

## Внутригодовая изменчивость волнового режима в глубоководной зоне Черного моря

Н. Н. Воронина, А. С. Запевалов\*

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

*\*e-mail: sevzepter@mail.ru*

Поступила 29.11.2019 г.; принята к публикации 21.02.2020 г.; опубликована 25.03.2020 г.

Приводятся результаты анализа внутригодовой изменчивости ветрового волнения Черного моря. Для анализа используется продукт, полученный с помощью численной спектральной модели *MFWAM*. Модель *MFWAM* ассимилирует данные альтиметров, установленных на спутниках *Jason-2* и *Jason-3*, *Saral* и *CryoSat-2*, с шагом по времени, равным 6 ч. Проанализирована пространственная изменчивость двух основных характеристик волнового поля: высоты значительных волн и среднего периода доминантных волн. Показано, что для глубоководной части Черного моря существует хорошо выраженная тенденция пространственного изменения интенсивности волнения: при перемещении на восток средние высоты значительных волн снижаются. Эта тенденция наблюдается во все сезоны. Средние за трехлетний период с 1 июня 2016 г. по 31 мая 2019 г. высоты значительных волн в западной части находятся в пределах 0.94–0.96 м, в восточной части – 0.62–0.78 м. Отношение средних высот значительных волн в зимний и летний периоды в восточной части моря составляет 2.3, в то время как в западной – 1.7. В изменениях периодов доминантных волн также прослеживается сезонный ход. Большие периоды наблюдаются зимой, меньшие – летом. Различия в значениях средних периодов между западной и восточной областями Черного моря выражены слабо. В осенний сезон они достигают 0.4 с, в остальные сезоны – 0.2 с.

**Ключевые слова:** высота волн, модель *MFWAM*, внутригодовая изменчивость, Черное море.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0003 «Фундаментальные исследования океанологических процессов, определяющих состояние и эволюцию морской среды под влиянием естественных и антропогенных факторов, на основе методов наблюдения и моделирования».

**Для цитирования:** Воронина Н. Н., Запевалов А. С. Внутригодовая изменчивость волнового режима в глубоководной зоне Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 60–68. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-60-68

© Воронина Н. Н., Запевалов А. С., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

# Annual Variability of the Wave Regime in the Deep Zone of the Black Sea

N. N. Voronina, A. S. Zapevalov\*

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

*\*e-mail: sevzepter@mail.ru*

Submitted 29.11.2019; revised 21.02.2020; published 25.03.2020

The analysis results of intra-annual variability of the Black Sea wind waves are presented. For analysis, a product obtained using the numerical spectral model MFWAM is used. The MFWAM model assimilates the data of altimeters installed on *Jason-2* and *Jason-3*, *Saral* and *CryoSat-2* satellites, with a time step of 6 hours. The spatial variability of two main characteristics of the wave field is analyzed: the significant wave height and average period of dominant waves. It is shown that for the deepwater part of the Black Sea there is a well-pronounced tendency of spatial changes in the intensity of waves: when moving eastward, the average values of the significant wave height decrease. This trend is observed in all seasons. The average values of a significant height in the western part for the three-year period from June 1, 2016 to May 31, 2019 are 0.94–0.96 m, those in the eastern part are 0.62–0.78 m. The ratio of the average values of the significant wave height in winter and summer in the eastern part is 2.3, while that in the western part is 1.7. A seasonal variation is also observed for changes in the periods of dominant waves. Larger periods are observed in winter, while smaller ones – in summer. The differences in the mean periods between the western and eastern regions of the Black Sea are mild. In autumn season, they reach 0.4 s, in other seasons – 0.2 s.

**Keywords:** wave height, MFWAM model, annual variability, Black Sea.

**Acknowledgments:** the research is performed under state order on topic no. 0827-2018-0003 “Fundamental studies of oceanological processes that determine the state and evolution of the marine environment under the influence of natural and anthropogenic factors, based on methods of observation and modeling”.

