

## Временная изменчивость параметров ветровых волн в Балтийском море за период 1979–2018 годов по результатам численного моделирования

А. Н. Соколов<sup>1,2,\*</sup>, Б. В. Чубаренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия

\*E-mail: tengritag@gmail.com

Поступила в редакцию 06.03.2020 г., после доработки – 01.04.2020 г.

**Цель.** Цель исследования – выявление возможных трендов в динамике волнового климата в акватории Балтийского моря и анализ статистической значимости коэффициентов этих трендов по результатам численного моделирования для периода 1979–2018 гг.

**Методы и результаты.** Расчеты (за 40 лет – с 1979 по 2018 гг.) проведены с помощью спектральной волновой модели MIKE 21 SW на нерегулярной сетке. Ветровое воздействие задавалось по данным реанализа ERA-Interim. Модель калибровалась и верифицировалась на данных волновых буев в северной и южной частях Балтийского моря. По откалиброванной модели были рассчитаны параметры ветрового волнения для всего Балтийского моря с 1979 по 2018 г. с интервалом в 1 ч. Эти параметры послужили исходными данными для оценки временной изменчивости высоты ветровых волн на Балтике за 40 лет. Результаты расчетов на нерегулярной сетке были интерполированы к регулярной сетке. В итоге получены карты распределения максимальных и средних за 40-летний период значительных высот волн в акватории Балтийского моря. Выявлены временные тренды среднегодовой значительной высоты волн, и проведена оценка статистической значимости коэффициентов этих трендов.

**Выводы.** Средние за год значительные высоты волн почти во всей акватории Балтийского моря в период 1979–2018 гг. (40 лет) имеют тенденцию к снижению со скоростью, не превышающей 2–3 см (~2–3%) за 10 лет. Наибольшие скорости снижения наблюдаются в Юго-Восточной Балтике, наименьшие – в Ботническом и Финском заливах.

**Ключевые слова:** Балтийское море, ветровые волны, временная изменчивость, численное моделирование.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках темы № 0149-2019-0013 государственного задания ИО РАН и при поддержке гранта РФФИ № 18-05-80035 (методическая часть).

**Для цитирования:** 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. doi:10.22449/0233-7584-2020-4-383-395

# Temporal Variability of the Wind Wave Parameters in the Baltic Sea in 1979–2018 Based on the Numerical Modeling Results

A. N. Sokolov<sup>1, 2, \*</sup>, B. V. Chubarenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

\*e-mail: tengritag@gmail.com

**Purpose.** The aim of the paper is to identify possible trends in the wave climate dynamics in the Baltic Sea, and to analyze statistical significance of the coefficients of these trends based on the results of their numerical modeling for 1979–2018.

**Methods and Results.** The simulations for 1979–2018 (40 years) were carried out on an irregular grid using the MIKE 21 SW spectral wave model. The wind effect was preset according to the ERA-Interim reanalysis data. The model was calibrated and validated against the wave buoys' data in the northern and southern parts of the Baltic Sea. Based on the calibrated model, the wind wave parameters were calculated for the whole Baltic Sea area from 1979 to 2018 with the interval 1 hour. These parameters became the initial data for estimating temporal variability of the wind wave heights in the Baltic Sea for 40 years. The simulation results obtained on the irregular grid were interpolated to the regular one. It permitted to construct the maps of distribution of the maximum and average (for the 40-year period) significant wave heights in the Baltic Sea. The time trends for the average annual significant wave height values were revealed, and statistical significance of the coefficients of these trends was estimated.

**Conclusions.** The average annual values of the significant wave heights over almost the whole Baltic Sea area for 1979–2018 (40 years) tend to decrease with the rate not exceeding 2–3 cm (~2–3%) per 10 years. The highest rate reduction is observed in the southeastern part of the Baltic Sea, the lowest – in the Gulf of Bothnia and the Gulf of Finland. Interannual variability of the average annual significant wave heights and the changes of its trend in course of the 40-year period are of the same order.

**Keywords:** Baltic Sea, wind waves, temporal variability, numerical simulation.

**Acknowledgments:** the work was carried out within the framework of theme No. 0149-2019-0013 of the State Assignment of IO RAS and with the RFBR support, grant No. 18-05-80035 (methodological part).

**For citation:** Sokolov, A.N. and Chubarenko, B.V., 2020. Temporal Variability of the Wind Wave Parameters in the Baltic Sea in 1979–2018 Based on the Numerical Modeling Results. *Physical Oceanography*, [e-journal] 27(4), pp. 352-363. doi:10.22449/1573-160X-2020-4-352-363

## Введение

Наиболее полная информация на русском языке о режиме ветра и волнения в Балтийском море предоставлена Российским морским регистром судоходства<sup>1</sup>. В указанной работе описана методика расчетов, а также приводятся экстремальные и оперативные статистические характеристики ветра и волнения для различных районов моря, но временная изменчивость высоты ветровых волн не рассматривается.

Работа [1] основана на анализе натуральных данных, измерениях параметров волнения заякоренными волновыми буями, установленными в различных частях Балтийского моря. На основании этих данных авторы делают заключение

---

<sup>1</sup> Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей. СПб. : Российский морской регистр судоходства, 2006. 452 с. URL: <https://pdf.standartgost.ru/catalog/Data2/1/4293747/4293747775.pdf> (дата обращения: 06.07.2020).

