

УДК 551.461.22

Рубрика 37.25.23

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ВКЛАД МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ИЗМЕНЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ВОДЫ И СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО БАЛАНСА В МЕЖГОДОВУЮ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СЕЗОННЫХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

COMPARATIVE CONTRIBUTION OF METEOROLOGICAL PROCESSES, CHANGES IN WATER DENSITY AND COMPONENTS OF THE WATER BALANCE TO THE INTERANNUAL VARIABILITY OF SEASONAL FLUCTUATIONS IN THE BALTIC SEA LEVEL

Виноградов Михаил Владимирович^{1,2}, Захарчук Евгений Александрович², Тихонова Наталья Александровна^{1,2}, Сухачёв Владимир Николаевич¹

¹ ГОИН имени Н.Н.Зубова, Санкт-Петербург

² СПбГУ, Санкт-Петербург

Vinogradov Mikhail Vladimirovich^{1,2}, Zakharchuk Evgeny Alexandrovich², Tikhonova Natalya Alexandrovna^{1,2}, Sukhachev Vladimir Nikolaevich¹

¹ GOIN named after N.N. Zubov, St. Petersburg

² St. Petersburg State University, St. Petersburg

Введение

В настоящий момент Мировой океан испытывает значительное влияние глобального потепления климата: тепловое расширение, перестройка общей циркуляции атмосферы, таяние полярных и материковых ледников - всё это приводит к интенсивному подъёму среднего уровня моря, в среднем, на $3,30 \pm 0,3$ мм/год (Guérou и др. 2023), угрожающему безопасности густонаселённых прибрежных территорий в среднесрочной перспективе. При этом отмечаются такие регионы, как Балтийское море, где наблюдаемый средний рост уровня не только превышает среднемировую тенденцию ($4.00 \pm 0,5$ мм/год), но и продолжает усиливаться (Madsen et al., 2019). При этом механизм этой региональной особенности до сих пор остается слабо изученным, вызывая большой интерес среди учёного сообщества (Agha Karimi, Bagherbandi, и Noremuz 2021; Hünicke, Zorita, и Von Storch 2017; Gräwe и др. 2019). В настоящем исследовании были выявлены основные причины межгодовой изменчивости сезонных колебаний уровня Балтийского моря. В качестве исходных данных использовались наблюдения спутниковой альтиметрии (AVISO), морского (Baltic Sea Physics Analysis and Forecast) и атмосферного реанализов (ERA-5) за период 1993-2021 гг. С помощью модели множественной регрессии были получены количественные оценки вкладов режимобразующих факторов в крупномасштабные возмущения уровня Балтийского моря, выявлены ведущие гидрометеорологические процессы, а также проведены соответствующие оценки качества результатов.

Данные и методы

Для изучения межгодовой изменчивости уровня Балтийского моря и его режима были использованы данные дистанционного зондирования Земли за период 1993-2021 гг. В качестве данных по уровню моря и водообмену в Датских проливах использовались, соответственно, аномалии среднего уровня моря (Рис 1) и скорости морских течений продукта спутниковой альтиметрии AVISO+ с дискретностью 1 день и пространственным разрешением $0.25 \times 0.25^\circ$. Для расчёта стерических колебаний использовались поля температуры и солёности модели морского реанализа Baltic Sea Physics Analysis and Forecast с дискретностью 1 день, горизонтальным разрешением $0.125 \times 0.125^\circ$ и вертикальным разрешением в 56 отдельных горизонтов. В качестве гидрометеорологических параметров были взяты данные атмосферного реанализа ERA-5 (атмосферное давление, горизонтальные составляющие ветра, количество осадков, испарение и речной сток) с дискретностью 1 день и пространственным разрешением $0.25 \times 0.25^\circ$.

