

## Статистические распределения высоты гребней и глубины впадин морских поверхностных волн

А. С. Запевалов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия  
e-mail: sevzepter@mail.ru

### Аннотация

В настоящей работе исследуются статистические распределения глубины впадин  $Th$  и высоты гребней  $Cr$  морских поверхностных волн в прибрежной зоне Черного моря. Для анализа используются данные прямых волновых измерений, полученные на стационарной океанографической платформе Морского гидрофизического института РАН. Во всех ситуациях мода распределений  $Th$  и  $Cr$  смещена в область более высоких значений относительно моды распределения Рэлея. Как правило, анализ распределений глубин впадин и высот гребней проводится в рамках нелинейной модели второго порядка, построенной на основе волны Стокса. Показано, что в рамках указанной модели можно описать только средние по ансамблю ситуаций распределения, в то время как для практических задач необходимо знать отклонения от этих значений. Вид распределений  $Th$  и  $Cr$  существенно зависит от асимметрии распределения возвышений морской поверхности  $A_\eta$ . При  $A_\eta < 0$  функции плотности вероятностей  $Th$  и  $Cr$  почти совпадают. Нелинейная модель второго порядка, в рамках которой всегда выполняется условие  $A_\eta > 0$ , не описывает эту ситуацию. Полученные при  $A_\eta > 0$  функции плотности вероятностей  $Th$  и  $Cr$  качественно соответствуют данной модели. Изменения эксцесса распределения возвышений морской поверхности в меньшей мере влияют на функции плотности вероятностей  $Th$  и  $Cr$ .

**Ключевые слова:** морская поверхность, волны, впадина, гребень, статистические распределения, Черное море

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме FNNN-2024-0001 «Фундаментальные исследования процессов, определяющих потоки вещества и энергии в морской среде и на ее границах, состояние и эволюцию физической и биогеохимической структуры морских систем в современных условиях» (шифр «Океанологические процессы»). Автор благодарит А. В. Гармашова, предоставившего данные волновых измерений на стационарной океанографической платформе.

**Для цитирования:** Запевалов А. С. Статистические распределения высоты гребней и глубины впадин морских поверхностных волн // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 3. С. 49–58. EDN CYOWEE.

© Запевалов А. С., 2024



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

# Statistical Distributions of Crests and Trough of Sea Surface Waves

A. S. Zapevalov

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol, Russia  
e-mail: sevzepter@mail.ru

## Abstract

In many practical applications, a statistical description of waves is needed to calculate and predict their impact on ships, coastal structures and beaches. This paper investigates the statistics of the trough  $Th$  and the crest  $Cr$  of sea surface waves in the coastal zone of the Black Sea. The analysis uses data from direct wave measurements obtained on a stationary oceanographic platform of the Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences. In all situations, the mode of the  $Th$  and  $Cr$  distributions is shifted to the region of higher values relative to the Rayleigh distribution mode. As a rule, the analysis of the distributions of trough and crest is carried out within a second-order nonlinear model based on the Stokes wave. It is shown that within the framework of this model it is possible to describe only the average distribution over an ensemble of situations, while for practical tasks it is necessary to know the deviations from these values. The type of  $Th$  and  $Cr$  distributions significantly depends on the skewness of the distribution of sea surface elevations  $A_\eta$ . With  $A_\eta < 0$ , the probability density function  $Th$  and  $Cr$  are almost identical. The second-order nonlinear model, in which the condition  $A_\eta > 0$  is always fulfilled, does not describe this situation. The probability density functions  $Th$  and  $Cr$  obtained with  $A_\eta > 0$  correspond qualitatively to this model. Changes in the excess kurtosis of the distribution of sea surface elevations have a lesser effect on the probability density functions  $Th$  and  $Cr$ .

**Keywords:** sea surface, waves, trough, crest, statistical distributions, Black Sea

**Acknowledgements:** the work was completed under state assignment on topic FNNN-2021-0004 “Fundamental studies of the processes that determine fluxes of matter and energy in the marine environment and at its boundaries, the state and evolution of the physical and biogeochemical structure of marine systems in modern conditions” (“Oceanological processes” code). The author thanks A.V. Garmashov, who provided wave measurement data on a stationary oceanographic platform.

**For citation:** Zapevalov, A.S., 2024. Statistical Distributions of Crests and Trough of Sea Surface Waves. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 49–58.