о положительном тренде средней за год значительной высоты волны (среднее значение высоты для 1/3 наиболее высоких волн в спектре волнения) в северо-восточной части Центральной Балтики. Следует отметить, что рассматриваемый в данной работе отрезок времени (16 лет – с 1979 по 1995 г.) является относительно коротким для оценок климатических трендов. Кроме того, поскольку измерительные буи установлены лишь в нескольких районах Балтийского моря, интерполяция их данных не дает достоверного результата для всего моря.

В большинстве работ последних лет [2–5], анализирующих волновой климат (тенденции изменения, пространственная и временная изменчивость и т. д.) на всей акватории Балтийского моря, применяется метод математического моделирования. В качестве атмосферного воздействия используются данные атмосферного повторного анализа (далее – реанализа), т. е. данные о характеристиках ветра над акваторией Балтийского моря в узлах регулярной (по географическим координатам) сетки, восстановленные за исторический период с помощью различных атмосферных моделей. Подход с использованием численного моделирования позволяет по откалиброванным и верифицированным (по данным волновых буюв) математическим моделям (например, [2]) составить представление о волновом климате всего моря, о средних и экстремальных характеристиках волнового климата [4].

Модельный анализ временной изменчивости параметров ветровых волн на Балтике выполнен в работах Т. Соомере и А. Рьямета [5, 6], в которых приводятся конкретные числовые значения коэффициентов временных трендов. Расчеты производились по модели *WAM*, в качестве атмосферного воздействия использовался геострофический ветер. В работе [5] указывается на резкое снижение среднегодовых значений значительной высоты волны после 1995 г.

В работе [3] изучалось ветровое волнение на Балтике за период с 1948 по 2010 г. (63 года) по результатам расчетов в модели *SWAN* при воздействии приземного ветра, полученного по данным реанализа *NCEP/NCAR*. Анализ показал положительный временной тренд количества штормовых ситуаций, приводящих к появлению волн со значительной высотой более 2 м, а также рост среднегодовой значительной высоты волн для этих штормовых ситуаций (от 2,9 до 3,1 м по тренду). На фоне выявленного положительного тренда отмечена существенная межгодовая изменчивость среднегодовой значительной высоты волн (от 2,4 до 3,3 м), а также снижение значений этой величины для всего моря после 1990 г. Кроме того, в работе отмечается несоответствие между трендами десятилетней изменчивости этой величины в разных районах Балтийского моря.

Целью настоящего исследования является анализ возможных трендов в динамике волнового климата в акватории Балтийского моря и их статистической значимости по результатам численного моделирования (с учетом ледового покрова) для периода 1979–2018 гг. (40 лет). Ледяной покров может держаться от 1 до 3 месяцев на 80–100% площади Ботнического залива, 70% площади Финского залива и даже 40% северной части Центральной Балтики [7, с. 320–329]. В качестве атмосферного воздействия в нашей работе, в отличие от [3], используются данные реанализа *ERA-Interim*. Для учета разницы в изменчивости волновых характеристик в разных районах моря используется подход, основанный на анализе характерных точек [8].

## Численная модель и ее реализация

Чтобы получить массив данных параметров ветрового волнения, использовалась спектральная волновая модель *MIKE 21 SW* [9] Датского гидравлического института (*Danish Hydraulic Institute, DHI*). Расчет основывается на решении уравнения баланса плотности волнового действия

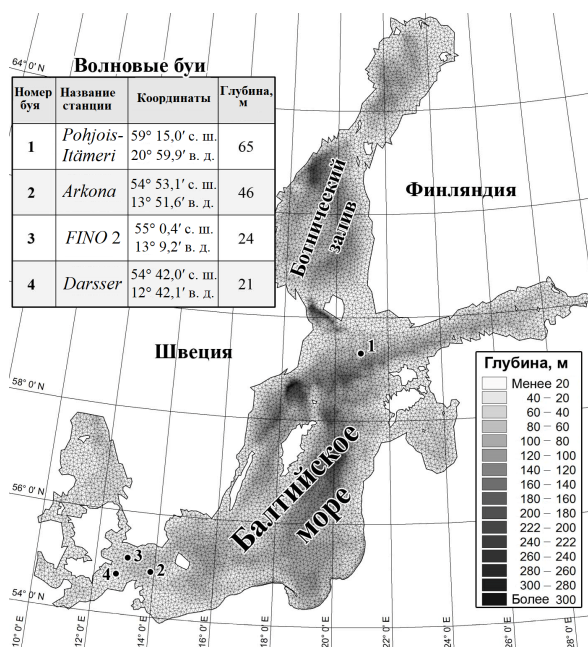
$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \omega} c_\omega N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\omega}, \quad (1)$$

где  $\theta$  – направление распространения волн;  $\omega$  – круговая частота;  $c_x, c_y, c_\omega$  и  $c_\theta$  – фазовые скорости.

Согласно уравнению (1), изменение плотности волнового действия в контрольном объеме (в зависимости от времени, адвекции в географическом пространстве, сдвига относительной частоты из-за изменений глубины и течений, рефракции и дифракции) уравнивается функцией источника  $S$ , которая, согласно уравнению (2), представляет собой суперпозицию следующих функций:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf}, \quad (2)$$

где  $S_{in}$  – ветровое воздействие, приводящее к возникновению волн;  $S_{nl}$  – перераспределение волновой энергии в результате нелинейных волновых взаимодействий;  $S_{ds}, S_{bot}, S_{surf}$  – диссипация волновой энергии вследствие образования барашков, донного трения и обрушения на мелководье соответственно.



