

Вероятность появления аномальных волн в прибрежной зоне Черного моря у Южного берега Крыма

А. С. Запевалов*, А. В. Гармашов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

*e-mail: sevzepter@mail.ru

Аннотация

Проведен анализ вероятности появления аномальных волн в прибрежной зоне Черного моря. Анализ основан на данных волновых измерений, проведенных на стационарной океанографической платформе Морского гидрофизического института РАН. Для выделения аномальных волн использовались два индекса. Первый индекс AI является соотношением максимальной и значимой высот волн, второй индекс CI – отношением максимальной высоты гребня и значимой высоты волн. Значения индекса AI в основном лежат в пределах от 1.25 до 2.75, значения индекса CI – в пределах от 0.7 до 1.5. Показано, что оба индекса статистически не зависят от крутизны волн и коэффициента асимметрии, высокая корреляция наблюдается только с коэффициентом эксцесса λ_4 . Коэффициенты корреляции между AI и λ_4 и между CI и λ_4 соответственно равны 0.57 и 0.49. Вероятность появления аномальных волн, рассчитанная на основе индекса AI , выше, чем рассчитанная на основе индекса CI . Это объясняется тем, что существуют три формы аномальных волн, которые идентифицируются следующим образом: положительная, при которой высота гребня в полтора раза больше глубины впадины, отрицательная, при которой глубины впадины в полтора раза больше высоты гребня, и знакопеременная (промежуточная). Индекс CI не позволяет выделять аномальные волны отрицательной формы и не во всех ситуациях выделяет аномальные волны знакопеременной формы. Коэффициент корреляции между индексами AI и CI равен 0.64.

Ключевые слова: аномальные волны, индекс аномальности, крутизна, коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса, Черное море

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ № 0555-2021-0003.

Для цитирования: Запевалов А. С., Гармашов А. В. Вероятность появления аномальных волн в прибрежной зоне Черного моря у Южного берега Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 3. С. 6–15. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-6-15

© Запевалов А. С., Гармашов А. В., 2022



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

Probability of the Appearance of Abnormal Waves in the Coastal Zone of the Black Sea at the Southern Coast of Crimea

A. S. Zapevalov*, A. V. Garmashov

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

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

Abstract

The paper analyzes the probability of appearance of abnormal waves in the coastal zone of the Black Sea. The analysis is based on the data of wave measurements carried out on a stationary oceanographic platform of the Marine Hydrophysical Institute of RAS. Two indices were used to identify abnormal waves. The first index AI is the ratio of the maximum and significant wave heights, the second index CI is the ratio of the maximum crest height and significant wave height. The values of the AI index are mainly in the range from 1.25 to 2.75, the values of the CI index are in the range from 0.7 to 1.5. It is shown that both indices are statistically independent of the steepness and the skewness, a high correlation is observed only with the excess kurtosis λ_4 . The correlation coefficients between AI and λ_4 and between CI and λ_4 are 0.57 and 0.49, respectively. The probability of appearance of abnormal waves calculated on the basis of the AI index is higher than that calculated on the basis of the CI index. This is explained by the fact that there are three forms of abnormal waves, which are identified as follows: positive form, whose crest is more than 50 % higher than its trough with respect to the mean sea level, negative form, whose troughs are more than 50 % greater than their crests and a sign-variable form (intermediate). The CI index does not allow distinguishing abnormal waves of a negative form and not always distinguishes abnormal waves of a sign-variable form. The correlation coefficient between indices AI and CI is 0.64.

Keywords: abnormal wave, abnormality index, steepness, skewness, excess kurtosis, Black Sea

Acknowledgments: the work was carried out under state assignment of FSBSI FRC MHI no. 0555-2021-0003.

