

Многолетняя динамика среднегодовых высот волн в Балтийском море

А. Н. Соколов^{1, 2, ✉}, Б. В. Чубаренко¹

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

² Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия
✉ tengritag@gmail.com

Поступила в редакцию 01.10.2024; одобрена после рецензирования 16.10.2024;
принята к публикации 29.01.2025.

Аннотация

Цель. Цель исследования – выявить временные интервалы с 50-х гг. XX в., когда среднегодовые высоты волн в Балтийском море имели тенденции к росту или снижению, оценить статистическую значимость потенциальных временных трендов, а также определить характер статистической связи среднегодовых высот волн на Балтике с североатлантическим колебанием.

Методы и результаты. Для анализа было выбрано несколько точек, расположенных в различных частях Балтийского моря, данные о среднегодовых высотах волн в которых охватывали временные интервалы длительностью несколько десятков лет и были получены инструментальными методами (одна точка), по натурным наблюдениям (две точки) и по результатам моделирования (шесть точек). Временные серии среднегодовых высот волн в этих точках были разделены на временные отрезки условной монотонности с преимущественными тенденциями к росту или снижению. Оценка скоростей изменения высоты волн на каждом из отрезков и статистической значимости потенциальных временных трендов проводилась непараметрическими методами. Оказалось, что в большинстве случаев тренды на рассматриваемых временных отрезках статистически значимы на уровне 90% и более, а скорости изменения по тренду могут составлять от 5 до 20 мм/год. Статистическая связь среднегодовых высот волн с североатлантическим колебанием оценивалась с помощью корреляционного анализа Пирсона и Спирмена. Коэффициенты корреляции между индексами североатлантического колебания и среднегодовыми высотами волн оказались статистически значимыми на уровне 90% и более. Их численные значения в рамках межгодовой изменчивости составили 0,3–0,6, между скользящими пятилетними средними 0,4–0,8.

Выводы. Фазы роста и снижения высот волн в Балтийском море чередуются, а продолжительность каждой из фаз составляет ~ 20 лет. Временные тренды для каждой из фаз статистически значимы, по крайней мере в некоторых точках моря. Корреляционная связь между индексом североатлантического колебания и среднегодовыми высотами волн статистически значима, но не высока. Такая корреляция может объяснить ~ 30–65% изменения волновых характеристик.

Ключевые слова: Балтийское море, значительная высота волны, NAO индекс, временной тренд, статистическая значимость, коэффициент корреляции

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0025).

Для цитирования: Соколов А. Н., Чубаренко Б. В. Многолетняя динамика среднегодовых высот волн в Балтийском море // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 2. С. 171–184. EDN WCIPIJM.

Long-Term Dynamics of the Annual Average Wave Heights in the Baltic Sea

A. N. Sokolov^{1, 2, ✉}, B. V. Chubarenko¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

✉ tengritag@gmail.com

Abstract

Purpose. The paper is purposed at revealing the time periods since the mid-20th century when the annual average wave heights in the Baltic Sea tended to increase or decrease, at assessing the statistical significance of potential time trends, as well as at analyzing the statistical relationship between annual average wave heights in the Baltic Sea and the North Atlantic Oscillation.

Methods and Results. The analysis is based on several points located in different parts of the Baltic Sea, in which the data on annual average wave heights cover the time intervals of several decades and are obtained by the instrumental methods (one point), from the field observations (two points) and modeling results (six points). The time series of annual average wave heights at these points are divided into the time segments of conditional monotony with predominant tendencies towards growth or decline. The rates of change in wave heights at each segment and the statistical significance of potential time trends are assessed using the non-parametric techniques. In the majority of cases, the trends within the segments under consideration are found to be statistically significant at the 90% level or more, and the rates of change in the trend can range from 5 to 20 mm per year. The statistical relationship between annual average wave heights and the North Atlantic Oscillation is evaluated using the Pearson and Spearman correlation analysis. The correlation coefficients between the North Atlantic Oscillation indices and the annual average wave heights are statistically significant at the 90% level or more. Their numerical values within the interannual variability range constitute 0.3–0.6 and those between the five-year moving averages – 0.4–0.8.

Conclusions. The increasing and decreasing phases in wave heights in the Baltic Sea alternate, at that each phase lasts ~ 20 years. The time trends for each phase are statistically significant at least at some points in the sea. The correlation between the North Atlantic Oscillation index and the annual average wave heights is statistically significant but not high. Such correlation can account for ~ 30–65% of the variations in wave characteristics.

Keywords: Baltic Sea, significant wave height, NAO index, time trend, statistical significance, correlation coefficient

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of state assignment of IO RAS (theme FMWE-2024-0025).

For citation: Sokolov, A.N. and Chubarenko, B.V., 2025. Long-Term Dynamics of the Annual Average Wave Heights in the Baltic Sea, *Physical Oceanography*, 32(2), pp. 197-210.

Введение

Можно считать, что визуальные наблюдения ветроволновой обстановки на Балтике с ее письменной фиксацией проводятся на судах и в различных частях побережья с начала XIX в. [1], т. е. с того времени, когда появилась известная шкала Бофорта для оценки силы ветра и высоты волнения, признанная впоследствии Всемирной метеорологической организацией¹. При визуальных

¹ The Beaufort Scale of Wind Force (Technical and Operational Aspects): Report submitted by the President of the Commission for Maritime Meteorology to the WMO Executive Committee at its twenty-second session. Geneva : WMO, 1970. 22 p. (Reports on Marine Science Affairs ; No. 3).