**Рис. 1.** Карта глубин Балтийского моря и расчетная сетка. Отмечено положение измерительных буев (*Directional Waverider*), использованных для калибровки, и приведены их характеристики  
**Fig. 1.** Bathymetric map of the Baltic Sea and computational grid. Positions of the wave buoys (*Directional Waverider*) used for calibration are noted, their characteristics are cited

Расчет ведется методом конечных элементов на нерегулярной сетке. Расчетная область представлена на рис. 1. Типичная длина стороны элемента сетки составляет 6–10 км, а минимальная (в прибрежных областях Юго-Восточной Балтики) – 2–3 км. Такой выбор размера элементов преследует две задачи. С одной стороны, элемент получается меньше, чем у типичных систем реанализа, и, следовательно, пространственное разрешение выше (особенно для прибрежных акваторий). С другой стороны, достаточно большая длина стороны элемента сетки позволяет увеличить шаг по времени до значения, при котором еще не будут возникать проблемы с устойчивостью вычислительного процесса, и сократить время расчетов.

Как показали предварительные расчеты, на время вычислений существенно влияют параметры спектральной дискретизации модели. Для дискретизации по направлению оптимальным является деление круга на 24 сектора по 15 градусов. Частотная дискретизация охватывала диапазон от 0,05 Гц (период волн 20 с, характерный только для очень длинных волн зыби, которые в Балтийском море наблюдаются крайне редко) до 0,5 Гц (период волн 2 с, характерный для зарождающихся ветровых волн).

### **Граничные условия**

Вся расчетная область, показанная на рис. 1, считалась замкнутым водоемом, т. е. открытые границы у модели отсутствовали.

Поскольку целью исследования являлся анализ параметров ветрового волнения на климатическом отрезке времени, необходимо было найти однотипные данные о ветре для Балтийского моря за достаточно большой временной промежуток. В этом качестве были выбраны данные глобального реанализа *ERA-Interim* Европейского центра среднесрочных прогнозов, находящиеся в свободном доступе<sup>2</sup>. Из массива данных реанализа извлекались значения компонент скорости ветра на высоте 10 м над уровнем моря и данные о текущей ледовой обстановке. Расчет волнения производился в том случае, если свободная ото льда площадь поверхности моря на текущем участке была более 66% (рекомендуемое значение для *MIKE 21 SW*). Разрешение по широте и долготе извлекаемых данных составляло 1 градус. Шаг по времени *ERA-Interim* равен 6 ч.

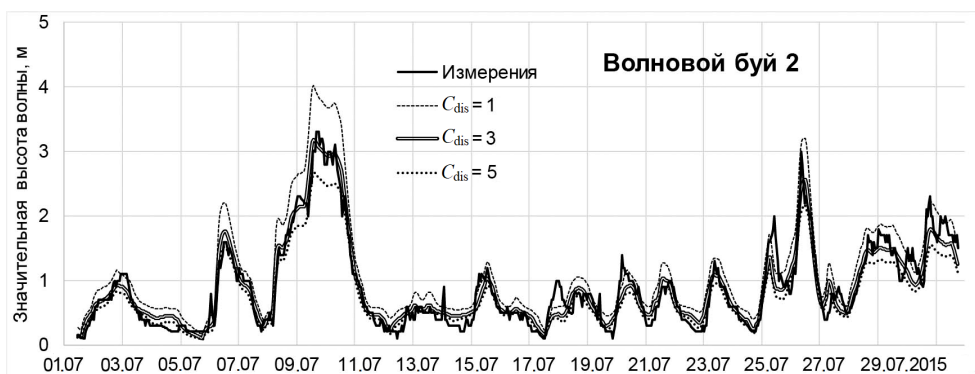
### **Калибровка и верификация**

Модель *DHI MIKE 21 SW* широко использовалась авторами в предыдущих исследованиях [10, 11]. Основным калибровочным параметром модели является  $C_{dis}$  (коэффициент диссипации волновой энергии в результате образования барашков). Причем его значение может зависеть как от данных о скорости и направлении ветра, так и от расположения и, возможно, характеристик волнового буя, данные измерений которого используются для калибровки. В нашей работе калибровка производилась по данным волновых буюв за июль 2015 г. (рис. 1). На рис. 2 можно видеть зависимости значительной высоты волны от времени по данным измерений волнового буя 1 (ст. *Pohjois-Itämeri*) и результаты расчета при значениях параметра  $C_{dis}$ , равных 1, 3 и 5. На рис. 3 те же зависимости для волнового буя 2 (ст. *Arkona*). Видно, что  $C_{dis}$ , равный 1, дает несколько завышенные, а  $C_{dis}$ , равный 5, – несколько заниженные результаты.

<sup>2</sup> URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim> (date of access: 05.06.2020).



