(t)$ изменяются в диапазоне 1,8–38,3 см, а их трендовое уменьшение составляет 11,5 см (23,9–12,4 см) (рис. 6).

Максимальная амплитуда стерических колебаний уровня $\zeta_{\rho_{sa}}(t)$ на ст. ВУ-15 очень маленькая (3,3 см), и она более чем в два раза меньше амплитуды годовых статических колебаний уровня (рис. 8). Максимальная амплитуда

суммарных годовых колебаний уровня $\zeta_{sa}(t)$ на ближайшей станции Висби достигает 24,4 см. Взаимный корреляционный анализ между аномалиями $\zeta_{sa}(t)'$ на ст. Висби и Клайпеда с аномалиями $\zeta_{p_{sa}}(t)'$ на ст. ВУ-15 показывает отсутствие связи между этими процессами. Эти результаты свидетельствуют, что межгодовые изменения годовых стерических колебаний уровня моря не могут быть причиной наблюдающихся в последние полвека значимых уменьшений амплитуд гармоник Sa (рис. 6).

С учетом того, что в предыдущих работах показано отсутствие стационарной связи между аномалиями $\zeta_{sa}(t)'$ и годовыми аномалиями составляющих водного баланса [21, 29], полученные здесь результаты позволяют предположить, что основной причиной наблюдающихся в последние полвека значимых уменьшений амплитуды годовых колебаний уровня Балтийского моря являются уменьшения амплитуд годовых колебаний ветра и, в меньшей степени, – атмосферного давления.

Выводы

1. На основе стационарного гармонического анализа показано, что средний сезонный ход уровня в прибрежных районах Балтики наиболее точно описывается суперпозицией не двух (Sa и Ssa), а четырех гармоник: годовой (Sa), полугодовой (Ssa), третьгодовой (Sta) и четвертьгодовой Sqa .

2. Для более точной оценки нестационарности сезонных колебаний уровня моря с помощью скользящего гармонического анализа следует использовать ряды не среднемесячных, а среднесуточных значений уровня моря.

3. Результаты стационарного гармонического анализа рядов среднесуточных значений мареографических измерений уровня на 26 станциях Балтийского моря показали увеличение средней амплитуды составляющих сезонных колебаний уровня Sa , Ssa , Sta , Sqa в последние полвека по сравнению с предыдущими десятилетиями.

4. Средние амплитуды гармоник Sa за период 1971–2020 гг. изменяются от 6,5 см на юго-западе Балтийского моря до 14,5 см на самом севере Ботнического залива. Вторая по величине гармоника Ssa имеет средние амплитуды от 3 см на севере прол. Каттегат до 6,25 см на северо-востоке Финского залива. Средние амплитуды третьгодовых (Sta) и четвертьгодовых (Sqa) гармоник значительно меньше амплитуд гармоник Sa и Ssa и изменяются от 0,83–0,84 см на севере прол. Каттегат (ст. Гётеборг) до максимальных значений 2,55–2,57 см на востоке Финского залива.

5. Результаты скользящего гармонического анализа демонстрируют значительную нестационарность всех четырех компонент сезонных колебаний с выраженной амплитудной модуляцией. У годовой компоненты Sa период модуляции равен приблизительно 20 годам. У компонент Ssa , Sta , Sqa период модуляции изменяется приблизительно от 2 до 10 лет.

6. Межгодовые изменения амплитуды гармоник Sa в разных районах Балтийского моря хорошо связаны между собой и имеют значимые отрицательные тренды в 1971–2020 гг.

7. Оценка нестационарности гармоник Sa на ст. Стокгольм, выполненная на основе скользящего гармонического анализа более продолжительного ряда

среднесуточных значений уровня моря за период 1889–2020 гг., демонстрирует не значимый положительный тренд, на фоне которого наблюдаются разнонаправленные тенденции в изменениях амплитуды гармоника *Sa*. Наиболее значительное увеличение амплитуды годовых колебаний уровня моря отмечалось в периоды с начала 1900-х гг. до конца 1920-х и с 1940-х гг. до начала 1980-х. С начала 1920-х гг. до начала 1940-х и с начала 1980-х гг. по настоящее время наблюдается значительное уменьшение амплитуды годовых колебаний, когда в отдельные годы значения амплитуд снижались до 1,5–4,0 см.