For citation: Zapevalov, A.S. and Garmashov, A.V., 2022. Probability of the Appearance of Abnormal Waves in the Coastal Zone of the Black Sea at the Southern Coast of Crimea. *Ecological Safety of the Coastal and Shelf Zones of the Sea*, (3), pp. 6–15. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-6-15

Введение

Несмотря на достаточно длительную историю, исследования условий появления аномально высоких волн продолжают привлекать повышенное внимание. За появление аномально высоких волн могут быть ответственны несколько физических механизмов [1, 2]. Такими механизмами на глубокой воде являются модуляционная неустойчивость волновых пакетов [3, 4], нелинейно-дисперсионная фокусировка [5, 6], взаимодействие с течениями [7], геометрическая фокусировка и нелинейное взаимодействие непараллельных систем волн [8, 9].

В качестве критерия, характеризующего аномальные волны, используется индекс аномальности AI (*abnormality index*) [10–12]

$$AI = H_{\max} / H_S,$$

где H_{\max} – максимальная в течение сеанса измерений высота волны; H_S – значимая высота волн, равная средней высоте 1/3 самых высоких волн. Аномальными принято считать волны, высота которых более чем в два раза превышает значимую высоту фонового волнения, т. е. волны, для которых выполняется условие

$$AI > 2. \quad (1)$$

В последние годы предпринимаются интенсивные попытки найти связь между появлением аномальных волн и характеристиками состояния морской поверхности [12].

Вероятность того, что $AI > 2$ (обозначим ее как P_A), в зависимости от региона меняется в широких пределах, что, вероятно, связано с многообразием приводящих к появлению аномальных волн физических механизмов. По измерениям у западного побережья Индии, $P_A = 0.46\%$ [11]. По измерениям в штормовых условиях с помощью направленного вниз радара на двух платформах, установленных в Северном море, волнографом, размещенным на платформе в Мексиканском заливе, и с помощью волнового буя у побережья Португалии, среднее значение P_A равно 3.6 % [13].

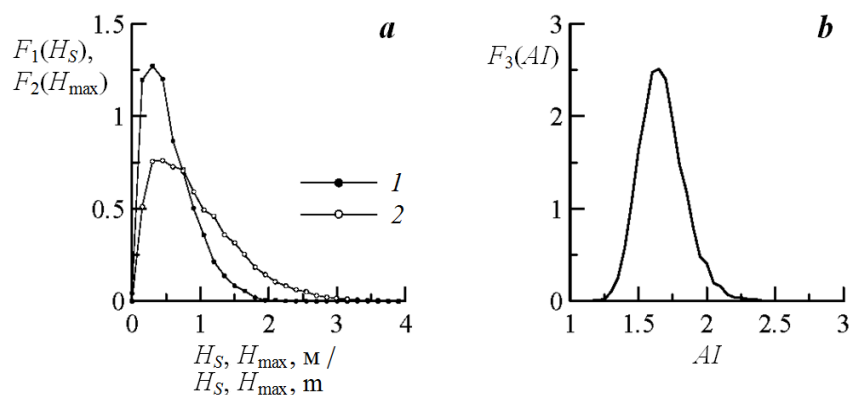
Целью настоящей работы является анализ зависимости индекса AI от интегральных параметров, характеризующих состояние морской поверхности в прибрежной зоне Черного моря.

Измерения параметров волнения и условия проведения измерений

Исследования поверхностных волн проводились на стационарной океанографической платформе Морского гидрофизического института РАН, расположенной в прибрежной части Черного моря у Южного берега Крыма. Минимальное расстояние от платформы до береговой черты составляет около 600 м. Глубина моря в точке, где установлена платформа, составляет около 30 м. Для измерения параметров волн использовался резистивный волнограф, датчиком которого является нихромовая струна, навитая с постоянным шагом на несущий кабель-трос. Для минимизации влияния возмущений морской поверхности, создаваемых опорами платформы, волновые измерения проводились в точке, удаленной от ближайшей опоры на расстояние не менее 6 м. Описание измерительной аппаратуры и условий проведения измерений на стационарной океанографической платформе приведено в работах [14–17].

Волновые измерения и измерения скорости ветра с несколькими небольшими перерывами проводились в период с 01.05.2018 по 31.01.2019. Непрерывные измерения были разбиты на сеансы длительностью 20 мин. Для каждого сеанса вычислялись статистические характеристики волн, а также средняя скорость и направление ветра. Общий объем данных составляет более 17 000 сеансов измерений.