**Р и с. 2.** Зависимости значительной высоты волны от времени (1–31 июля 2015 г.) в точке расположения буйа 1 (ст. *Pohjois-Itämeri*) по натурным данным и результатам расчета  
**F i g. 2.** Dependencies of a significant wave height upon time (1–31 July, 2015) at the location of buoy 1 (st. *Pohjois-Itämeri*) based on the field data and simulation results



**Р и с. 3.** Зависимости значительной высоты волны от времени (1–31 июля 2015 г.) в точке расположения буйа 2 (ст. *Arkona*) по натурным данным и результатам расчета  
**F i g. 3.** Dependencies of a significant wave height upon time (1–31 July, 2015) at the location of buoy 2 (st. *Arkona*) based on the field data and simulation results

Чтобы более точно оценить оптимальность выбора калибровочного параметра  $C_{dis}$ , сравнение расчетных и натуральных значительных высот волн производилось с использованием следующих статистических характеристик (табл. 1):

- *BIAS*, м (разность между средней за весь период наблюдений значительной высотой волн и аналогичным рассчитанным значением),
- *RMSE*, м (среднеквадратическая ошибка),
- *R*, безразмерная величина (коэффициент корреляции Пирсона).

Верификация модели проводилась на основе данных за январь 2015 г. (табл. 2). По ее результатам было решено для дальнейших расчетов использовать значение калибровочного параметра  $C_{dis}$ , равное 3, как дающее наиболее достоверные значения параметров волнения.

Т а б л и ц а 1  
T a b l e 1

Значения статистических параметров волнения для буюв 1, 2 и 4 (июль 2015)  
Values of statistical parameters of waves for buoys 1, 2 and 4 (July, 2015)

$C_{dis}$	Буй 1 / Buoy 1			Буй 2 / Buoy 2			Буй 4 / Buoy 4		
	<i>BIAS</i> , м / <i>BIAS</i> , m	<i>RMSE</i> , м / <i>RMSE</i> , m	<i>R</i>	<i>BIAS</i> , м / <i>BIAS</i> , m	<i>RMSE</i> , м / <i>RMSE</i> , m	<i>R</i>	<i>BIAS</i> , м / <i>BIAS</i> , m	<i>RMSE</i> , м / <i>RMSE</i> , m	<i>R</i>
1,0	-0,31	0,349	0,92	-0,25	0,440	0,96	-0,21	0,287	0,94
1,5	-0,21	0,273	0,92	-0,17	0,354	0,96	-0,15	0,237	0,94
2,0	-0,13	0,225	0,92	-0,11	0,304	0,96	-0,10	0,206	0,94
2,5	-0,07	0,198	0,92	-0,06	0,276	0,96	-0,06	0,188	0,94
3,0	<b>-0,02</b>	<b>0,187</b>	0,92	<b>-0,02</b>	<b>0,265</b>	0,96	-0,03	<b>0,181</b>	0,94
3,5	<b>0,02</b>	0,188	0,92	<b>0,02</b>	<b>0,264</b>	0,96	<b>0,00</b>	<b>0,181</b>	0,94
4,0	0,06	0,198	0,92	0,05	0,270	0,96	0,03	0,186	0,94
4,5	0,09	0,214	0,92	0,08	0,281	0,96	0,05	0,195	0,94
5,0	0,12	0,233	0,92	0,11	0,295	0,96	0,08	0,207	0,94

Пр и м е ч а н и е : жирным шрифтом выделены наилучшие значения.  
N o t e : the best values are in bold.

Т а б л и ц а 2  
T a b l e 2

Значения статистических параметров волнения для буюв 1, 2 и 3 (январь 2015)  
Values of statistical parameters of waves for buoys 1, 2 and 3 (January, 2015)

$C_{dis}$	Буй 1 / Buoy 1			Буй 2 / Buoy 2			Буй 3 / Buoy 3		
	<i>BIAS</i> , м / <i>BIAS</i> , m	<i>RMSE</i> , м / <i>RMSE</i> , m	<i>R</i>	<i>BIAS</i> , м / <i>BIAS</i> , m	<i>RMSE</i> , м / <i>RMSE</i> , m	<i>R</i>	<i>BIAS</i> , м / <i>BIAS</i> , m	<i>RMSE</i> , м / <i>RMSE</i> , m	<i>R</i>
1,0	-0,44	0,666	0,95	-0,38	0,655	0,94	-0,36	0,606	0,94
1,5	-0,23	0,491	0,95	-0,24	0,518	0,94	-0,23	0,469	0,94
2,0	-0,07	0,394	0,95	-0,14	0,430	0,94	-0,14	0,379	0,94
2,5	<b>0,05</b>	<b>0,360</b>	0,95	-0,05	0,374	0,94	-0,06	0,32	0,94
3,0	0,16	0,374	0,95	<b>0,02</b>	0,343	0,94	<b>0,01</b>	0,286	0,94
3,5	0,25	0,414	0,95	0,08	<b>0,331</b>	0,94	0,06	<b>0,272</b>	0,94
4,0	0,33	0,465	0,95	0,13	0,336	0,94	0,12	0,275	0,94
4,5	0,40	0,521	0,95	0,19	0,352	0,94	0,16	0,291	0,94
5,0	0,46	0,576	0,95	0,23	0,376	0,94	0,21	0,314	0,94