8. Показано, что основной причиной наблюдающихся в последние полвека значимых уменьшений амплитуд годовых колебаний уровня Балтийского моря являются уменьшения амплитуд годовых колебаний ветра и, в меньшей степени, – атмосферного давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 3. Балтийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Отв. ред. Ф. С. Терзиев. Л. : Гидрометеоздат, 1992. 456 с.
2. *Cheng Y., Xu Q., Li X.* Spatio-Temporal Variability of Annual Sea Level Cycle in the Baltic Sea // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, iss. 4. 528. doi:10.3390/rs10040528
3. *Männikus R., Soomere T., 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. 106827. doi:10.1016/j.ecss.2020.106827
4. *Lisitzin E.* Sea-level changes. Amsterdam : Elsevier, 1974. 286 p. (Elsevier Oceanographic Series, vol. 8). <https://doi.org/10.4319/lo.1975.20.4.0681>
5. *Ekman M.* A Common Pattern for Interannual and Periodical Sea Level Variations in the Baltic Sea and Adjacent Waters // *Geophysica*. 1996. Vol. 32, iss. 3. P. 261–272.
6. *Медведев И. П.* Сезонные колебания уровня Балтийского моря // *Метеорология и гидрология*. 2014. № 12. С. 42–54.
7. *Łabuz T., Kowalewska-Kalkowska H.* Coastal erosion caused by the heavy storm surge of November 2004 in the southern Baltic Sea // *Climate Research*. 2011. Vol. 48, iss. 1. P. 93–101. doi:10.3354/cr00927
8. Sea level dynamics and coastal erosion in the Baltic Sea region / R. Weisse [et al.] // *Earth System Dynamics*. 2021. Vol. 12. P. 871–898. doi:10.5194/esd-12-871-2021
9. *Ekman M.* The Changing Level of the Baltic Sea during 300 Years: A Clue to Understanding the Earth. Åland Islands : Summer Institute for Historical Geophysics, 2009. 155 p.
10. *Gustafsson B. G., 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, iss. C9. P. 19731–19744. doi:10.1029/2000JC000593
11. *Samuelsson M., Stigebrandt A.* Main characteristics of the long-term sea level variability in the Baltic Sea // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 1996. Vol. 48, iss. 5. P. 672–683. doi:10.3402/TELLUSA.V48I5.12165
12. *Гордеева С. М., Калинин В. Н.* Изменчивость морского уровня Финского залива. Санкт-Петербург : РГМУ, 2014. 178 с.
13. *Захарчук Е. А., Тихонова Н. А.* О пространственно-временной структуре и механизмах формирования невских наводнений // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 8. С. 54–64.
14. *Wübbler C., Krauss W.* The two dimensional seiches of the Baltic Sea // *Oceanologica Acta*. 1979. Vol. 2, iss. 4. P. 435–446. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00122/23360>
15. Spatiotemporal structure of Baltic free sea level oscillations in barotropic and baroclinic conditions from hydrodynamic modeling / E. A. Zakharchuk [et al.] // *Ocean Science*. 2021. Vol. 17. P. 543–559. doi:10.5194/os-17-543-2021