В указанный период скорость ветра менялась от штилевых значений до 26 м/с, максимальное значение значительной высоты волн H_S равнялось 2.3 м, максимальная высота волн H_{\max} достигала 5.0 м. Эмпирические функции



Р и с. 1. Распределения характеристик поверхностных волн в период измерений: *a* – значительной высоты волн $F_1(H_S)$ (кривая 1) и максимальной высоты $F_2(H_{\max})$ (кривая 2), *b* – индекса аномальности $F_3(AI)$

Fig. 1. Distributions of surface wave characteristics during the measurement period: *a* – significant wave height $F_1(H_S)$ (curve 1) and maximum height $F_2(H_{\max})$ (curve 2), *b* – abnormality index $F_3(AI)$

плотности вероятностей этих волновых параметров, которые обозначим как $F_1(H_S)$ и $F_2(H_{\max})$, представлены на рис. 1. Также на рис. 1 приведена эмпирическая функция плотности вероятностей индекса аномальности $F_3(AI)$.

Полученные для прибрежной зоны Черного моря значения AI лежат в диапазоне $1.1 < AI < 2.8$. Вероятность появления аномальных волн, для которых $AI > 2$, составила 3.3 %.

Связь индекса аномальности AI с крутизной и асимметрией

К появлению аномальных волн приводят нелинейные физические механизмы [12]. Чтобы сравнить относительный уровень нелинейности используется крутизна волн [18, 19]. Крутизна гравитационных волн на глубокой воде, удовлетворяющих дисперсионному соотношению $\omega^2 = gk$, определяется как

$$\varepsilon = \sqrt{\xi^2} k_0 = \sqrt{\xi^2} \omega_0^2 / g,$$

где ξ^2 – дисперсия возвышений морской поверхности; k – волновое число; ω – частота; g – гравитационное ускорение; индекс «0» означает соответствие данного параметра пику в волновом спектре.

Связь индекса аномальности и крутизны волн отображена на рис. 2. Видно, что AI почти не зависит от крутизны волн. Коэффициент корреляции между параметрами AI и ε равен 0.06.

Следствием нелинейности морских поверхностных волн является отклонение распределения возвышений морской поверхности от распределения Гаусса. Основными параметрами, которые описывают влияние нелинейности на геометрические характеристики волн, являются коэффициенты асимметрии и эксцесса [9, 19], которые можно использовать как меру нелинейности [3].

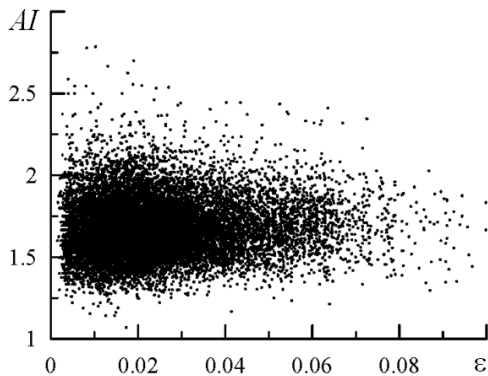


Рис. 2. Зависимость индекса аномальности AI от крутизны ε

Fig. 2. Dependence of the abnormality index AI on the steepness ε

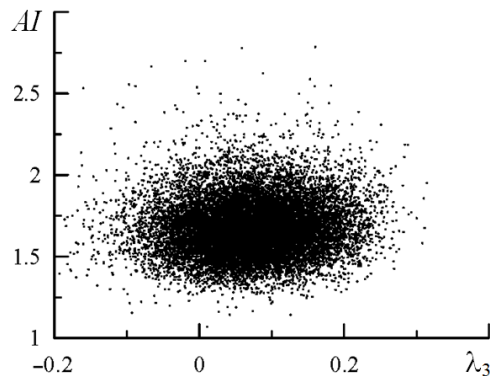


Рис. 3. Зависимость индекса аномальности AI от коэффициента асимметрии λ_3

Fig. 3. Dependence of the abnormality index AI on the skewness λ_3

Для случайной величины ξ с нулевым средним значением коэффициент асимметрии равен

$$\lambda_3 = \overline{\xi^3} / \overline{\xi^2}^{3/2},$$

где черта сверху означает осреднение.