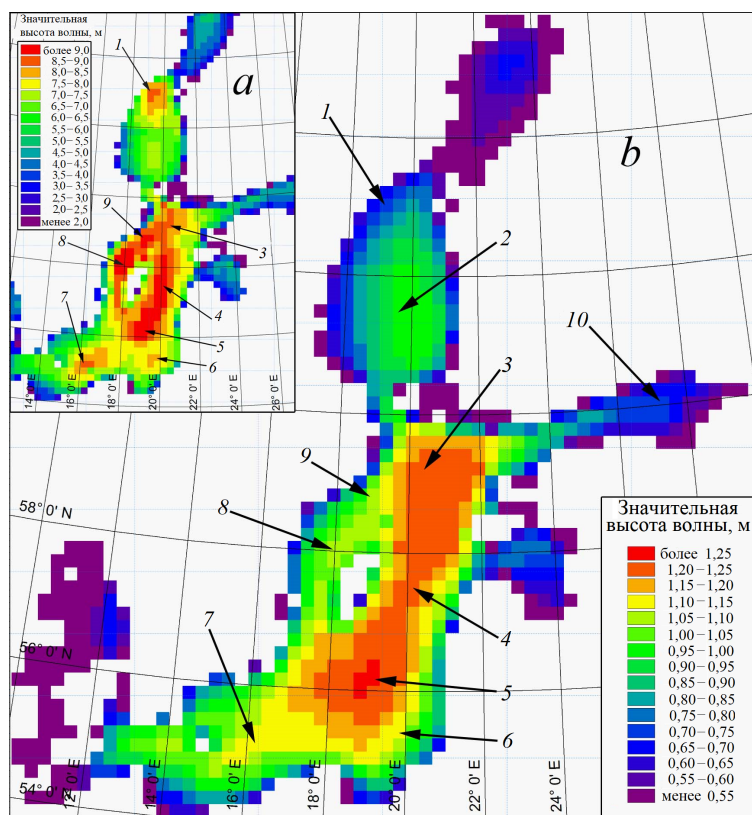
Пр и м е ч а н и е : жирным шрифтом выделены наилучшие значения.  
N o t e : the best values are in bold.

### Результаты и обсуждение

По откалиброванной модели были рассчитаны параметры ветрового волнения для всего Балтийского моря с 1979 по 2018 г. с интервалом в 1 ч, которые послужили исходными данными для оценки их временной изменчивости за 40 лет. Для удобства дальнейшей обработки полученные на нерегулярной сетке пространственно-временные распределения параметров волнения были приведены к регулярной сетке с размером ячеек примерно 21 × 21 км. Итоговая регулярная сетка имела 60 ячеек в долготном и 65 в широтном направлении.

Полученное в результате статистической обработки распределение максимумов значительной высоты волн за рассматриваемый период 1979–

2018 г. (40 лет) показано на врезке (рис. 4, *a*). Это представление не одномоментное, а интегральное – каждая ячейка на этом рисунке отражает максимум значительной высоты волн, зафиксированный в определенный момент за 40 лет в данной ячейке. Видно, что максимальные волны приурочены к акватории вокруг о. Готланд в Центральной Балтике, району острова Борнхольм и центру Гданьского бассейна.



**Р и с. 4.** Значительные высоты волн: *a* – максимальные значения, зафиксированные за 40 лет; *b* – средние за 40 лет значения (*1–10* – контрольные ячейки)

**F i g. 4.** Significant wave heights: *a* – maximum values recorded over 40 years; *b* – 40-year average values (*1–10* – control cells)

Осредненные за 40 лет значительные высоты волн, полученные в результате расчетов, показаны на рис. 4, *b*. Видно, что максимальные значения этого параметра наблюдаются в Центральной Балтике на значительном удалении от берегов. Область максимальных значений смещена от продольной оси моря примерно на 50–100 км в сторону восточного берега и соответствует наибольшим длинам разгона волн для доминирующих западных и юго-западных ветров.

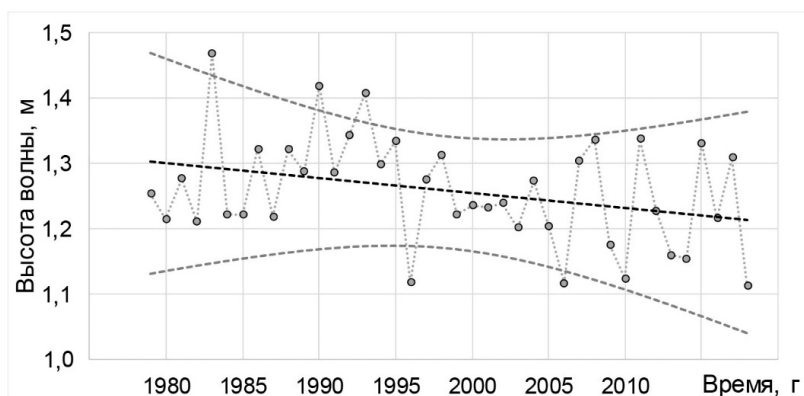
#### *Анализ временных серий*

Контрольные ячейки, из которых извлекались временные серии для средних за календарный год значительных высот волн с целью провести анализ тенденций изменчивости высоты ветровых волн, пронумерованы на рис. 4, *b*



(от 1 до 10). Большинство выбранных контрольных ячеек соответствуют тем районам, в которых в отдельные моменты времени фиксировались волны, чья значительная высота была максимальной в течение какого-нибудь момента из рассматриваемых 40 лет. Контрольные ячейки 1 и 3–9 были выбраны потому, что в них имели место случаи, когда рассчитанные значения значительной высоты волн превышали 8 м. В контрольных ячейках 2 и 10 расчеты не показали таких высоких волн, тем не менее эти ячейки были добавлены в исследование, чтобы полнее охватить акваторию Балтийского моря.