**For citation:** Voronina, N.N. and Zapevalov, A.S., 2020. Annual Variability of the Wave Regime in the Deep Zone of the Black Sea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 60–68. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-60-68 (in Russian).

В глубоководной части Черного моря не проводятся регулярные инструментальные измерения поверхностного волнения. В этой ситуации сведения об изменчивости волнения получают путем численного моделирования. В настоящее время для моделирования поля поверхностных волн на Черном море используется ряд численных спектральных моделей [1–4], между которыми отсутствуют принципиальные концептуальные различия [5].

Качество получаемого с помощью численных моделей продукта может быть повышено, если в них ассимилируются непосредственно измеренные характеристики этого продукта. В моделях, описывающих поверхностное волнение, ассимилируются данные измерений волнографических буев [6] или данные о высоте значительных волн, полученные с помощью спутниковых альтиметров [7].

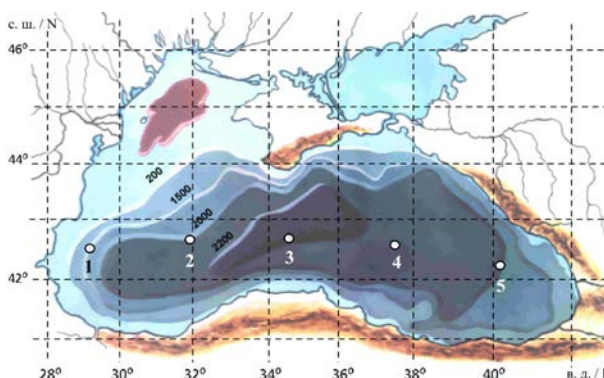
Наиболее важным практическим приложением результатов исследования волновых полей в океане является использование этих результатов при

расчетах воздействия волн на суда. Основные параметры, которые необходимо знать, чтобы определить поведение судна в разных ситуациях, – это высоты волн и их периоды [8, 9].

Целью работы является анализ сезонной изменчивости волнового режима Черного моря. Для анализа мы используем продукт *GLOBAL\_ANALYSIS\_FORECAST\_WAV\_001\_027*<sup>1</sup>, созданный с помощью численной спектральной модели *MFWAM* (*Meteo France WAve Model*). Модель *MFWAM* ассимилирует данные альтиметров, установленных на спутниках *Jason-2* и *Jason-3*, *SARAL* и *CryoSat-2*, с шагом по времени, равным 6 ч. Модельные расчеты проводятся с шагом по времени, равным 3 ч, на сетке с размерами ячеек 1/12° (~ 8 км) [10].

**Сезонные изменения высоты значительных волн.** Сезонный ход изменчивости интенсивности ветрового волнения исследовался в пяти точках Черного моря. Выбранные для анализа географические точки показаны на рис. 1. Все точки расположены в той части моря, где глубина превышает 1000 м. Для анализа использовались данные, полученные за трехлетний период с 1 июня 2016 г. по 31 мая 2019 г.

Параметром, обуславливающим интенсивность волнения, является высота значительных волн  $H_s$ , которая определяется как средняя высота 1/3 самых высоких волн. Если возвышения морской поверхности подчиняются закону распределения Гаусса и если энергетический спектр является узкополосным, то распределение амплитуд волн  $H$  описывается законом Рэлея<sup>2</sup>:



Р и с. 1. Географические точки, в которых анализировалась сезонная изменчивость интенсивности ветрового волнения

Fig. 1. Geographical points where seasonal variability of wind wave intensity was analyzed

$$P_R(H) = \frac{H}{4\sigma^2} \exp\left(-\frac{H^2}{8\sigma^2}\right), \quad (1)$$