наблюдениях человек интуитивно концентрирует свое внимание на относительно больших волнах, не обращая внимание на мелкие, т. е. оценивает не высоту индивидуальных волн, а некое общее состояние моря [2, с. 49–50]). Очевидно, что такие оценки достаточно субъективны и не очень точны. Инструментальные измерения с точной фиксацией параметров волнения начались в Балтийском море лишь в 70-х гг. прошлого века [3]. Современные волнографы позволяют определить как характеристики индивидуальных волн, проходящих через точку установки прибора, так и статистические параметры волнения, которые можно соотнести со шкалой Бофорта.

Одной из самых важных статистических характеристик волнения является так называемая «значительная» высота волны (*significant wave height, SWH*), определяемая как средняя высота одной трети самых высоких волн из зарегистрированных в данной точке. Именно этот параметр опытный наблюдатель зрительно оценивает как «высоту» волны. Далее в работе будет идти речь именно о «значительных» высотах волн и мы будем использовать аббревиатуру *SWH*.

Исследованию параметров волнового режима Балтийского моря посвящено много работ [4]. Однако основное внимание авторы большинства из них уделяют пространственному распределению *SWH*. Временная изменчивость анализируется в гораздо меньшем количестве работ [1, 5–9].

Параметры волнового режима Балтийского моря непосредственно связаны с глобальными процессами циркуляции атмосферы, в частности с циклонической активностью. Известно [10, с. 11–12], что на траектории и интенсивность атмосферных вихрей над Атлантикой и Европой в значительной степени влияет так называемое североатлантическое колебание (*North Atlantic Circulation, NAO*). Типичное состояние атмосферы над Северной Атлантикой характеризуется Азорским максимумом и Исландским минимумом. Если эти экстремумы ярко выражены (между ними существует большой перепад давления), мы имеем дело с положительной фазой *NAO*, в противном случае – с отрицательной. Для количественной оценки явления используется индекс *NAO*, среднемесячные значения которого с января 1950 г. по настоящее время публикуются Центром прогноза климата США ².

Работы, посвященные анализу связи североатлантического колебания с высотами волн в различных акваториях, появились в 90-х гг. прошлого века. Так, в работе [11] рассматривается зависимость в период 1962–1988 гг. между *SWH* в Северной Атлантике и градиентом давления между Азорским максимумом и Исландским минимумом. Отмечается наличие статистической связи как между среднегодовыми, так и между среднемесячными значениями сравниваемых величин. Здесь же впервые делается предположение, что с североатлантическим колебанием прежде всего связана межгодовая изменчивость *SWH*, а не многолетние тренды. Это предположение для региона Северной Атлантики и Северного моря далее развивается в работах [12–14], причем отмеча-

² Near Real-Time Ocean / Atmosphere. Monitoring, Assessments, and Prediction / Chief ed. W. Shi, eds. M. L'Heureux, E. LaJoie. U.S. Department of Commerce, 2025. 87 p. (Climate Diagnostics Bulletin ; February 2025). URL: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/CDB/CDB_Archive_pdf/CDB.monthly_color.pdf (date of access: 25.03.2025).

ется, что среднегодовые *SWH* лучше коррелируют с индексами *NAO*, усредненными за зимние месяцы (с декабря по март), чем среднемесячные *SWH* и среднемесячные индексы *NAO* между собой.

Остановимся кратко на работах, посвященных исследованию связи североатлантического колебания и высот волн в Балтийском море. В работе [7] на основе данных моделирования за 44 года (1958–2001) указывается, что связь имеет место, но никаких численных значений не приводится. В работе [5] отмечается корреляция с коэффициентом 0,61 между среднегодовыми *SWH* у эстонского побережья за период 1966–2006 гг. и индексами *NAO*, усредненными за период август – февраль. В то же время в работе [15], где рассматривается связь среднегодовых *SWH* у побережья Польши за период 1958–2002 гг. со среднегодовыми индексами *NAO*, а также среднемесячных *SWH* со среднемесячными индексами *NAO*, автор приходит к выводу, что связь хотя и существует, но является достаточно слабой.

В работах [16, 17] рассматривались только штормовые события. Связь среднегодовых или среднемесячных *SWH* с индексами *NAO* не анализировалась. Было выявлено существование корреляционной связи на уровне 30–50% между количеством штормовых событий на Балтике (с *SWH* > 2 м) и индексом *NAO*.

В работе [18] анализируются результаты моделирования волновой обстановки у южного побережья Швеции за 62 года (1959–2021). Отмечается, что межгодовая изменчивость среднегодовых энергий и направлений распространения волн находится в существенной корреляционной связи с зимними индексами *NAO* (усредненными за декабрь – март). Количественно статистическая связь измеряется коэффициентом корреляции Спирмена, который для различных точек в прибрежной зоне составляет 0,5–0,7.

Как видно по краткому обзору опубликованных работ, существование корреляционной связи параметров волнового режима на Балтике и *NAO* не вызывает сомнений, однако ряд вопросов остается открытым. К таким вопросам прежде всего можно отнести следующие: какой из вариантов усреднения индексов *NAO* показывает наилучшую корреляцию с параметрами волнения и какова степень влияния *NAO* на параметры волнения в рамках межгодовой и многолетней изменчивости.

В предыдущих работах авторов [8, 9] рассматривались параметры волнового режима Балтийского моря по результатам численного моделирования за период 1979–2018 гг., были выявлены временные тенденции изменения *SWH* в тех или иных областях и оценена статистическая значимость этих тенденций. Цель настоящего исследования – охватить период с 50-х гг. XX в. по 20-е гг. XXI в., выявить временные интервалы, когда среднегодовые *SWH* на Балтике имели тенденции к росту или снижению, оценить их статистическую значимость, а также попытаться определить характер статистической связи среднегодовых *SWH* с индексом *NAO*.