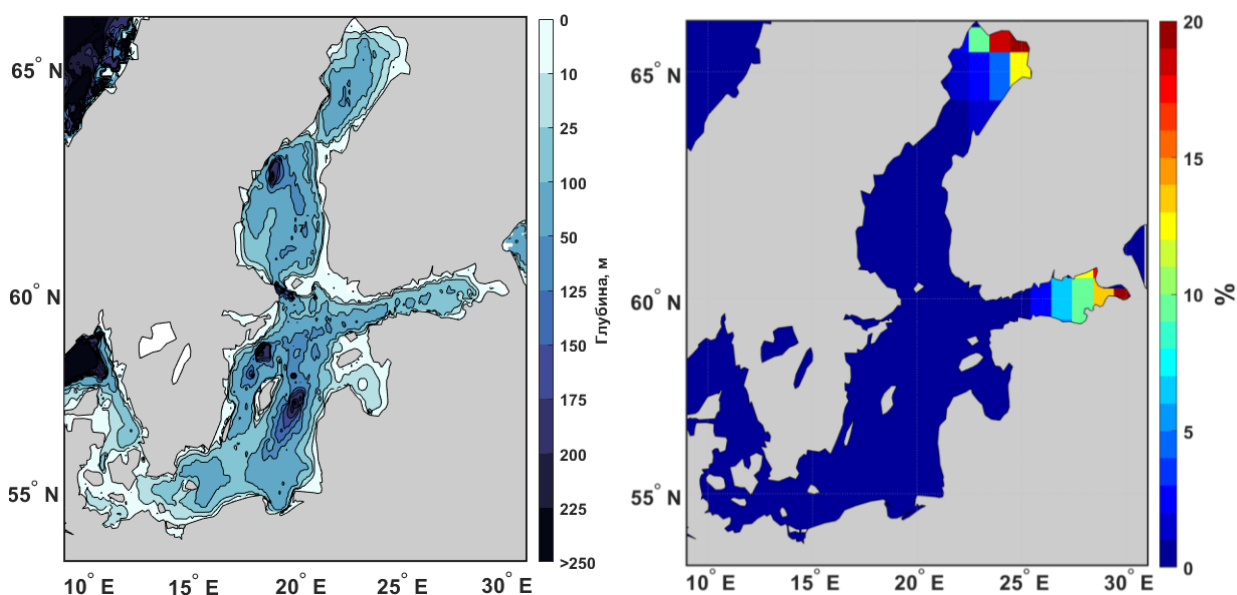


Рис 1. а) Батиметрическая карта Балтийского моря, б) Количество пропусков в данных уровня по измерениям альтиметрии, выраженное в процентах от общего количества наблюдений в каждой ячейке.

Расчёт количественных вкладов гидрометеорологических параметров в аномалии сезонной изменчивости уровня Балтийского моря производился на основании известных теоретических представлений о крупномасштабных колебаниях уровня моря (Leppäranta и Myrberg 2009; Lisitzin 1974; Gill и Niller 1973). В соответствии с ними, локальная изменчивость уровня моря определяется 3-мя группами факторов: динамическими процессами, индуцируемыми анемобарической (давление и ветер) нагрузкой атмосферы, стерическими колебаниями уровня, характеризующими изменения плотности морской воды, и изменениями составляющих водного баланса (водообмен, количество осадков, испарение, речной сток).

Сезонная изменчивости уровня и гидрометеорологических предикторов рассчитываются в стационарном и нестационарном приближении путём модуляции 4-х гармоник: годовой

– 365.2 дней, полугодовой – 182.6 дней, треть-годовой – 121.8 дней, четверть-годовой – 91.3 дней). В стационарном приближении сезонный ход величин вычислялся методом наименьших квадратов путём восстановления ряда по амплитуде и фазе. В нестационарном приближении сезонный ход величин вычисляется с помощью скользящего Фурье анализа, проводимого на периодах квазистационарности, равных 2-м периодам соответствующих гармоник, с перекрытием в половину длины этого отрезка. Исключение составляет годовая гармоника, для которой производился скользящий Фурье анализ без перекрытия на периодах квазистационарности, равных периоду самой гармоники (1 год). Межгодовые аномалии гармоник рассчитывались посредством вычитания их стационарных рядов из нестационарных.

На первом этапе работы для проверки гидрометеорологических факторов на взаимосвязанность между ними производился взаимный корреляционный анализ. Параметры с низкой кросс-корреляцией выбирались в качестве будущих независимых предикторов математической модели.