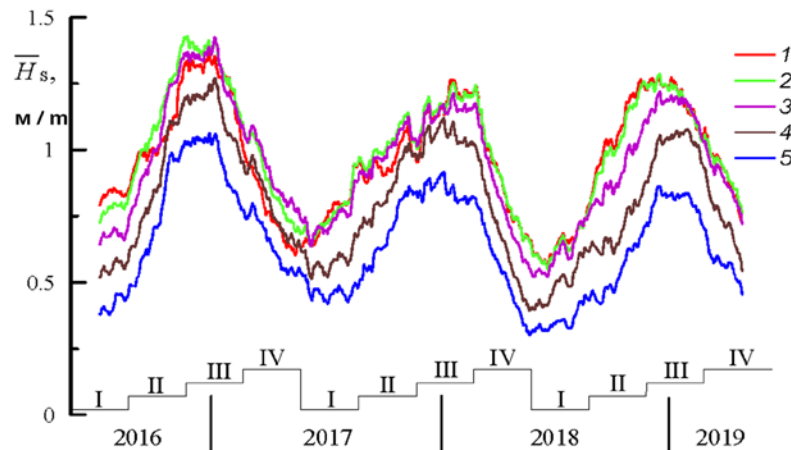
где  $\sigma^2$  – дисперсия возвышений морской поверхности. В этом случае высота значительных волн

$$H_s = 4\sigma. \quad (2)$$

Высота значительных волн характеризуется сильной изменчивостью, поэтому для визуализации ее сезонного хода исходные ряды были сглажены

<sup>1</sup> URL: <http://resources.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-GLO-PUM-001-027.pdf> (дата обращения: 10.03.2020).

<sup>2</sup> Трухин В. И., Показеев К. В., Куницын В. Е. Общая и экологическая геофизика. М.: Физматлит, 2005. 571 с.



Р и с. 2. Изменения высоты значительных волн  $\bar{H}_S$  в период с 1 июня 2016 г. по 31 мая 2019 г. Кривые 1–5 соответствуют географическим точкам, представленным на рис. 1; римскими цифрами указаны сезоны: I – лето; II – осень; III – зима; IV – весна

Fig. 2. Changes in significant wave height  $\bar{H}_S$  for the period from June 1, 2016 to May 31, 2019. Curves 1–5 correspond to geographical points shown in Fig. 1. Roman numerals stand for: I – summer; II – autumn; III – winter; IV – spring

фильтром скользящего среднего. Сглаженные значения обозначим как  $\bar{H}_S$ . Длина фильтра скользящего среднего соответствовала длительности одного сезона (3 мес.).

Внутригодовой ход высоты значительных волн представлен на рис. 2. Видно, что во всех точках он хорошо выражен, в зимние месяцы значения параметра  $\bar{H}_S$  примерно в два раза выше, чем в летние. Обращает на себя следующая характерная особенность: по мере смещения на восток значения  $\bar{H}_S$  уменьшаются. Это означает, что интенсивность волнения в западной части Черного моря выше, чем в восточной. Подобные изменения  $\bar{H}_S$ , как будет показано ниже, характерны для всех сезонов.

Чтобы получить количественные оценки пространственных изменений высоты значительных волн, рассчитаем ее средние за весь рассматриваемый период значения. В западной части Черного моря в точках 1 и 2 средние значения равняются 0.94 и 0.96 м, в центральной части (точка 3) – 0.92 м, в восточной части в точках 4 и 5 – 0.78 и 0.62 м.

Количественно сезонный ход высоты значительных волн отображает табл. 1. Наиболее сильно сезонный ход выражен в восточной части Черного моря. В восточной части отношение значений  $\bar{H}_S$  в зимний и летний периоды равняется 2.3, в то время как в западной – 1.7. Наиболее сильное различие в интенсивности волнения между западной и восточной частями наблюдается в летний период, когда отношение значений  $\bar{H}_S$  в точках 1 и 5 равняется 1.9. Для сравнения: в зимний период это отношение равно 1.4. Наблюдаемые пространственные изменения высоты значительных волн, возможно, связаны с особенностями атмосферной циркуляции над Черным морем.