Материалы и методы

Данные, использованные для анализа. Рассмотрим динамику высот волн в Балтийском море. Расположение точек и временные серии среднегодовых SWH , использованные для анализа, показаны на рис. 1. Градации серого отражают информацию о пространственном распределении средних SWH (за период 1979–2018 гг.). Данные о временных сериях среднегодовых SWH в точках 1, 2 и 3 взяты из литературных источников [1, 5, 6], в точках 4–9 – являются результатами, полученными авторами. Рассмотрим более подробно методику получения данных для каждой из представленных на рис. 1 точек.

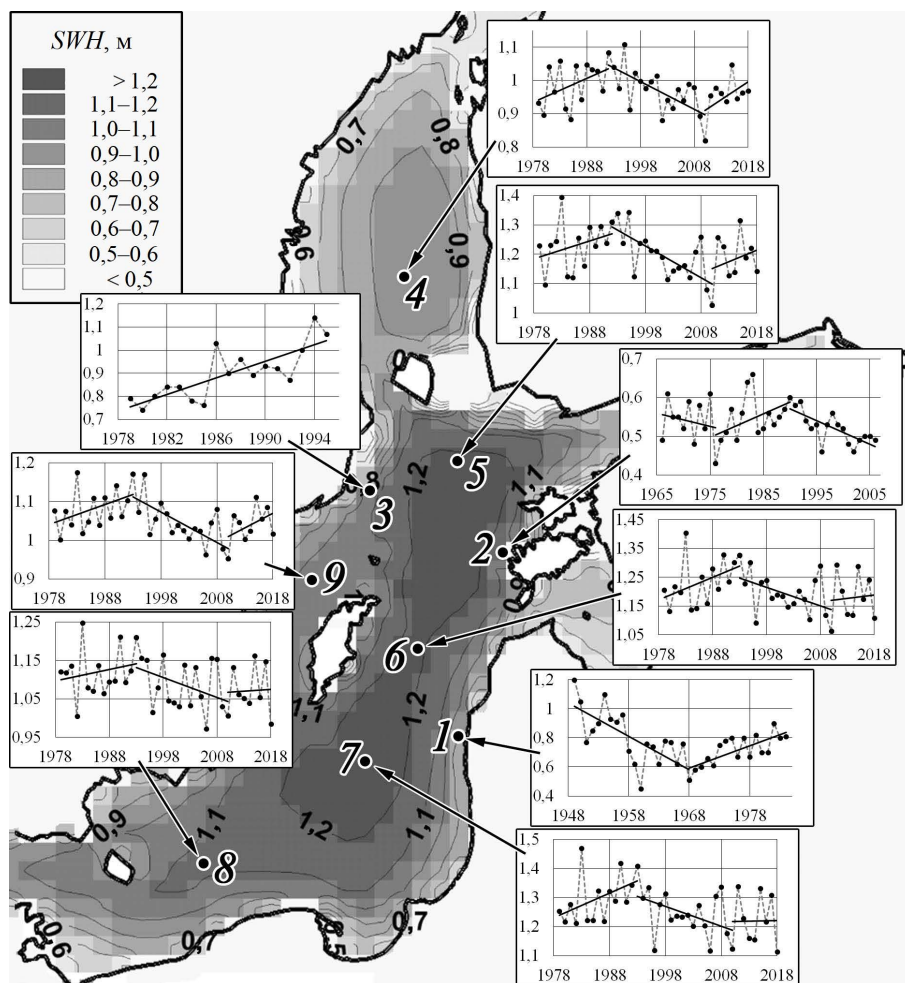


Рис. 1. Многолетняя динамика высот волн в Балтийском море. Цветом и изолиниями показаны средние SWH в Балтийском море по данным численного моделирования за период 1979–2018 гг. [8, 9]. Белыми цифрами выделены точки, использованные для исследования. На врезках – временные серии среднегодовых SWH для каждой из точек и линейные аппроксимации для участков, которые можно считать условно монотонными при зрительном анализе

Fig. 1. Long-term dynamics of wave heights in the Baltic Sea. Color and isolines show the average SWH in the Baltic Sea based on numerical simulating data for 1979–2018 [8, 9]. White numerals highlight the points used in the study. Insets show the time series of annual average SWH for each point and the linear approximations for the areas that can be considered supposedly monotonic in visual analysis

Высоты волн у побережья Латвии в районе Лиепай (точка 1 на рис. 1) оценивались по результатам визуальных наблюдений. В работе [6] представлены данные о среднегодовых SWH , полученных таким методом за период 1949–1984 гг. Эти материалы легли в основу построения временной серии на врезке для точки 1. Для эстонских берегов (точка 2) использовались результаты, представленные в работе [5]. Автор исследования проводил расчеты по полуэмпирической модели, основанной на зависимости высоты волн от длины их разгона. Для учета ветрового воздействия использовались данные метеостанции *Vilsandi*, расположенной вблизи западной оконечности о. Сааремаа. Расчеты среднегодовых SWH в этом районе были выполнены для периода 1966–2006 гг. Точка 3 отражает результаты пионерских инструментальных измерений SWH на Балтике, выполненных волновым регистратором *Almagrundet*, установленным в нескольких десятках километров от побережья Швеции. Результаты, описанные в работе [1], охватывают период 1979–1995 гг., они легли в основу построения временной серии для точки 3.