Связь индекса аномальности и коэффициента асимметрии отображена на рис. 3. Коэффициент корреляции между параметрами AI и λ_3 равен 0.06.

В ряде теоретических работ в рамках анализа разных физических механизмов показано, что увеличение коэффициента эксцесса должно приводить к увеличению вероятности появления аномальных волн [5, 20]. Коэффициент эксцесса равен

$$\lambda_4 = \overline{\xi^4} / \overline{\xi^2}^2 - 3.$$

Общей тенденцией, как следует из рис. 4, является рост AI с увеличением λ_4 . Коэффициент корреляции между параметрами AI и λ_4 равен 0.57. Линейная регрессия, описывающая зависимость индекса AI от коэффициента эксцесса, имеет вид

$$AI = 0.628 \lambda_4 + 1.665. \quad (2)$$

Среднеквадратическое отклонение равно 0.10. В ранее проведенных исследованиях были получены близкие регрессионные зависимости:

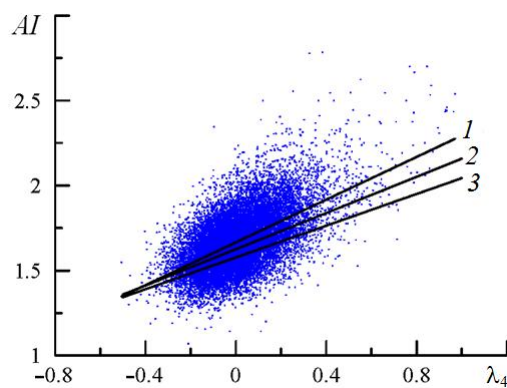


Рис. 4. Зависимость индекса аномальности AI от коэффициента эксцесса λ_4 . Линии 1–3 соответствуют регрессиям (2)–(4)

Fig. 4. Dependence of the abnormality index AI on the excess kurtosis λ_4 . Lines 1–3 correspond to regressions (2)–(4)

в работе [13]

$$AI = 0.533 \lambda_4 + 1.625 \quad (3)$$

и в работе [10]

$$AI = 0.467 \lambda_4 + 1.577 . \quad (4)$$

Зависимость индекса AI от λ_4 также наблюдалась в детально исследованном шторме на Черном море (осень 2009 г.) [21].

Таким образом, из рассмотренной здесь тройки параметров (ε , λ_3 , λ_4) только коэффициент эксцесса статистически связан с индексом аномальности.

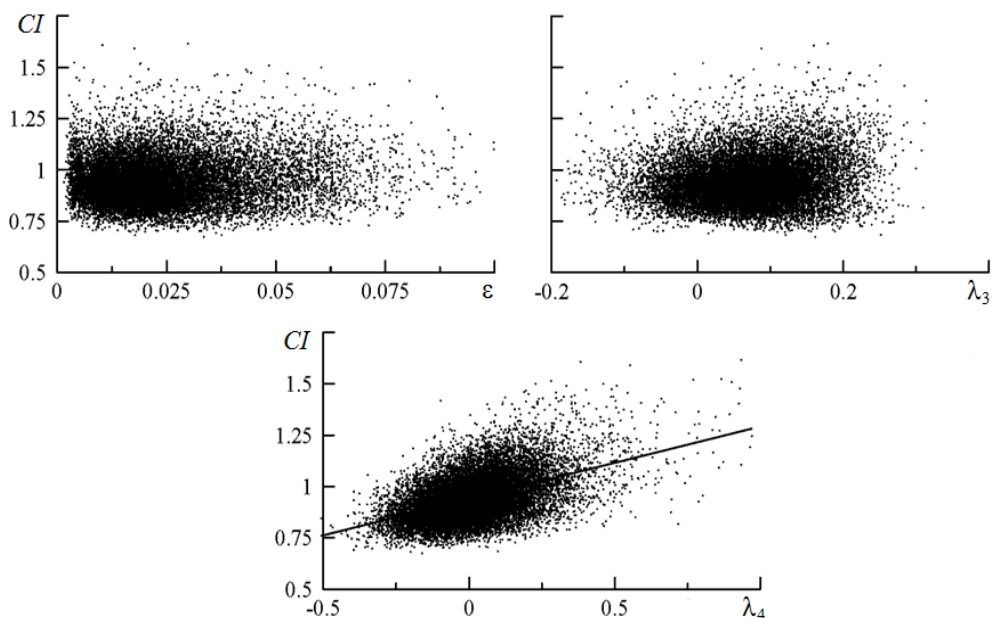
Связь индекса аномальности с высотой гребня волн