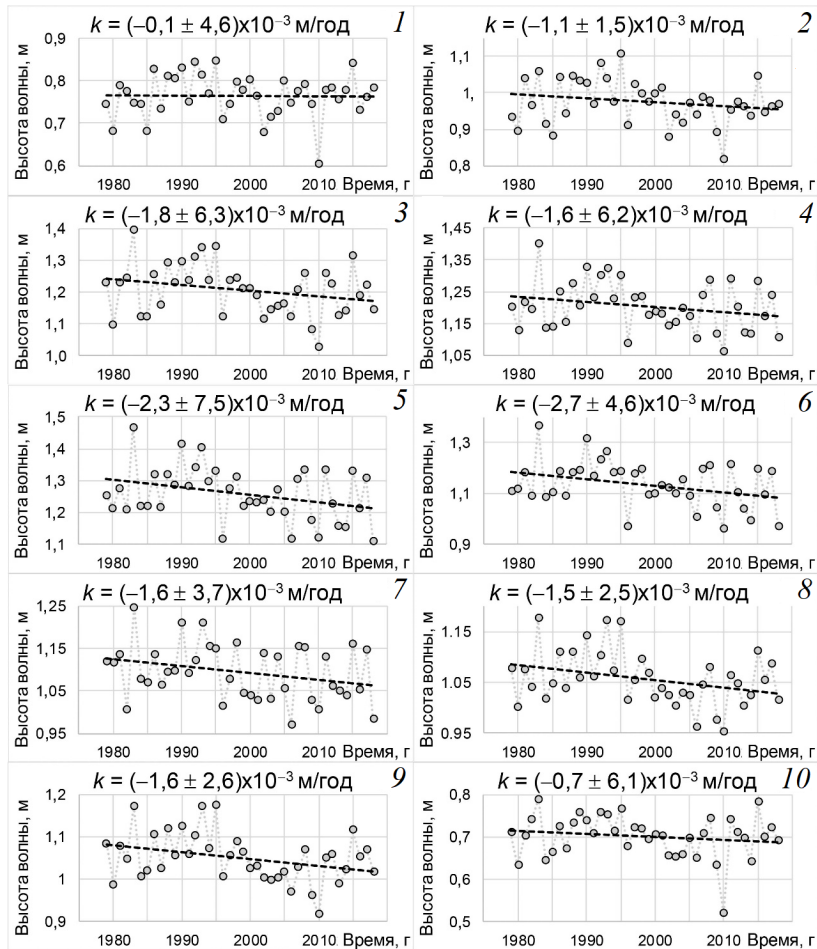
Район, представленный контрольной ячейкой 5, характеризуется тем, что средняя за весь рассматриваемый период значительная высота волн в нем является максимальной на всей акватории Балтийского моря (рис. 4). Расчет линейной регрессии [12, 13] по методу наименьших квадратов (коэффициенты линейной регрессии и их погрешности при 90%-ной доверительной вероятности) показывает, что в данной контрольной ячейке выявляется отрицательный тренд: уменьшение средней за год значительной высоты волн составляет  $(2,3 \pm 7,5) \cdot 10^{-3}$  м/год, а истинная линия регрессии находится (с вероятностью 90%) в пределах доверительного коридора, ограниченного на рис. 5 штриховыми линиями.



**Р и с. 5.** Изменения среднегодовой значительной высоты волны в ячейке 5 (см. рис. 4), линия тренда (толстая штриховая линия) и ее 90%-ный доверительный интервал (тонкая штриховая линия)

**F i g. 5.** Time series for annual average significant wave height in cell 5 (see Fig. 4), trend line (bold dotted line) and its 90%-confidence interval (thin dotted line)

Анализ временных серий для всех остальных контрольных ячеек (рис. 6) показывает, что и для этих ячеек наблюдаются отрицательные тренды: среднегодовые значительные высоты волн за последние 40 лет уменьшаются со скоростью, максимальной в Юго-Восточной Балтике (контрольные ячейки 5 и 6, см. рис. 4) и минимальной в Ботническом и Финском заливах (контрольные ячейки 1, 2 и 10, см. рис. 4). Говоря о статистической значимости выявленных трендов, следует отметить, что во всех рассмотренных случаях погрешность оценки их коэффициентов при доверительной вероятности 90% превышает сами найденные значения. Таким образом, на исследуемом интервале времени статистически значимых трендов не выявлено, хотя тенденция к снижению интенсивности волнения прослеживается.



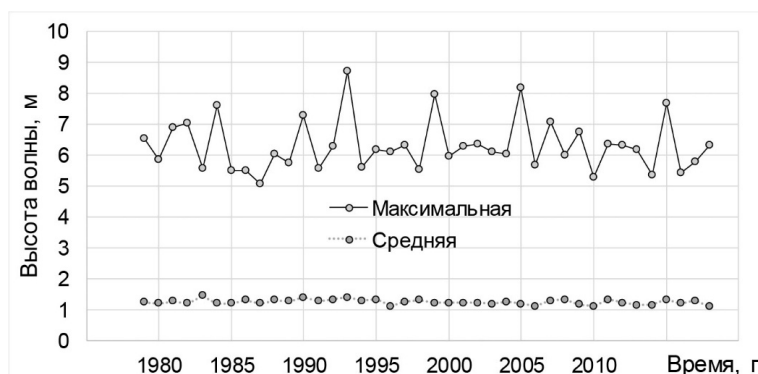
**Р и с. 6.** Временные серии средней за год значительной высоты волн в контрольных ячейках 1–10 (см. рис. 4) и их линейные тренды. Доверительная вероятность 90%