## Введение

Исследования статистических распределений морских волн, выделение anomalно высоких волн (*rogue waves*) являются одной из актуальных задач современной океанологии [1]. В линейном волновом поле, представляющем собой суперпозицию синусоидальных волн со случайной фазой, при условии, что волновой спектр является достаточно узким, распределение высот волн описывается распределением Рэля [2]. Этим же распределением описываются распределения высоты гребней и глубины впадин [3]. Распределение Рэля обычно рассматривается как нижний предел, дающий наименьшие вероятности для экстремальных волн [4], также линейная модель сильно занижает вероятность появления высоких гребней [5].

Под высотой гребня  $Cr$  подразумевается максимальное значение волнограммы  $\eta(t)$  между моментом, когда она пересекает нулевой уровень снизу вверх, и моментом, когда она пересекает этот уровень сверху вниз [6]. Аналогично, глубиной впадины  $Th$  является минимальное значение  $\eta(t)$  между двумя последовательными пересечениями нулевого уровня сверху вниз и снизу вверх. Высота волны определяется как сумма последовательных максимума и минимума между двумя точками пересечения волнограммой  $\eta(t)$  нулевого уровня вверх или вниз, т. е.  $H = Cr + Th$  [7].

Отклонения статистических распределений морских волн от линейной модели обычно описываются в рамках нелинейной модели второго порядка, которая строится на основе разложения волнового профиля по степеням малого параметра (крутизны) [8]. В указанной модели асимметрия распределения возвышений морской поверхности всегда выше нуля [9], гребни выше, а впадины мельче, чем предсказывает линейная теория [10]. Оба эти условия не всегда выполняются в морских условиях. Измерения, проведенные на разных акваториях Мирового океана, показали, что нижняя граница диапазона, в котором меняется асимметрия, лежит в области отрицательных значений [11, 12]. Нелинейная модель второго порядка описывает только средние тенденции изменения асимметрии и эксцесса, не позволяя описать всего многообразия возникающих в море ситуаций [13].

Соотношения высоты гребня и глубины впадины меняются в широких пределах. Наблюдаются ситуации, когда максимальная за сеанс измерений глубина впадины больше максимальной высоты гребня [14, 15]. По данным измерений в Черном море вероятность события, при котором глубина впадины наиболее высокой за сеанс измерений волны больше высоты ее гребня, достигает 10 % [16].

Аналізу распределения впадин морских волн уделялось меньше внимания, чем статистическому описанию их гребней, хотя распределение впадин имеет большое значение для ряда инженерных приложений [9]. Целью настоящей работы является совместный анализ распределений высоты гребней и глубины впадин поверхностных волн.

#### **Аппаратура и условия измерений**

Для исследования статистических характеристик поверхностных волн использовали данные волновых измерений, полученные на стационарной океанографической платформе Морского гидрофизического института РАН. Стационарная океанографическая платформа установлена в прибрежной части Черного моря у Южного берега Крыма на глубине около 30 м. Для измерения поверхностных волн использовали два типа волнографов. В волнографах первого типа датчиком является вертикально натянутая нихромовая струна [17], в волнографах второго типа нихромовая струна навита с постоянным шагом на вертикально ориентированный несущий кабель-трос [18].

В настоящей работе анализируются данные измерений, полученные в летний и осенний периоды 2006 г., а также в зимний период 2018 г. В 2006 г. измерения проводили сеансами, продолжительностью несколько часов, в 2018 г. волновые измерения вели непрерывно в течение месяца. Непрерывные записи возвышений морской поверхности разбивали на фрагменты продолжительностью 20 мин. Для анализа использовали 2380 двадцатиминутных фрагментов.

Для каждого фрагмента определяли высоту гребня  $Cr$  и глубину впадины  $Th$  отдельных волн, а также рассчитывали значительную высоту волн  $H_S$ , асимметрию  $A$  и эксцесс  $E$  возвышений поверхности. При анализе рассматривали только волны, удовлетворяющие условиям  $Cr > 5$  см и  $Th > 5$  см. Здесь и далее параметр  $Th$  равен модулю глубины впадины.

Волновые измерения, проведенные в разные сезоны, позволили охватить широкий диапазон метеопараметров. Средняя за сеанс измерений скорость ветра менялась от условного нуля (порог трогания вертушки) до 26 м/с. В порывах скорость ветра достигала 35 м/с. Периоды волн, рассчитанные по максимуму волнового спектра, лежали в диапазоне от 1.1 с до 9 с. Значительная высота волн менялась в пределах от 0.1 м до 2.3 м. Значения крутизны волн (параметр нелинейности) в основном лежали в пределах от 0.009 до 0.09.