Наряду с условием $AI > 2$ для выделения аномальных волн иногда используется условие [12]

$$CI = C_{\max} / H_S > 1.25 , \quad (5)$$

где C_{\max} – максимальная высота гребня волн. Высота гребня определяется как самая высокая точка на профиле волны за период между двумя последовательными пересечениями среднего уровня воды снизу вверх и сверху вниз [6].

Зависимости индекса CI от параметров, характеризующих нелинейность волн, представлены на рис. 5. Для расчетов использовался тот же массив данных, который использовался для расчетов AI . Коэффициенты корреляции между CI и параметрами ε , λ_3 , λ_4 соответственно равны 0.09, 0.13 и 0.49.



Р и с . 5 . Зависимости индекса CI от параметров ε , λ_3 , λ_4 . Линия на нижнем фрагменте соответствует регрессии (6)

Fig . 5 . Dependencies of the index CI on the parameters ε , λ_3 and λ_4 . The line on the lower fragment corresponds to regression (6)

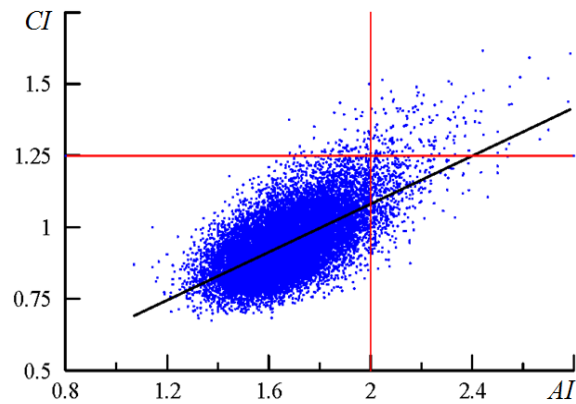


Рис. 6. Взаимосвязь индексов AI и CI . Красными линиями показаны критические значения индексов, при превышении которых волна считается аномальной, черная линия – регрессия (7)

Fig. 6. Interrelation of indices AI and CI . The red lines show the critical values of the indices, above which the wave is considered abnormal, the black line is the regression (7)

Зависимость CI от λ_4 можно аппроксимировать линейной регрессией

$$CI = 0.353 \lambda_4 + 0.939, \quad (6)$$

со среднеквадратическим отклонением, равным 0.10.

Рассмотрим взаимосвязь индексов AI и CI (рис. 6). Коэффициент корреляции между этими индексами равен 0.64. Взаимосвязь индексов AI и CI описывается линейной регрессией

$$CI = 0.42 AI + 0.241 \quad (7)$$

со среднеквадратическим отклонением, равным 0.085.

Сравним вероятность появления аномальных волн, определенную по критериям (1) и (5). Количество точек, лежащих выше горизонтальной красной линии на рис. 6, заметно меньше, чем лежащих справа от вертикальной красной линии. Это означает, что вероятность появления аномальной волны по критерию (5) (обозначим ее как P_C) меньше, чем по критерию (1). Для анализируемого здесь массива данных $P_C = 1.3\%$ и $P_A = 3.3\%$.