Временные серии для точек 4–9 получены авторами с помощью спектральной волновой модели *MIKE 21 SW*³ за 40-летний период 1979–2018 гг. Неструктурированная расчетная сетка охватывала все Балтийское море. Размер стороны треугольных элементов сетки изменялся от 2–3 до 10–15 км. Открытых границ модель не имела. Шаг по времени при выполнении расчетов регулировался моделью исходя из выполнения условия устойчивости, но не превышал 10 мин. Для учета ветрового воздействия использовались открытые данные реанализа *ERA-Interim*⁴ на пространственной сетке в 1° по широте и долготе с временным шагом 6 ч. Калибровка и верификация модели проводились путем сравнения результатов расчетов с данными волновых буев, расположенных в различных частях Балтийского моря. Подробные сведения о настройках, калибровке и верификации модели, использованной для расчетов, приведены в [8, 9]. Выбор местоположения точек 4–9 из всего массива данных был обусловлен тем, что по модельным расчетам за период 1979–2018 гг. в них были получены максимальные значительные высоты волн для разных субрегионов Балтийского моря.

Анализ временной изменчивости среднегодовых высот волн. Анализ динамики среднегодовых SWH проводился путем исследования их временных серий в перечисленных выше точках Балтийского моря. Каждая из рассматриваемых временных серий подвергалась обработке, включающей три этапа.

На первом этапе зрительно выявлялись временные интервалы, когда зависимость среднегодовых SWH от времени условно можно было считать линейной. Аппроксимирующие их линейные функции показаны в виде отрезков прямых линий на врезках. Далее для каждого из выявленных интервалов с использованием непараметрического подхода определялся угловой коэффициент линейной аппроксимирующей функции (*Sen's slope* [19]) и оценивалась статистическая значимость потенциального временного тренда по критерию Манна –

³ Spectral Wave Modelling. MIKE 21 Spectral Waves : [site]. URL: <https://www.dhigroup.com/technologies/mikepoweredbydhi/mike-21-spectral-waves> (date of access: 21.07.2024).

⁴ ECMWF Reanalysis-Interim (ERA-Interim) : [datasets]. URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim> (date of access: 12.07.2020).

Кендалла [20, 21]. Статистический анализ выполнялся в *Excel* с помощью надстройки *Real Statistics*⁵ для уровня статистической значимости $\alpha = 0,1$ (90% вероятности). На последнем этапе статистические показатели для разных пространственных точек сравнивались и делались выводы о динамике среднегодовых *SWH* на том или ином временном интервале.

Оценка связи среднегодовых *SWH* с индексом *NAO*. Анализировалась корреляция временных серий среднегодовых *SWH* с временными сериями индекса *NAO* для всех точек, показанных на рис. 1. Значения индекса *NAO*, использованные в данной работе, представляют собой нормализованную разность давлений между метеостанциями Гибралтар и Рейкьявик (Исландия), они рассчитываются по методике из работы [22], а их среднемесячные значения доступны в открытой базе данных Центра прогноза климата США, опубликованной в Интернете⁶. Эти среднемесячные значения и являлись исходными данными для анализа связи *NAO* с высотой волны на Балтике.

В настоящем исследовании рассматривались как среднегодовые значения индекса *NAO*, так и его значения, усредненные для различных сочетаний месяцев с октября по март. Особое внимание холодным месяцам уделялось в связи с тем, что зимние процессы взаимодействия океана и атмосферы оказывают наибольшее влияние на циркуляцию атмосферы в последующие месяцы календарного года [23, 24; 10, с. 23]. Например, наиболее часто встречается усреднение индекса *NAO* для зимних месяцев, имеющее аббревиатуру *JFM* (январь, февраль, март), которое хорошо коррелирует с различными метеорологическими параметрами [25, 26]. В работах встречаются различные варианты усреднения за период октябрь – март⁷ [27, 28].

Оценка связи осуществлялась путем расчета коэффициентов корреляции (КК) Пирсона и Спирмена⁸. Кроме того, была выполнена оценка статистической значимости рассчитанных коэффициентов корреляции для уровня $\alpha = 0,1$. Статистический анализ выполнялся в *Excel* с помощью надстройки *Real Statistics*⁵.

Результаты и обсуждение

Анализ временной изменчивости среднегодовых *SWH*. Зрительный анализ (врезки на рис. 1) показывает, что участки снижения и роста среднегодовых *SWH* в Балтийском море чередуются. С 1950 г. до конца 60-х – начала 70-х гг. прошлого века наблюдается тенденция к снижению. Скорости снижения составляют от 5 (точка 2) до 23 (точка 1) мм/год. Данных, относящихся к этому периоду, очень мало, и получены они в основном методом визуальных

⁵ Real Statistics Resource Pack software (Release 8.9.1) : computer program / developer Charles Zaiontz. 2023. URL: <https://www.real-statistics.com> (date of access: 20.07. 2024).

⁶ URL: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml> (date of access: 20.03.2005).

⁷ North Atlantic Oscillation (NAO) : [dataset] / Climatic Research Unit, University of East Anglia. URL: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/nao/values.htm> (date of access: 28.07.2024).

⁸ Математическая статистика / Под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. Москва : Издательство МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2001. С. 240.

наблюдений. Поэтому результаты достаточно субъективны и не очень надежны.

С конца 60-х – начала 70-х гг. наблюдается тенденция к росту среднегодовых *SWH*, что подтверждается временными сериями во всех точках. Темпы роста составляют от 6 (точка 9) до 17 (точка 3) мм/год. Здесь данных уже существенно больше. Они получены как визуальными, так и более объективными методами – с помощью инструментальных измерений и математического моделирования.