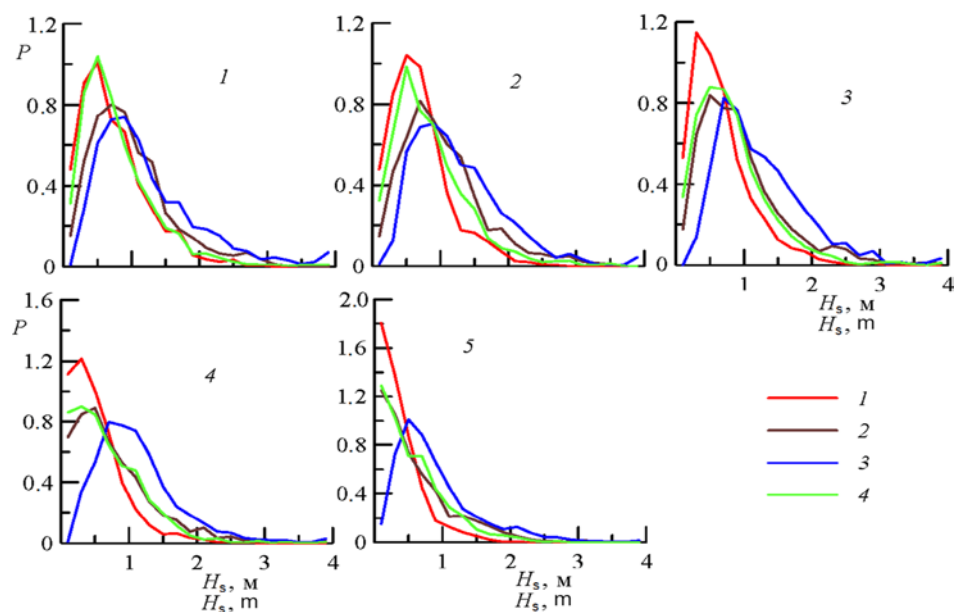
Т а б л и ц а 1. Средние за сезон высоты значительных волн  $\overline{H}_s$   
 Table 1. Seasonal mean values for significant wave height  $\overline{H}_s$

Номер точки (рис. 1) / Point number (Fig. 1)	$\overline{H}_s, \text{ м / m}$			
	Лето / Summer	Осень / Autumn	Зима / Winter	Весна / Spring
1	0.74	0.99	1.25	0.81
2	0.70	1.03	1.27	0.85
3	0.66	0.95	1.25	0.83
4	0.53	0.77	1.13	0.70
5	0.39	0.63	0.91	0.57

**Плотность вероятностей высот значительных волн.** При дальнейшем анализе в качестве эмпирической функции плотности вероятностей высот значительных волн  $P(H_s)$  будем использовать ее нормированную гистограмму. Вид функций  $P(H_s)$  в разные сезоны в пяти выбранных точках показан на рис. 3.

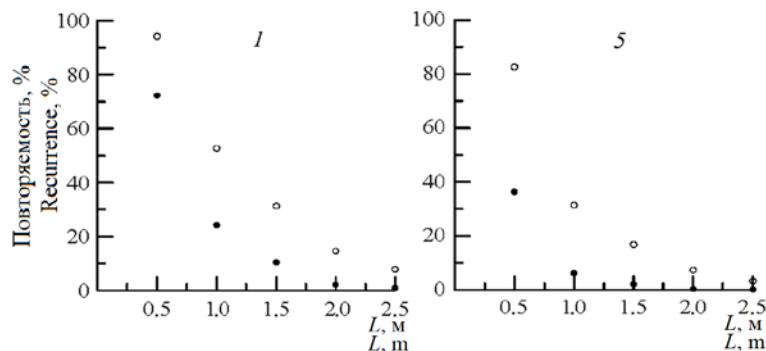
При построении рис. 3 в процедуре нормирования учитывалось число точек, по которым построена гистограмма, а также интервал гистограммы (карман). Интервал гистограммы принят равным 0.2 м.