**F i g. 6.** Time series of annual average significant wave height in control cells 1–10 (see Fig. 4) and their linear trends. Confidence level is 90%

Представляет интерес сравнение межгодовой изменчивости средней за год значительной высоты волн с ее изменениями по тренду за весь период (т. е. с разностью между крайними значениями линии тренда). Результаты такого сравнения приведены в табл. 3. Например, для ячейки 5 уменьшение среднегодовой значительной высоты волны в соответствии с выявленным трендом составляет  $\sim 0,09$  м за 40 лет. В то же время средняя межгодовая изменчивость этого параметра, наблюдавшаяся за 40 лет, характеризуется средним значением, равным 0,1 м, и максимальным – 0,26 м. Можно видеть, что средние значения межгодовой изменчивости и изменения по тренду за 40 лет имеют один и тот же порядок величины во всех контрольных ячейках, кроме 1-й (средняя часть Ботнического залива), где тренд прослеживается слабее всего. Тот факт, что межгодовая изменчивость средней за год значительной высоты волн и изменения по тренду за весь период – числа одного порядка величины, свидетельствует в пользу вывода о наличии тренда.

**Межгодовая изменчивость и изменение по тренду среднегодовой значительной высоты волны (абсолютные значения)**  
**Interannual variability of the annual average significant wave height and its trend change (absolute values)**

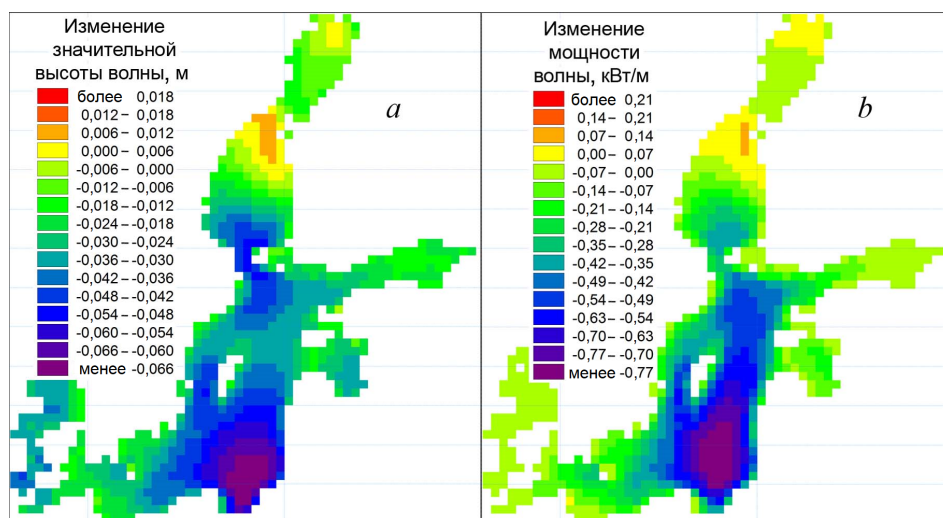
Ячейка / Cell	Межгодовая изменчивость, $10^{-2}$ м / Interannual variability, $10^{-2}$ m		Изменение по тренду за 40 лет, $10^{-2}$ м / Trend change for 40 years, $10^{-2}$ m
	Средняя / Average	Максимальная / Maximum	
1	6	17	0,4
2	7	20	4,4
3	8	27	7,2
4	9	27	6,4
5	10	26	9,2
6	10	28	11,0
7	8	24	6,4
8	6	16	6,0
9	6	17	6,4
10	5	22	2,8
Среднее / Mean value	7	22	6,0



**Р и с. 7.** Максимальные и средние за год значительные высоты волн для ячейки 5 (см. рис. 4)  
**F i g. 7.** Maximum and average annual values of significant wave heights for cell 5 (see Fig. 4)

Что касается максимальных за год значительных высот волн, то говорить о каких-либо трендах не приходится: очень велик разброс от года к году. Типичная временная серия (для контрольной ячейки 5, см. рис. 4) показана на рис. 7. Для сравнения также представлена временная серия средних значительных высот волн. Расчет линейного тренда максимальных значений дает  $(-1,5 \pm 128,0) \cdot 10^{-3}$  м/год. Если для средних значений значительной высоты волн погрешность коэффициента тренда хоть и превышает значение самого коэффициента тренда  $((-2,3 \pm 7,5) \cdot 10^{-3}$  м/год), но совпадает с ним по порядку величины, то для максимальных значений погрешность коэффициента тренда на два порядка больше самого коэффициента.

Тенденция к ослаблению волнения для всей акватории Балтийского моря в целом подтверждается сравнением значительной высоты и мощности волнения за первое и последнее десятилетия рассматриваемого 40-летнего периода. Сравнение проводилось так: были вычислены поля средней значительной высоты волны и мощности волнения за 1979–1988 гг. и 2009–2018 гг. Их разность (значения за последнее десятилетие минус значения за первое десятилетие) показана на рис. 8. Увеличение (крайне незначительное) высоты и мощности волн наблюдается только в средней и северной частях Ботнического залива. На всей остальной акватории мы видим снижение среднегодовых значений этих параметров. Это снижение наиболее заметно в Юго-Восточной Балтике.