С начала 90-х гг. прошлого века и примерно до 2010 г. снова проявляется тенденция к снижению среднегодовых *SWH*. Такой вывод основывается как на результатах расчетов авторов (точки 4–9), так и на результатах моделирования из работы [5] для точки 2. Скорости снижения изменяются от 4 мм/год для точки 8 до 13 мм/год для точки 5. Предположительно с 2010 г. снова начинается фаза роста, однако, поскольку охватываемый данными период ограничивается 2018 г., делать выводы о темпах роста некорректно: период слишком короткий для анализа.

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Скорость изменения среднегодовых *SWH* для тех периодов, когда временные тренды можно считать статистически значимыми на уровне $\alpha = 0,1$ (90% вероятности)
Rate of the annual average *SWH* change for the periods when the time trends can be considered statistically significant at level $\alpha = 0.1$ (90% probability)

Точка / Point	Период / Period	Тренд значим при $\alpha = 0,1$ / Trend is significant at $\alpha = 0.1$	Значение тренда, мм/год / Trend value, mm/year
1	1949–1968	да / yes	–23,0
	1968–1985	да / yes	15,0
2	1966–1976	нет / no	–
	1976–1990	да / yes	7,5
	1990–2006	да / yes	–6,0
3	1979–1995	да / yes	17,0
	1979–1992	нет / no	–
4	1992–2010	да / yes	–8,6
	2010–2018	нет / no	–
	1979–1992	да / yes	6,9
5	1992–2010	да / yes	–13,0
	2010–2018	нет / no	–
	1979–1993	да / yes	8,8
6	1993–2010	да / yes	–9,5
	2010–2018	нет / no	–
	1979–1993	да / yes	9,0
7	1993–2010	да / yes	–8,3
	2010–2018	нет / no	–
	1979–1993	нет / no	–
8	1993–2010	да / yes	–4,2
	2010–2018	нет / no	–
	1979–1993	да / yes	5,9
9	1993–2010	да / yes	–7,6
	2010–2018	нет / no	–

Подводя итог, можно предположить, что фазы роста и снижения среднегодовых *SWH* на Балтике имеют продолжительность ~ 20 лет: с 1950 по 1970 г. – снижение, с 1970 по 1990 г. – рост, с 1990 по 2010 г. – снижение. Темпы изменения среднегодовых *SWH* пространственно разнятся и могут составлять $\sim 5\text{--}20$ мм/год.

Кроме расчетов темпов изменения среднегодовых *SWH* были выполнены оценки статистической значимости временных трендов для каждого из рассматриваемых временных интервалов. Расчеты выполнялись для уровня $\alpha = 0,1$. Статистическая значимость потенциального временного тренда оценивалась непараметрическим методом Манна – Кендалла [20, 21], а значение тренда – по формуле Сена (*Sen's slope*) [19]. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Период до середины 70-х гг. показан в табл. 1 лишь точками 1 (побережье Балтики у Лиенаи, визуальные наблюдения) и 2 (западная оконечность о. Сааремаа; модель, основанная на длине разгона волн). Видно, что для периода снижения *SWH* с 1950 г. до начала – середины 70-х гг. тренд в точке 1 статистически значим, в точке 2 – нет. Отсутствие статистической значимости в точке 2 объясняется, прежде всего, очень коротким временным отрезком, охватываемым данными (10 лет потенциального снижения в период 1966–1976 гг.). Для периода роста с 70-х по 90-е гг. имеются данные во всех рассматриваемых точках. Почти везде тренд статистически значим. Исключения составляют точки 4 (Ботническое море) и 8 (Борнхольмский бассейн). С начала 90-х гг. снова наблюдается тенденция к снижению *SWH*, которая статистически значима во всех точках, охватываемых данными (все точки, кроме 1 и 3). Для периода после 2010 г. наблюдается слабая тенденция к росту *SWH* и тренды статистически не значимы в связи с коротким временным интервалом, охватываемым данными (8 лет до 2018 г.).

Оценка связи среднегодовых *SWH* с индексом *NAO*. Для оценки связи выполнялись расчеты коэффициентов корреляции между временными сериями среднегодовых *SWH* и индексов *NAO*, усредненных на различных временных интервалах. Временные серии не разбивались на отрезки условной монотонности, как при анализе трендов, а бралась вся имеющаяся в точке временная серия целиком. Результаты корреляционного анализа представлены в табл. 2. Уровень статистической достоверности приведенных КК различается: для минимальных величин КК *p*-значение (*p-value*) не превышает 0,1 (т. е. вероятность существования статистической связи более 90%), для относительно высоких КК ($\sim 0,5$ и более) *p*-значение составляет 0,001 и менее (99,9% вероятности).

Из табл. 2 видно, что для каждой из временных серий имеется хотя бы один вариант усреднения индексов *NAO*, при котором связь со среднегодовыми *SWH* является статистически значимой на уровне $\alpha = 0,1$. Наибольшие значения КК выделены жирным шрифтом и составляют 0,3–0,6. Чаще всего (во всех случаях, кроме точки 2) наибольшие значения КК соответствуют пе-

риоду усреднения индекса *NAO* с января по март (*JFM*). Этот результат совпадает с практикой использования данного интервала усреднения в научных исследованиях. Например, на сайте Центра прогноза климата США именно этому типу усреднения, как никакому другому, посвящена отдельная страница ⁹.