Оценим повторяемость волн, имеющих среднюю высоту значительных волн, превышающую уровень  $L$ . Повторяемость волнения определяется как



Р и с. 3. Эмпирическая функция плотности вероятностей  $P(H_s)$  (1 – лето; 2 – осень; 3 – зима; 4 – весна)

Fig. 3. Empirical probability density function  $P(H_s)$  (1 – summer; 2 – autumn; 3 – winter; 4 – spring)



Р и с. 4. Повторяемость волн со значительной высотой, превышающей уровень  $L$  в указанных на рис. 1 точках 1 и 5. Черные точки соответствуют летнему, белые – зимнему периоду

Fig. 4. Recurrence of waves with a significant height exceeding level  $L$  in points 1 and 5 shown in Fig. 1. Black dots correspond to summer, white ones correspond to winter

вероятность появления волн с заданной характеристикой из общего числа наблюдений.

Рассмотрим зимний и летний сезоны, которые соответствуют сильному и слабому волнению. Зададим изменения уровня  $L$  в пределах от 0.5 до 2.5 м с шагом 0.5 м. Результаты расчетов повторяемости высоты значительных волн в западной (1) и в восточной (5) точках (см. рис. 1) в летний и зимний периоды представлены на рис. 4.

Отсутствие систематических данных прямых измерений волнения в глубоководной зоне Черного моря затрудняет оценку полученных величин обеспеченности. Среди доступных источников были найдены оценки обеспеченности высоты значительных волн в летний период, полученные на морской стационарной газодобывающей платформе «Голицыно-4», расположенной на северо-западном шельфе Черного моря [11]. Это наиболее близкая для сравнения точка, где проводились волнографические измерения. По данным [11], повторяемость волн со значительной высотой более 0.5 м на шельфе составила в среднем за лето 33 %. В настоящей работе эта повторяемость в западной точке (1) в летний период составляет 72 %.

Подобные различия, вероятно, связаны с разными условиями генерации волн в глубоководной зоне и на шельфе Черного моря. Они также могут быть связаны с тем, что измерения на платформе «Голицыно-4» проводились в периоды 1995–2002 гг. и 2008–2011 гг., в то время как анализируемые здесь данные получены в период с 1 июня 2016 г. по 31 мая 2019 г., т. е. связаны с межгодовой изменчивостью.

**Период доминантных волн.** Период энергонесущих доминантных волн  $T_0$  в модели *MFWAM* определен с помощью средней частоты, рассчитанной с весом, пропорциональным уровню волнового спектра:

$$f_0 = \sigma^{-2} \int f \Psi(f) df, \quad (3)$$

где  $\Psi(f)$  – волновой спектр. Соответственно период доминантных волн  $T_0 = 1/f_0$ .

Т а б л и ц а 2. Средние за сезон значения периодов доминантных волн  $T_0$ T a b l e 2. Seasonal mean values for dominant wave periods  $T_0$ 

Номер точки (рис. 1) / Point number (Fig. 1)	$T_0$ , с / sec			
	Лето / Summer	Осень / Autumn	Зима / Winter	Весна / Spring
1	4.7	5.4	5.6	5.0
2	4.6	5.4	5.8	5.0
3	4.6	5.2	5.8	4.9
4	4.5	5.2	5.7	4.8
5	4.5	5.0	5.7	4.8

В изменениях периода  $T_0$ , как и в изменениях высоты значительных волн, прослеживается сезонный ход. Большие периоды наблюдаются зимой, меньшие – летом (табл. 2). Различия между средними значениями периодов энергонесущих доминантных волн в западной и восточной частях Черного моря выражены слабо. В осенний сезон они составляют 0.4 с, в остальные сезоны – 0.2 с.