16. *Ekman M., 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, iss. C4. P. 5379–5383. <https://doi.org/10.1029/JC095iC04p0537>
17. *Ekman M.* Secular Change of the Seasonal Sea Level Variation in the Baltic Sea and Secular Change of the Winter Climate // *Geophysica.* 1998. Vol. 34, iss. 3. P. 131–140.
18. *Plag H.-P., Tsimplis M. N.* Temporal variability of the seasonal sea-level cycle in the North Sea and Baltic Sea in relation to climate variability // *Global Planetary Change.* 1999. Vol. 20, iss. 2–3. P. 173–203. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(98\)00069-1](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(98)00069-1)
19. *Hünicke B., Zorita E.* Trends in the amplitude of Baltic Sea level annual cycle // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography.* 2008. Vol. 60, iss. 1. P. 154–164. doi:10.1111/j.1600-0870.2007.00277.x
20. *Barbosa S. M., Donner R. V.* Long-term changes in the seasonality of Baltic sea level // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography.* 2016. Vol. 68, iss. 1. 30540. doi:10.3402/tellusa.v68.30540
21. *Stramska M., Kowalewska-Kalkowska H., Świrgoń M.* Seasonal variability in the Baltic Sea level // *Oceanologia.* 2013. Vol. 55, iss. 4. P. 787–807. doi:10.5697/oc.55-4.787
22. *Cartwright D. E.* On the smoothing of climatological time series, with application to sea-level at Newlyn // *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society.* 1983. Vol. 75, iss. 3. P. 639–658. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1983.tb05003.x>
23. *New Data Systems and Products at the Permanent Service for Mean Sea Level / S. J. Holgate [et al.]* // *Journal of Coastal Research.* 2013. Vol. 29, iss. 3. P. 493–504. doi:0.2112/JCOASTRES-D-12-00175.1
24. *Voinov G. N.* Tides and tidal streams // *Polar Seas Oceanography. An integrated case study of the Kara Sea / Eds. V. A. Volkov, O. M. Johannessen, V. E. Borodachov, G. N. Voinov, L. H. Pettersson, L. P. Bobylev, A. V. Kouraev.* Chichester, UK : Springer, Praxis Publishing, 2002. P. 147–217.
25. *Pajak K., 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, iss. 5. P. 1768–1780. doi:10.1016/J.ASR.2018.11.022
26. *Pugh D. T.* Tides, Surges and Mean Sea-Level. Swindon, UK : John Wiley & Sons, 1987. 472 p.
27. *Jackett D. R., McDougall T. J.* Minimal Adjustment of Hydrostatic Profiles to Achieve Static Stability // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.* 1995. Vol. 12, iss. 2. P. 381–389. doi:10.1175/1520-0426(1995)012%3C0381:MAOHPT%3E2.0.CO;2
28. *Белоненко Т. В., Колдунов А. В.* Стерические колебания уровня в северо-западной части Тихого океана // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География.* 2006. № 3. С. 81–87.
29. *Seasonal fluctuations in the Baltic Sea level determined from satellite altimetry / E. A. Zakharchuk [et al.]* // *Continental Shelf Research.* 2022. Vol. 249. 104863. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2022.104863>
30. *Gill A. E., Niller P. P.* The theory of the seasonal variability in the ocean // *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts.* 1973. Vol. 20, iss. 2. P. 141–177. doi:10.1016/0011-7471(73)90049-1
31. *Фукс В. П.* Гидродинамические основы интерпретации альтиметрических съемок морской поверхности // *Колебания уровня в морях.* Санкт-Петербург : РГТУ, 2003. С. 79–91.
32. *Leppäranta M., Myrberg K.* *Physical Oceanography of the Baltic Sea.* Berlin, Heidelberg : Springer, 2009. 300 p. (Springer Praxis Books, Gophysical Sciences Series). doi:10.1007/978-3-540-79703-6
33. *Johansson M. M., 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.

Об авторах:

Захарчук Евгений Александрович, заведующий кафедрой океанологии, Санкт-Петербургский государственный университет (199178, Россия, г. Санкт-Петербург, 10 линия В. О., д. 33-35) ; директор Санкт-Петербургского отделения, Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова (199026, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0001-6079-5739**, **ResearcherID: N-1644-2013**, **Scopus Author ID: 6603158329**, **SPIN-код: 7724-4240**, eazakharchuk@yandex.ru

Тихонова Наталья Александровна, доцент кафедры океанологии, Санкт-Петербургский государственный университет (199178, Россия, г. Санкт-Петербург, 10 линия В. О., д. 33-35) ; завлабораторией Санкт-Петербургского отделения, Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова (199026, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-4546-4920**, **ResearcherID: I-4647-2015**, **Scopus Author ID: 11239410500**, **SPIN-код: 9870-7279**, i@ntikhonova.ru

Сухачев Владимир Николаевич, научный сотрудник Института наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет (199178, Россия, г. Санкт-Петербург, 10 линия В. О., д. 33-35) ; научный сотрудник Санкт-Петербургского отделения, Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова (199026, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38), **ORCID ID: 0000-0003-4821-4342**, **ResearcherID: N-7470-2015**, **Scopus Author ID: 55969236600**, **SPIN-код: 4963-7802**, syhachev@mail.ru

Литина Екатерина Николаевна, научный сотрудник Института наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет (199178, г. Россия, Санкт-Петербург, 10 линия В. О., д. 33-35) ; научный сотрудник Санкт-Петербургского отделения, Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова (199026, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38), **ORCID ID: 0000-0003-1069-1768**, **ResearcherID: I-4667-2015**, **Scopus Author ID: 56534229800**, **SPIN-код: 1777-7640**, warzuga@yandex.ru