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Коэффициенты корреляции Пирсона и Спирмена, статистически значимые для уровня $\alpha = 0,1$ (90% вероятности)
Pearson and Spearman correlation coefficients statistically significant at level $\alpha = 0.1$ (90% probability)

Точка / Point	Период / Period	КК / CC	Y	<i>JFM</i>	<i>ONDJFM</i>	<i>DJFM</i>	<i>NDJFM</i>
1	1949–1976	Пирсона (П.) / Pearson (P.)	–	0,31	–	–	–
		Спирмена (С.) / Spearman (S.)	–	0,29	–	–	–
2	1966–2006	П. / P.	0,29	–	0,29	0,29	–
		С. / S.	0,33	–	0,32	0,34	–
3	1979–1995	П. / P.	–	0,56	–	–	–
		С. / S.	–	0,58	0,48	–	0,47
4	1979–2018	П. / P.	0,41	0,60	0,31	–	–
		С. / S.	0,33	0,53	–	–	–
5	1979–2018	П. / P.	0,40	0,60	0,41	0,32	0,34
		С. / S.	0,40	0,51	0,37	0,31	0,30
6	1979–2018	П. / P.	0,32	0,54	0,33	–	–
		С. / S.	0,35	0,49	0,29	–	–
7	1979–2018	П. / P.	0,29	0,51	0,29	–	–
		С. / S.	0,34	0,47	–	–	–
8	1979–2018	П. / P.	–	0,40	–	–	–
		С. / S.	–	0,39	–	–	–
9	1979–2018	П. / P.	0,34	0,53	0,37	0,28	0,28
		С. / S.	0,35	0,47	0,37	0,30	0,27

П р и м е ч а н и е. В столбце «Y» указаны КК между среднегодовыми *SWH* и среднегодовыми индексами *NAO*. Остальные столбцы содержат значения КК между среднегодовыми *SWH* и индексами *NAO*, усредненными для различных сочетаний холодных месяцев года: *O* – октябрь, *N* – ноябрь, *D* – декабрь, *J* – январь, *F* – февраль, *M* – март.

N o t e. The «Y» column indicates the CCs between the annual average *SWH* and the annual average *NAO* indices. The remaining columns contain the CC values between the annual average *SWH* and the *NAO* indices averaged for different combinations of cold months of a year: *O* – October, *N* – November, *D* – December, *J* – January, *F* – February, *M* – March.

Итак, расчеты показали, что межгодовые вариации *NAO* и среднегодовых *SWH* находятся в статистически значимой корреляционной связи. Второй момент, который важно было выяснить, какая статистическая связь более существенна – для годовых данных или данных с большим временным осреднением. С целью такой проверки дополнительно были рассчитаны КК между

⁹ URL: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/JFM_season_ao_index.shtml (date of access: 20.03.2005).

скользящими пятилетними средними для индексов *NAO* и среднегодовых *SWH*. Расчеты проводились во всех точках для тех случаев усреднения индексов *NAO*, которые дали наибольшие значения КК при анализе межгодовой изменчивости. Результаты сравнения корреляционной связи представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3
T a b l e 3

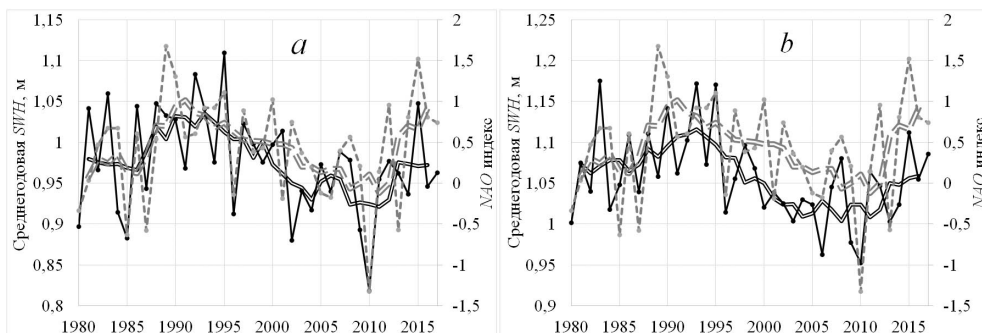
Коэффициенты корреляции Пирсона и Спирмена между ежегодными значениями индекса *NAO* и среднегодовыми *SWH*, а также между их скользящими пятилетними средними
Pearson and Spearman correlation coefficients between the *NAO* index annual values and the *SWH* annual average values, as well as between their five-year moving averages

Точка / Point	Период / Period	КК / СС	Ежегодные значения / Annual values	Пятилетние средние / Five-year averages
1	1949–1976 (JFM)	Пирсона (П.) / Pearson (P.)	0,31	0,22
		Спирмена (С.) / Spearman (S.)	0,29	0,38
2	1966–2006 (DJFM)	П. / P.	0,29	0,36
		С. / S.	0,34	0,41
3	1979–1995 (JFM)	П. / P.	0,56	0,71
		С. / S.	0,58	0,72
4	1979–2018 (JFM)	П. / P.	0,60	0,83
		С. / S.	0,53	0,82
5	1979–2018 (JFM)	П. / P.	0,60	0,76
		С. / S.	0,51	0,73
6	1979–2018 (JFM)	П. / P.	0,54	0,65
		С. / S.	0,49	0,58
7	1979–2018 (JFM)	П. / P.	0,51	0,58
		С. / S.	0,47	0,51
8	1979–2018 (JFM)	П. / P.	0,40	0,54
		С. / S.	0,39	0,50
9	1979–2018 (JFM)	П. / P.	0,53	0,73
		С. / S.	0,47	0,71

П р и м е ч а н и е. В столбце «Период» указан использованный вариант усреднения индекса *NAO*.
N o t e. The “Period” column specifies the option used for averaging the *NAO* index.