Объяснить указанное расхождение в оценках вероятности появления аномальных волн можно следующим образом. По аналогии с определением высоты гребня определим глубину впадины как расстояние от среднего уровня воды до самой низкой точки на профиле волны за период между двумя последовательными пересечениями среднего уровня сверху вниз и снизу вверх. Выделяют три основных формы аномальных волн: положительную, отрицательную и знакопеременную [11, 22]. Положительной является форма, при которой высота гребня в полтора раза больше глубины впадины, соответственно отрицательной является форма, при которой глубина впадины в полтора раза

больше высоты гребня. Форма с промежуточным соотношением высоты гребня и глубины впадины названа знакопеременной. По данным измерений в прибрежной зоне Балтийского моря (глубина 2.7 м), 63 % аномальных волн имели положительную форму, 19.5 % – знакопеременную и 17.5 % – отрицательную [22].

Следует отметить, что в рамках стандартных процедур расчета индексов AI и CI определяются характеристики наибольшей из аномальных волн. Данная процедура не учитывает, что в течение сеанса измерений могут существовать несколько аномальных волн.

Заключение

На основе натуральных волновых измерений проведен анализ появления аномальных волн в прибрежной зоне Черного моря. Для выделения аномальных волн использовались два индекса. Первый индекс равен отношению максимальной и значительной высот волн AI , второй индекс отношению максимальной высоты гребня к значительной высоте волн CI .

Показано, что индексы AI и CI не зависят от крутизны волн и от коэффициента асимметрии возвышений морской поверхности. Статистическая связь выявлена только для коэффициента эксцесса, что позволяет использовать его в качестве предиктора в задачах прогноза появления аномальных волн.

Также показано, что при расчетах с помощью индекса AI вероятность появления аномальных волн выше, чем при расчетах по индексу CI . Это объясняется существованием трех форм аномальных волн с разным соотношением высоты гребня и глубины впадины. Индекс CI позволяет эффективно выявлять только аномальные волны, у которых высота гребня больше глубины впадины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аномально высокая волна в Черном море: наблюдения и моделирование / Б. В. Дивинский [и др.] // Доклады Академии наук. 2004. Т. 395, № 5. С. 690–695.
2. Discussions on the occurrence probabilities of observed freak waves / A. Tao [et al.] // Journal of Marine Science and Technology. 2015. Vol. 23, iss. 6. P. 923–928. doi:10.6119/JMST-015-0610-10
3. Janssen P. A. E. M. Nonlinear four-wave interactions and freak waves // Journal of Physical Oceanography. 2003. Vol. 33, iss. 4. P. 863–884. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)33<863:NFIAPW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)33<863:NFIAPW>2.0.CO;2)
4. Рубан В. П. Аномальные волны при низких индексах Бенджамина – Фейра: численное исследование роли нелинейности // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2013. Т. 97, № 11–12. С. 788–792.
5. Пелиновский Е. Н., Шургалова Е. Г. Формирование волн-убийц в солитонном газе, описываемом модифицированным уравнением Кортевега – де Вриза // Доклады Академии наук. 2016. Т. 470, № 1. С. 26–29. <https://doi.org/10.7868/S0869565216250101>
6. Forristall G. Z. Understanding rogue waves: Are new physics really necessary? // Proceedings of the 14th ‘Aha Huliko’a Winter Workshop 2005 on Rogue Waves January 25–28, Honolulu, USA. 2005. P. 29–35. URL: <http://www.soest.hawaii.edu/PubServices/2005pdfs/Forristall.pdf> (date of access: 8.08.2022).