### Распределения глубины впадин и высоты гребней

Для статистических моментов  $\eta(t)$  введем обозначение

$$\mu_n = \langle \eta^n(t) \rangle,$$

где символ  $\langle \dots \rangle$  означает осреднение. Будем полагать, что среднее значение случайной величины  $\mu_1 = 0$ , тогда асимметрия и эксцесс распределения возвышений поверхности соответственно равны  $A_\eta = \mu_3/\mu_2^{3/2}$  и  $E_\eta = \mu_4/\mu_2^2 - 3$ .

Чтобы сравнивать статистические распределения глубины впадины и высоты гребней, определенных в разных ситуациях, будем использовать нормированные волнограммы

$$\tilde{\eta}(t) = \eta(t)/H_S, \quad (1)$$

где  $H_S$  – значительная высота волн, которая связана с вторым статистическим моментом возвышений морской поверхности соотношением  $H_S = 4\sqrt{\mu_2}$ .

Функция плотности вероятностей распределения Рэлея, описывающая в рамках линейной модели распределения  $Cr$  и  $Th$ , имеет вид

$$F_R(x) = \frac{x}{a^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2a^2}\right), \quad x \geq 0, \quad (2)$$

где  $a = H_S/4$ . Учитывая (1), получаем, что в нашем случае мода распределения (2) определена как  $Mo_R = 0.25$ .

Эмпирические функции плотности вероятностей  $Cr$  и  $Th$  рассчитывали на основе гистограмм, построенных с равными интервалами. Интервалы были выбраны равными 0.05. Рассчитанные по всему массиву данных измерений эмпирические функции плотности вероятностей высоты гребней  $F_{Cr}(x)$  и глубины впадин  $F_{Th}(x)$  представлены на рис. 1. Видно, что моды эмпирических распределений  $Mo_{Cr}$  и  $Mo_{Th}$  смещены относительно моды распределения Рэлея в сторону более высоких значений  $x$ , т. е. выполняются условия

$$Mo_{Cr} > Mo_R, \quad Mo_{Th} > Mo_R.$$

Моды распределений  $Cr$  и  $Th$  находятся в соседних интервалах, середины которых  $Mo_{Cr} = 0.375$  и  $Mo_{Th} = 0.325$ .

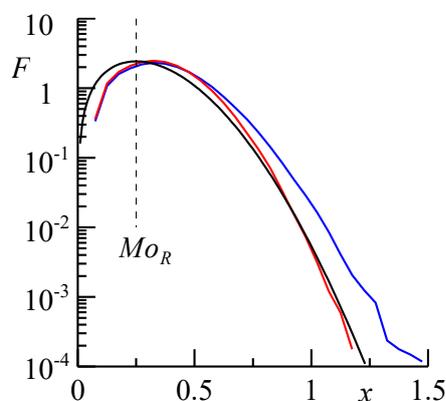
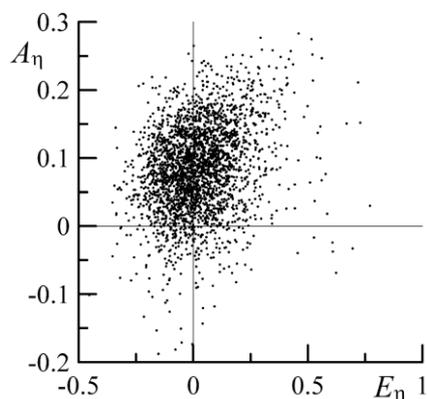


Рис. 1. Функции плотности вероятностей  $F$  (средняя по ансамблю ситуаций):  $F_{Cr}(x)$  (синяя кривая);  $F_{Th}(x)$  (красная кривая);  $F_R(x)$  (черная кривая)

Fig. 1. Probability density functions  $F$  (average over an ensemble of situations). The blue curve is  $F_{Cr}(x)$ , the red curve is  $F_{Th}(x)$ , the black curve is  $F_R(x)$