Из табл. 3 видно, что во всех случаях, кроме КК Пирсона для точки 1, КК для пятилетних средних больше, чем для годовых данных, т. е. межгодовые вариации *SWH* статистически менее значимо связаны с аналогичными вариациями *NAO*, чем более долгопериодные. Что касается пространственного распределения, обращает на себя внимание тот факт, что КК для точек в открытом море выше, чем для точек вблизи побережья. Кроме того, по-видимому, связь *SWH* с североатлантическим колебанием увеличивается с юга на север: самые высокие КК рассчитаны для точек 3, 4, 5 и 9, причем для самой северной точки 4 в Ботническом море связь самая сильная.

Связь *SWH* и *NAO* по годам, а также влияние пятилетнего усреднения на КК иллюстрирует рис. 2. Точки 4 и 9 выбраны в связи с тем, что для них разница между годовыми и пятилетними КК максимальна, 0,2 или выше.



Р и с. 2. Осредненные среднегодовые *SWH* и индекс *NAO* с января по март (*JFM*) за период 1980–2017 гг. в точках 4 (*a*) и 9 (*b*). *SWH*: среднегодовые значения – тонкая сплошная линия, скользящее пятилетнее среднее – двойная сплошная линия; индекс *NAO* (*JFM*): ежегодный – штриховая линия, скользящее пятилетнее среднее – двойная штриховая линия

Fig. 2. Annual average *SWH* and *NAO* index averaged from January to March (*JFM*) for 1980–2017 at points 4 (*a*) and 9 (*b*). *SWH*: annual average values are indicated by a thin solid line, and 5-year moving average – by a double solid line; *NAO* index (*JFM*): annual value is indicated by a dashed line, and 5-year moving average – by a double dashed line

Из рис. 2 видно, что в значительной степени колебания среднегодовых *SWH* повторяют колебания годовых индексов *NAO*, что подтверждают и достаточно высокие КК для их межгодовых вариаций. Если сравнивать скользящие средние, то легко заметить, что до начала 90-х гг. наблюдается рост как индексов *NAO*, так и среднегодовых *SWH*. С начала 90-х гг. примерно до 2010 г. имеет место снижение как среднегодовых *SWH*, так и индексов *NAO*. Наконец, после 2010 г. наблюдаются тенденции к росту обоих параметров. Анализируя результаты, представленные на рис. 2 и в табл. 3, можно заключить, что индексы *NAO* и среднегодовые *SWH* коррелируют как в рамках межгодовой изменчивости, так и на более длительных временных интервалах.

Принимая во внимание коэффициент детерминации (квадрат величины коэффициента корреляции), показывающий в общем виде, какую часть изменчивости анализируемой переменной (характеристика волнения) можно объяснить с помощью регрессионной модели ее зависимости от фактора *NAO*, приходим к выводу, что в нашем случае влияние *NAO* может объяснить ~ 30–65% изменчивости волновых характеристик как в рамках межгодовой динамики, так и на более продолжительных временных отрезках.

Авторы данной работы не делают попытки физического объяснения механизма воздействия *NAO* на высоту волн в Балтийском море. В работе оценена связь и, главное, проведена оценка ее статистической значимости, что позволяет, опираясь на эти оценки, обсуждать возможные механизмы связи (или заявлять о их незначительности).

Выводы

1. Тенденции к росту и снижению среднегодовых *SWH* в Балтийском море чередуются. Продолжительность каждой из фаз условной монотонности составляет ~ 20 лет. За период с середины XX в. до 20-х гг. XXI в. тенденции сменялись три раза.

2. Отмеченные тенденции являются статистически значимыми на уровне $\alpha = 0,1$ (90% вероятности) по крайней мере в некоторых точках моря. Скорости изменения среднегодовых *SWH* малы и могут составлять 5–20 мм/год в зависимости от пространственного положения точек.

3. Корреляционная связь между индексом *NAO* и среднегодовыми высотами волн статистически значима на уровне как минимум 90% вероятности, но не высока. Этим влиянием можно объяснить ~ 30–65% изменения волновых характеристик как в рамках межгодовой изменчивости, так и на более продолжительных временных отрезках.

4. Предпочтительным вариантом усреднения индекса *NAO*, обеспечивающим наибольшую корреляцию со среднегодовыми *SWH*, в большинстве случаев является усреднение с января по март (*JFM*).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Trends and extremes of wave fields in the north-eastern part of the Baltic Proper / B. Broman [et al.] // *Oceanologia*. 2006. Vol. 48. P. 165–184.
2. Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях / Под ред. Е. С. Нестерова. Москва : Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, 2013. 292 с.
3. Tuomi L., Kahma K. K., Pettersson H. Wave hindcast statistics in the seasonally ice-covered Baltic Sea // *Boreal Environment Research*. 2011. Vol. 16, iss. 6. P. 451–472.
4. Soomere T. Numerical simulations of wave climate in the Baltic Sea: a review // *Oceanologia*. 2023. Vol. 65, iss. 1. P. 117–140. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2022.01.004>
5. Suursaar Ü., Kullas T. Decadal variations in wave heights near the Cape Kelba, Saaremaa Island, and their relationships with changes in wind climate // *Oceanologia*. 2009. Vol. 51, iss. 1. P. 39–61. <https://doi.org/10.5697/oc.51-1.039>
6. Soomere T. Extending the observed Baltic Sea wave climate back to the 1940s // *Journal of Coastal Research*. 2013. Vol. 65, sp. iss. 2. P. 1969–1974. <https://doi.org/10.2112/SI65-333.1>
7. Cieślakiewicz W., Paplińska-Swerpel B., Soares C. G. Multi-Decadal Wind Wave Modelling over the Baltic Sea // *Coastal Engineering : Proceedings of the 29th International Conference*. Lisbon, Portugal : World Scientific Publishing Company, National Civil Engineering Laboratory, 2005. P. 778–790. https://doi.org/10.1142/9789812701916_0062
8. Соколов А. Н., Чубаренко Б. В. Временная изменчивость параметров ветровых волн в Балтийском море за период 1979–2018 годов по результатам численного моделирования // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 4. С. 383–395. EDN SGVSPH. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-4-383-395>
9. Sokolov A., Chubarenko B. Baltic sea wave climate in 1979–2018: Numerical modelling results // *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 297. 117088. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117088>
10. Нестеров Е. С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. Москва : ООО «Три-ада», 2013. 127 с. EDN UYJKZB.
11. Bacon S., Carter D. J. T. A connection between mean wave height and atmospheric pressure gradient in the North Atlantic // *International Journal of Climatology*. 1993. Vol. 13, iss. 4. P. 423–436. <https://doi.org/10.1002/joc.3370130406>
12. Bauer E. Interannual changes of the ocean wave variability in the North Atlantic and in the North Sea // *Climate Research*. 2001. Vol. 18, iss. 1–2. P. 63–69. <https://doi.org/10.3354/cr018063>
13. Woolf D. K., Challenor P. G., Cotton P. D. Variability and predictability of the North Atlantic wave climate // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2002. Vol. 107, iss. C10. 3145. <https://doi.org/10.1029/2001JC001124>