### Заключение

Проведен анализ внутригодовой изменчивости ветрового волнения Черного моря. Для анализа был использован продукт, полученный с помощью численной спектральной модели *MFWAM*.

Интенсивность волнения, которую характеризует высота значительных волн, существенно зависит от сезона. Отмечено различие в характеристиках волнения в западной и восточной частях Черного моря. Показано, что интенсивность волнения в западной части выше, чем в восточной. Средние за рассматриваемый период высоты значительных волн в западной части лежат в пределах 0.94–0.96 м, в восточной части – 0.62–0.78 м. Отношение средних высот значительных волн в зимний и летний периоды в восточной части равняется 2.3, в то время как в западной – 1.7.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Booij N., Ris R. C., Holthuijsen L. H.* A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1999. Vol. 104, iss. C4. P. 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
2. *Михайличенко С. Ю., Гармашов А. В., Фомин В. В.* Верификация модели ветрового волнения SWAN по наблюдениям на стационарной океанографической платформе Черноморского гидрофизического полигона РАН // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. Севастополь : МГИ, 2016. Вып. 2. С. 52–57.
3. Validation of the WAMC4 wave model for the Black Sea / *Z. Cherneva [et al.] // Coastal Engineering*. 2008. Vol. 55, iss. 11. P. 881–893. doi:10.1016/j.coastaleng.2008.02.028
4. System of the wind wave operational forecast in the Black Sea marine forecast center / *Yu. B. Ratner [et al.] // Physical Oceanography*. 2017. Iss. 5. P. 51–59. doi:10.22449/1573-160X-2017-5-51-59

5. *Дивинский Б. В., Косьян Р. Д.* Климатические тенденции в волновом энергетическом потенциале Черного и Азовского морей по результатам численного моделирования // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. Севастополь : МГИ, 2016. Вып. 1. С. 15–22.
6. *Sannasiraj S. A., Goldstein M. G.* Optimal interpolation of buoy data into a deterministic wind–wave model // *Natural Hazards*. 2009. Vol. 49, iss. 2. P. 261–274. <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9291-x>
7. *Francis P. E., Stratton R. A.* Some experiments to investigate the assimilation of SEASAT altimeter wave height data into a global wave model // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1990. Vol. 116, iss. 495. P. 1225–1251. <https://doi.org/10.1002/qj.49711649512>
8. *ХаскинД М. Д.* Теория сопротивления при движении судна на волнении // *Известия АН СССР*. 1959. № 2. С. 46–56.
9. *Юдин Ю. И., Иванов В. В.* Переменные составляющие воздействия регулярного волнения на корпус судна // *Вестник Мурманского государственного технического университета*. 2011. Т. 14, № 3. С. 471–476.
10. Semiempirical dissipation source functions for ocean waves. Part I: definition, calibration, and validation / F. Ardhuin [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2010. Vol. 40, no. 9. P. 1917–1941. <https://doi.org/10.1175/2010JPO4324.1>
11. *Гармашов А. В.* Ветровое волнение в северо-западной части Черного моря в летний период // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2018. № 8(74). С. 74–76. doi:10.23670/IRJ.2018.74.8.014

*Об авторах:*

**Запевалов Александр Сергеевич** – главный научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-9942-2796**, **Scopus Author ID: 7004433476**, **ResearcherID: V-7880-2017**, [sevzepter@mail.ru](mailto:sevzepter@mail.ru)

**Воронина Наталья Николаевна** – ведущий инженер-программист, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0001-7301-2609**, **Scopus Author ID: 57188805334**, **ResearcherID: V-7646-2018**, [voronina.nataly@mail.ru](mailto:voronina.nataly@mail.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

**Запевалов Александр Сергеевич** – постановка задачи исследования, выбор средств статистического анализа, формирование статьи

**Воронина Наталья Николаевна** – выборка данных для статистического анализа волнения, анализ статистических характеристик ветровых волн

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### REFERENCES

1. Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H., 1999. A Third-Generation Wave Model for Coastal Regions: 1. Model Description and Validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), pp. 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
2. Mikhailichenko, S.Yu., Garmashov, A.V. and Fomin, V.V., 2016. Verification of the Swan Wind Waves Model by Observations on the Stationary Oceanographic Platform of the Black Sea Hydrophysical Polygon of RAS. In: MHI, 2016. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*. Sevastopol: MHI. Iss. 2, pp. 55–57 (in Russian).