На втором этапе производилась оценка количественного вклада гидрометеорологических факторов в колебания уровня моря. Для этого использовалось уравнение множественной линейной регрессии с нормированными на стандартное отклонение параметрами предиктанта и предикторов:

$$\xi^n(t) = a_0 + a_1 \zeta_c^n + a_2 Q^n + a_3 P^n + a_4 \tau_x^n + a_5 \tau_y^n + a_6 O^n + a_7 I^n + a_8 C^n;$$

Где $\xi^n(t)$ – аномалия уровня моря, ξ_c^n – стерические колебания уровня моря, Q^n – водообмен через Датские проливы, P^n – атмосферное давление, τ_x^n и τ_y^n – зональная и меридиональная составляющие тангенциального напряжения ветра, O^n – осадки, I^n – испарение, C^n – материковый сток, $a_0 \dots a_8$ – коэффициенты математического разложения.

Сами значения вкладов определялись формулой:

$$V_i = \frac{a_i}{\sum_{j=1}^8 a_j} * 100\% ;$$

Где V_i – вклад (в %) i -ого предиктора в общую дисперсию предиктанта.

На третьем заключительном этапе исследования проводилась оценка качества построенной модели путём реконструкции модельного ряда в отдельных тестовых точках, его сравнения с исходным рядом и статистического анализа точности.

Результаты

Взаимный корреляционный анализ (Рис 2) показал довольно слабую связь между рассматриваемыми гидрометеорологическими параметрами Балтийского моря для каждой из 4-х гармоник: большинство значений корреляционных матриц (от 85 до 90 % без учёта диагонали) оказалось в пределах интервала 0.00–0.30 по модулю. Наиболее же тесные связи (0.30–0.55 по модулю) регулярно прослеживались лишь между атмосферным давлением, атмосферными осадками, зональной составляющей ветра и транспортом. Низкая корреляционная зависимость между параметрами позволяет

подтвердить целесообразность их использования в качестве независимых предикторов регрессионной модели уровня моря.