14. *Dodet G., Bertin X., Taborda R.* Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades // *Ocean Modelling*. 2010. Vol. 31, iss. 3–4. P. 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.10.010>
15. *Różyński G.* Long-term evolution of Baltic Sea wave climate near a coastal segment in Poland; its drivers and impacts // *Ocean Engineering*. 2010. Vol. 37, iss. 2–3. P. 186–199. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2009.11.008>
16. *Surkova G. V., Arkhipkin V. S., Kislov A. V.* Atmospheric circulation and storm events in the Baltic Sea // *Open Geosciences*. 2015. Vol. 7, iss. 1. 20150030. <https://doi.org/10.1515/geo-2015-0030>
17. Long-term Statistics of Storms in the Baltic, Barents and White Seas and Their Future Climate Projections / S. Myslenkov [et al.] // *Geography, Environment, Sustainability*. 2018. Vol. 11, iss. 1. P. 93–112. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-11-1-93-112>
18. Spatial and temporal wave climate variability along the south coast of Sweden during 1959–2021 / A. Adell [et al.] // *Regional Studies in Marine Science*. 2023. Vol. 63. 103011. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103011>
19. *Sen P. K.* Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall’s Tau // *Journal of the American Statistical Association*. 1968. Vol. 63, iss. 324. P. 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
20. *Mann H. B.* Nonparametric Tests Against Trend // *Econometrica*. 1945. Vol. 13, iss. 3. P. 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
21. *Kendall M. G.* Rank Correlation Methods. London : Charles Griffin, 1975. 202 p.
22. *Jones P. D., Jonsson T., Wheeler D.* Extension to the North Atlantic oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and south-west Iceland // *International Journal of Climatology*. 1997. Vol. 17, iss. 13. P. 1433–1450. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(19971115\)17:13%3C1433::AID-JOC203%3E3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19971115)17:13%3C1433::AID-JOC203%3E3.0.CO;2-P)
23. *Hurrell J. W.* Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation // *Science*. 1995. Vol. 269, iss. 5224. P. 676–679. <https://doi.org/10.1126/science.269.5224.676>
24. *Rodwell M. J., Rowell D. P., Folland C. K.* Oceanic forcing of the wintertime North Atlantic Oscillation and European climate // *Nature*. 1999. Vol. 398. P. 320–323. <https://doi.org/10.1038/18648>
25. *Post E., Stenseth N. C.* Climatic Variability, Plant Phenology, and Northern Ungulates // *Ecology*. 1999. Vol. 80, iss. 4. P. 1322–1339. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1999\)080\[1322:CVPPAN\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1999)080[1322:CVPPAN]2.0.CO;2)
26. *D’Odorico P., Yoo J. C., Jaeger S.* Changing Seasons: An Effect of the North Atlantic Oscillation? // *Journal of Climate*. 2002. Vol. 15, iss. 4. P. 435–445. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<0435:CSAEOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<0435:CSAEOT>2.0.CO;2)
27. *Kolstad E. W., O’Reilly C. H.* Causal oceanic feedbacks onto the winter NAO // *Climate Dynamics*. 2024. Vol. 62, iss. 5. P. 4223–4236. <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07128-y>
28. *Zhang W., Jiang F.* Subseasonal Variation in the Winter ENSO-NAO Relationship and the Modulation of Tropical North Atlantic SST Variability // *Climate*. 2023. Vol. 11, iss. 2. 47. <https://doi.org/10.3390/cli11020047>

Об авторах:

Соколов Андрей Николаевич, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Атлантическое отделение (236022, Россия, г. Калининград, пр. Мира, д. 1); доцент, Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта (236016, Россия, г. Калининград, ул. А. Невского, д. 14), кандидат технических наук, доцент, **ResearcherID: B-4523-2017**, **Scopus Author ID: 56998131000**, **ORCID ID: 0000-0002-7593-9739**, **SPIN-код: 2884-6132**, tengritag@gmail.com

Чубаренко Борис Валентинович, заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Атлантическое отделение (236022, Россия, г. Калининград, пр. Мира, д. 1), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, **ResearcherID: I-6118-2016**, **Scopus Author ID: 6507102508**, **ORCID ID: 0000-0001-7988-1717**, **SPIN-код: 2691-5872**, chuboris@mail.ru