3. Cherneva, Z., Andreeva, N., Pilar, P., Valchev, N., Petrova, P. and Guedes Soares, C., 2008. Validation of the WAMC4 Wave Model for the Black Sea. *Coastal Engineering*, 55(11), pp. 881–893. doi:10.1016/j.coastaleng.2008.02.028
4. Ratner, Yu.B., Fomin, V.V., Ivanchik, A.M. and Ivanchik, M.V., 2017. System of the Wind Wave Operational Forecast by the Black Sea Marine Forecast Center. *Physical Oceanography*, (5), pp. 51–59. doi:10.22449/1573-160X-2017-5-51-59
5. Divinsky, B.V. and Kos'yan, R.D., 2016. The Black Sea and Sea of Azov Wave Regime: Results of Numerical Simulation. In: MHI, 2016. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*. Sevastopol: MHI. Iss. 1, pp. 15–22 (in Russian).
6. Sannasiraj, S.A. and Goldstein, M.G., 2009. Optimal Interpolation of Buoy Data into a Deterministic Wind–Wave Model. *Natural Hazards*, 49(2), pp. 261–274. <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9291-x>
7. Francis, P.E. and Stratton, R.A., 1990. Some Experiments to Investigate the Assimilation of SEASAT Altimeter Wave Height Data into a Global Wave Model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 116(495), pp. 1225–1251. <https://doi.org/10.1002/qj.49711649512>
8. Khaskind, M.D., 1959. [Drag Theory for Vessel Motion in a Seaway]. *Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR*, (2), pp. 46–56 (in Russian).
9. Yudin, Yu.I. and Ivanov, V.V., 2011. Variable Components of Influence of Regular Choppy Sea on a Vessel Hull. *Vestnik of MSTU*, 14(3), pp. 471–476 (in Russian).
10. Ardhuin, F., Rogers, E., Babanin, A.V., Filipot, J., Magne, R., Roland, A., van der Westhuysen, A., Queffelec, P., Lefevre, J., Aouf, L. and Collard, F., 2010. Semiempirical Dissipation Source Functions for Ocean Waves. Part I: Definition, Calibration, and Validation. *Journal of Physical Oceanography*, 40(9), pp. 1917–1941. <https://doi.org/10.1175/2010JPO4324.1>
11. Garmashov, A.V., 2018. Wind Wave in Northwest Part of the Black Sea in Summer Period. *International Research Journal*, 8(74), pp. 74–76 (in Russian). doi:10.23670/IRJ.2018.74.8.014

*About the authors:*

**Aleksandr S. Zapevalov**, Chief Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), **ORCID ID: 0000-0001-9942-2796**, **Scopus Author ID: 7004433476**, **ResearcherID: V-7880-2017**, [sevzepter@mail.ru](mailto:sevzepter@mail.ru)

**Nataly N. Voronina**, Leading Engineer-Programmer, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0001-7301-2609**, **Scopus Author ID: 57188805334**, **ResearcherID: V-7646-2018**, [voronina.nataly@mail.ru](mailto:voronina.nataly@mail.ru)

*Contribution of the Authors:*

**Aleksandr S. Zapevalov** – research objective setting, choice of statistical analysis tools, article composition.

**Nataly N. Voronina** – data selection for wave statistical analysis, analysis of wind wave statistical characteristics.

*All the authors have read and approved the final manuscript.*