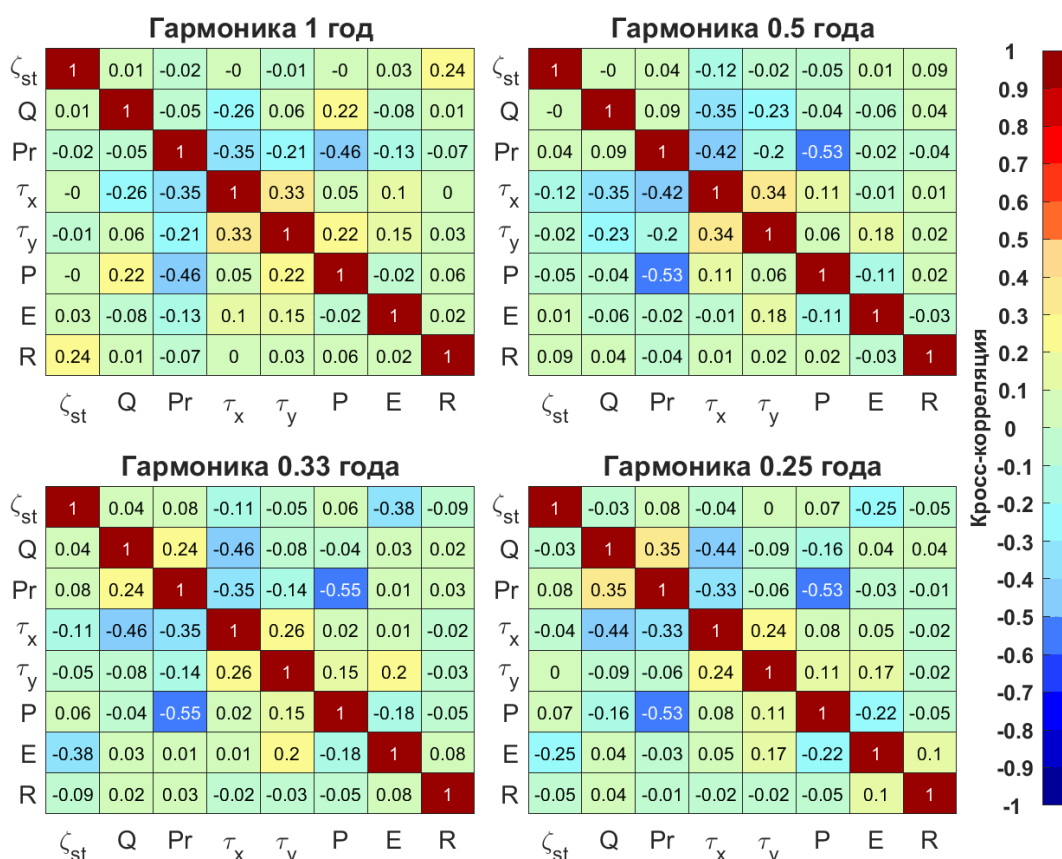


Рис 2. Матрицы кросс-корреляции предикторов множественной регрессии: стерических колебаний уровня (ζ_{st}), транспорта Датских проливов (Q), атмосферного давления (Pr), горизонтальных составляющих тангенциального напряжения ветра (τ_x и τ_y), количества осадков (P), испарения (E) и речного стока (R) в Балтийском море за период 1993-2021 гг.

Анализ результатов множественной регрессионной модели (Рис 3) позволил оценить количественные вклады различных гидрометеорологических факторов в межгодовой ход сезонных колебаний уровня Балтийского моря. Было установлено, что наибольший вклад в динамику уровня на каждой из 4-х гармоник вносят всего 3 основных предиктора: ветровое воздействие, изменения водообмена в Датских проливах и статический эффект давления атмосферы. Причём, распределение вкладов каждого из них оказывается неоднородным как в пространстве, так и между гармониками. Для параметра ветровой нагрузки максимальный вклад отмечается в юго-восточной части Балтийского моря, закономерно увеличиваясь с периодом гармоник от 45-50% (гармоника 0.25 лет) до 65-70% (гармоника 1.0 лет). Водообмен с Северным морем оказывает равномерное воздействие на межгодовые колебания уровня (примерно на 25-30%) почти на всей акватории моря, слегка увеличиваясь (до 35-40 %) на юге Ботнического залива и в центральной Балтике, но значительно уменьшаясь (до 10-15%) в направлении более низких частот. Влияние статического эффекта атмосферного давления локализуется, преимущественно, в северо-западной части Балтики и неравномерно усиливается в сторону длинноволновой части от 25-35% до 30-40%. Что касается остальных параметров (стерические колебания, осадки, испарение, речной сток), то их вклад по отдельности оказывается незначительным, находясь в пределах 5-10%.