**Р и с. 8.** Разность между средними за последнее (2009–2018 гг.) и первое (1979–1988 гг.) десятилетия рассматриваемого временного интервала значительными высотами волн (*a*) и мощностями волнения (*b*)

**F i g. 8.** Differences between the significant wave height (*a*) and wave power (*b*) average values in the last (2009–2018) and the first (1979–1988) decades of the time interval under study

### Выводы

Среднегодовые значительные высоты волн почти на всей акватории Балтийского моря за последние 40 лет имеют тенденцию к снижению со скоростью, не превышающей 2–3 мм в год или ~0,2–0,3% за год. Наибольшая скорость снижения наблюдается в Юго-Восточной Балтике, наименьшая – в Ботническом и Финском заливах. Межгодовая изменчивость средней за год значительной высоты волн и ее изменения по тренду за весь 40-летний период являются величинами одного порядка.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Trends and extremes of wave fields in the north-eastern part of the Baltic Proper / V. Broman [et al.] // *Oceanologia*. 2006. Vol. 48(S). P. 165–184. URL: [https://www.etis.ee/File/DownloadPublic/942d20a6-1b59-40f6-a000-45bd8a3c504c?name=Fail\\_Oceanologia\\_2006\\_Broman\\_et\\_al.pdf&type=application%2Fpdf](https://www.etis.ee/File/DownloadPublic/942d20a6-1b59-40f6-a000-45bd8a3c504c?name=Fail_Oceanologia_2006_Broman_et_al.pdf&type=application%2Fpdf) (date of access: 03.07.2020).

2. *Cieřlikiewicz W., Paplińska-Swerpel B.* A 44-year hindcast of wind wave fields over the Baltic Sea // *Coastal Engineering*. 2008. Vol. 55, iss. 11. P. 894–905. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.02.017>
3. Волновой климат Балтийского моря на основе результатов, полученных с помощью спектральной модели SWAN / А. Ю. Медведева [и др.] // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2015. № 1. С. 12–22.
4. Comparing a 41-year model hindcast with decades of wave measurements from the Baltic Sea / J.-V. Björkqvist [et al.] // *Ocean Engineering*. 2018. Vol. 152. P. 57–71. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.048>
5. *Soomere T., Räämet A.* Spatial patterns of the wave climate in the Baltic Proper and the Gulf of Finland // *Oceanologia*. 2011. Vol. 53(1-TI). P. 335–371. URL: <https://www.iopan.pl/oceanologia/531Tsoom.pdf> (date of access: 03.07.2020).
6. *Soomere T., Räämet A.* Long-term spatial variations in the Baltic Sea wave fields // *Ocean Science*. 2011. Vol. 7, iss. 1. P. 141–150. doi:10.5194/os-7-141-2011
7. Ледовый режим Балтийского моря / В. В. Драбкин [и др.] // *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том III. Балтийское море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия* / Под ред. Ф. С. Терзиева, В. А. Рожкова, А. И. Смирновой. СПб. : Гидрометеоиздат, 1992. Раздел 4.6. С. 320–329.
8. *Divinsky B. V., Kosyan R. D.* Spatiotemporal variability of the Black Sea wave climate in the last 37 years // *Continental Shelf Research*. 2017. Vol. 136. P. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.01.008>
9. MIKE 21 Wave Modelling. MIKE 21 Spectral Waves FM: Short description. Horsholm : DHI, 2007. 14 p. URL: [https://www.mikepoweredbydhi.com/-/media/shared%20content/mike%20by%20dhi/flyers%20and%20pdf/product-documentation/short%20descriptions/mike21\\_sw\\_fm\\_short\\_description.pdf](https://www.mikepoweredbydhi.com/-/media/shared%20content/mike%20by%20dhi/flyers%20and%20pdf/product-documentation/short%20descriptions/mike21_sw_fm_short_description.pdf) (date of access: 03.07.2020).
10. *Соколов А. Н., Чубаренко Б. В.* Анализ возможного влияния климатических изменений на параметры ветрового волнения в прибрежной зоне юго-восточной Балтики // *Известия КГТУ*. 2014. № 34. С. 43–51. URL: [http://klgtu.ru/upload/science/magazine/news\\_kstu/2014\\_34/sokolov.pdf](http://klgtu.ru/upload/science/magazine/news_kstu/2014_34/sokolov.pdf) (дата обращения: 06.07.2020).
11. *Sokolov A., Chubarenko B.* Numerical simulation of dynamics of sediments disposed in the marine coastal zone of the south-eastern Baltic // *Baltica*. 2018. Vol. 31, no. 1. P. 13–23. <https://doi.org/10.5200/baltica.2018.31.02>
12. *Дрејнер Н., Смут Г.* Прикладной регрессионный анализ: [в 2 кн.]. Кн. 1. М. : Финансы и статистика, 1986. 366 с. (Математико-статистические методы за рубежом).
13. *Pakhteev A., Stepanov A.* On simulation of normal records // *Communications in Statistics - Simulation and Computation*. 2019. Vol. 48, iss. 8. P. 2413–2424. doi:10.1080/03610918.2018.1457692

*Об авторах:*

**Соколов Андрей Николаевич** – старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36); доцент, Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта (236016, 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**, [tengritag@gmail.com](mailto:tengritag@gmail.com)

**Чубаренко Борис Валентинович** – заведующий лабораторией, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, **ResearcherID: I-6118-2016**, **Scopus Author ID: 6507102508**, **ORCID ID: 0000-0001-7988-1717**, [chuboris@mail.ru](mailto:chuboris@mail.ru)