7. *Hjelmervik K., Trulsen K.* Freak wave statistics on collinear currents // *Journal of Fluid Mechanics*. 2009. Vol. 637. P. 267–284. doi:10.1017/S0022112009990607
8. A global view on the wind sea and swell climate and variability from ERA-40 / A. Semedo [et al.] // *Journal of Climate*. 2011. Vol. 24, iss. 5. P. 1461–1479. doi:10.1175/2010JCLI3718.1
9. *Luxmoore J. F., Ilic S., Mori N.* On kurtosis and extreme waves in crossing directional seas: a laboratory experiment // *Journal of Fluid Mechanics*. 2019. Vol. 876. P. 792–817. doi:10.1017/jfm.2019.575
10. *Guedes Soares C., Cherneva Z., Antão E. M.* Characteristics of abnormal waves in North Sea storm sea states // *Applied Ocean Research*. 2003. Vol. 25, iss. 6. P. 337–344. doi:10.1016/j.apor.2004.02.005
11. Freak waves off Ratnagiri, west coast of India / J. Glejin [et al.] // *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*. 2014. Vol. 43, iss. 7. P. 1339–1342. URL: <http://nopr.niscares.in/handle/123456789/34450> (date of access: 8.08.2022).
12. Can rogue waves be predicted using characteristic wave parameters? / A. D. Cattrell [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2018. Vol. 123, iss. 8. P. 5624–5636. doi:10.1029/2018JC013958
13. *Guedes Soares C., Cherneva Z., Antão E. M.* Steepness and asymmetry of the largest waves in storm sea states // *Ocean Engineering*. 2004. Vol. 31, iss. 8–9. P. 1147–1167. doi:10.1016/J.OCEANENG.2003.10.014
14. *Толокнов Ю. Н., Коровушкин А. И.* Система сбора гидрометеорологической информации // *Системы контроля окружающей среды*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. Вып. 13. С. 50–53.
15. *Ефимов В. В., Комаровская О. И.* Возмущения, вносимые Крымскими горами в поля скорости ветра // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 2. С. 134–146. doi:10.22449/0233-7584-2019-2-134-146
16. *Соловьев Ю. П., Иванов В. А.* Предварительные результаты измерений атмосферной турбулентности над морем // *Морской гидрофизический журнал*. 2007. № 3. С. 42–61.
17. *Запелалов А. С., Гармашов А. В.* Появление отрицательных значений коэффициента асимметрии морских поверхностных волн // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2022. Т. 58, № 3. С. 310–317. doi:10.31857/S0002351522030130
18. Real world ocean rogue waves explained without the modulational instability / F. Fedele [et al.] // *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. 27715. doi:10.1038/srep27715
19. *Запелалов А. С., Гармашов А. В.* Асимметрия и эксцесс поверхностных волн в прибрежной зоне Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 4. С. 447–459. doi:10.22449/0233-7584-2021-4-447-459
20. *Mori N., Janssen P. A. E. M.* On kurtosis and occurrence probability of freak waves // *Journal of Physical Oceanography*. 2006. Vol. 36, iss. 7. P. 1471–1483. doi:10.1175/JPO2922.1
21. Risk assessment of encountering killer waves in the Black Sea / V. A. Ivanov [et al.] // *Geography, Environment, Sustainability*. 2012. Vol. 5, iss. 1. P. 84–111. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2012-5-1-84-111>
22. *Didenkulova I., Anderson C.* Freak waves of different types in the coastal zone of the Baltic Sea // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2010. Vol. 10, iss. 9. P. 2021–2029. doi:10.5194/nhess-10-2021-2010

Поступила 13.05.2022 г.; одобрена после рецензирования 23.06.2022 г.; принята к публикации 06.07.2022 г.; опубликована 26.09.2022 г.

Об авторах:

Запевалов Александр Сергеевич, главный научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук; **Scopus Author ID: 7004433476, WoS ResearcherID: 6784-7782**, sevzepter@mail.ru

Гармашов Антон Викторович, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук; **Scopus Author ID: 54924806400, WoS ResearcherID: P-4155-2017**, ant.gar@mail.ru

About the authors:

Alexander S. Zapevalov, Chief Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), **Scopus Author ID: 7004433476, WoS ResearcherID: 6784-7782**, sevzepter@mail.ru

Anton V. Garmashov, Senior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **Scopus Author ID: 54924806400, WoS ResearcherID: P-4155-2017**, ant.gar@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Запевалов Александр Сергеевич – постановка проблемы, обработка, анализ и описание результатов исследования, подготовка текста статьи и графических материалов

Гармашов Антон Викторович – сбор данных натуральных измерений, их систематизация, обработка и анализ, анализ литературных источников

Contribution of the authors:

Alexander S. Zapevalov – problem statement, data processing and analysis, article text and graphic materials preparation

Anton V. Garmashov – data processing and analysis, analysis of literary sources

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All the authors have read and approved the final manuscript.