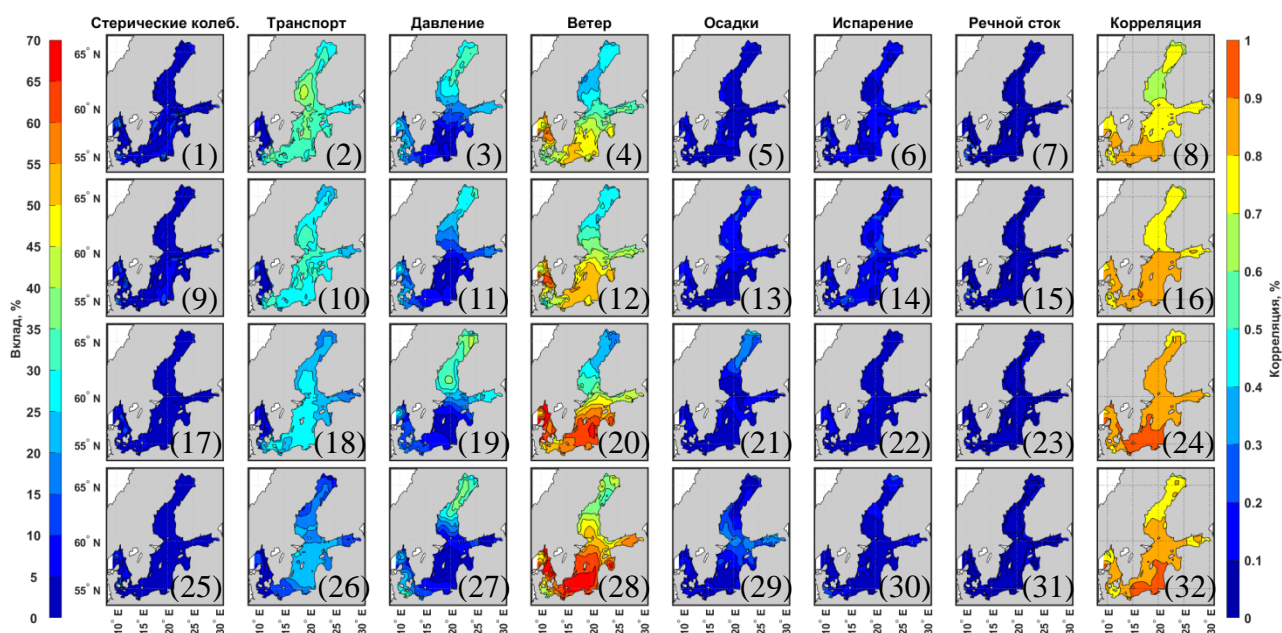


Рис 3. Распределение количественных вкладов (%) основных гидрометеорологических факторов в межгодовую изменчивость сезонных колебаний уровня и оценок корреляции множественной регрессии для Балтийского моря для гармоник 0.25 года (1-8), 0.33 года (9-16), 0.5 года (17-24) и 1 год (25-32) за период 1993-2021 гг.

Заключение

На основании результатов данного исследования было получено представление об основных механизмах межгодовой изменчивости сезонных колебаний уровня Балтийского моря за период 1993-2021 гг. Согласно оценкам количественных вкладов гидрометеорологических параметров было установлено, что наибольшую роль в динамике уровня моря (суммарно до 80-90%) играют 3 главных фактора: ветер, водообмен с Северным морем и атмосферное давление. Причём для каждого из них прослеживается выраженная пространственная закономерность: действие ветровой нагрузки локализуется на юго-востоке моря, атмосферного давления – на северо-западе моря, а влияние водообмена равномерно распределяется по всей акватории. Также, с уменьшением частоты гармоники в межгодовом ходе сезонных колебаний уровня моря проявляется тенденция к увеличению анемобарических составляющих и ослаблению транспортной составляющей.

Финансирование

Работа выполнена благодаря гранту РФФ 22-27-00209 «Пространственная структура и механизмы межгодовой изменчивости сезонных колебаний уровня Балтийского моря».

Список литературы:

1. Agha Karimi, Armin, Mohammad Bagherbandi, и Milan Horemuz. 2021. «Multidecadal Sea Level Variability in the Baltic Sea and Its Impact on Acceleration Estimations». *Frontiers in Marine Science* 8. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2021.702512>.
2. Gill, A. E., и P. P. Niller. 1973. «The theory of the seasonal variability in the ocean». *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts* 20 (2): 141–77. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(73\)90049-1](https://doi.org/10.1016/0011-7471(73)90049-1).

3. Gräwe, Ulf, Knut Klingbeil, Jessica Kelln, и Sönke Dangendorf. 2019. «Decomposing Mean Sea Level Rise in a Semi-Enclosed Basin, the Baltic Sea». *Journal of Climate* 32 (11): 3089–3108. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0174.1>.
4. Guérou, Adrien, Benoit Meyssignac, Pierre Prandi, Michaël Ablain, Aurélien Ribes, и François Bignalet-Cazalet. 2023. «Current Observed Global Mean Sea Level Rise and Acceleration Estimated from Satellite Altimetry and the Associated Measurement Uncertainty». *Ocean Science* 19 (2): 431–51. <https://doi.org/10.5194/os-19-431-2023>.
5. Hünicke, Birgit, Eduardo Zorita, и Hans Von Storch. 2017. «The Challenge of Baltic Sea Level Change». В *Coastline Changes of the Baltic Sea from South to East*, под редакцией Jan Harff, Kazimierz Furmańczyk, и Hans Von Storch, 19:37–54. Coastal Research Library. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49894-2_3.
6. Leppäranta, Matti, и Kai Myrberg. 2009. *Physical Oceanography of the Baltic Sea*. Springer Science & Business Media.
7. Lisitzin, E. 1974. *Sea-Level Changes*. Elsevier.