Учет нелинейности приводит к тому, что вероятность появления высоких гребней становится выше, чем в линейной модели, в которой эта вероятность описывается распределением Рэлея, а вероятность глубоких впадин ниже [9]. Из рис. 1 следует, что в области  $x > Mo_{Cr}$  справедливо неравенство  $F_{Cr}(x) > F_R(x)$ . Соотношение между  $F_{Th}(x)$  и  $F_R(x)$  меняется при  $x_0 \approx 0.8$ , в области  $x_0 > x > Mo_{Cr}$  имеет место неравенство  $F_{Th}(x) > F_R(x)$ , при  $x > x_0$  обратное соотношение  $F_{Th}(x) < F_R(x)$ . Таким образом, в области высоких гребней и глубоких впадин отклонения  $F_{Cr}(x)$  и  $F_{Th}(x)$  от  $F_R(x)$  происходят в сторону, предсказанную нелинейной моделью второго порядка [19], т. е. поведение средних по ансамблю ситуаций распределений высоты гребней и глубины впадин качественно соответствует этой модели.

Ранее проведенные исследования старших статистических моментов возвышений морской поверхности показали, что нелинейная модель второго порядка позволяет описать только средние тенденции изменения асимметрии и эксцесса, но не позволяет описать всего многообразия ситуаций, возникающих в морских условиях [13]. Значения асимметрии и эксцесса меняются в значительно более широких пределах, чем это следует из модели. В частности, модельные оценки асимметрии распределения возвышений поверхности  $A_\eta$  и эксцесса  $E_\eta$  всегда положительные [20], в то время как в морских условиях нередко наблюдаются ситуации, в которых  $A_\eta < 0$  и/или  $E_\eta < 0$  [12]. При каких значениях  $A_\eta$  и  $E_\eta$  получены анализируемые в настоящей работе волнограммы, показано на рис. 2.



Р и с . 2 . Изменения асимметрии  $A_\eta$  и эксцесса  $E_\eta$  возвышений морской поверхности

Fig. 2. Changes in the skewness  $A_\eta$  and excess kurtosis  $E_\eta$  of sea surface elevations

### Эффект асимметрии $A_\eta$ и эксцесса $E_\eta$

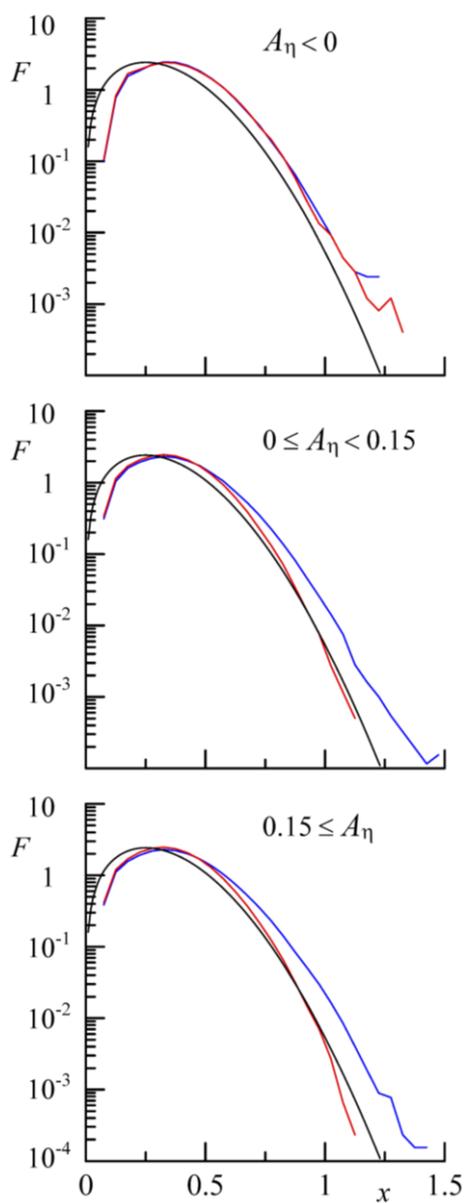
Обычно распределения высоты гребней и глубины впадин анализируются в рамках нелинейной модели второго порядка, построенной на основе разложения волнового профиля в ряд по степеням малого параметра [19–22]. В работе [8] для описания статистических характеристик морской поверхности предложена упрощенная нелинейная модель второго порядка, которая представляет собой сумму линейной  $\eta_L(x, t)$  и нелинейной  $\eta_N(x, t)$  составляющих. Модель построена для волн, распространяющихся на глубокой воде, в приближении узкополосного спектра. Она описывается уравнением амплитудно-модулированной волны Стокса со средней частотой  $\omega$  и случайной фазой  $\varepsilon$

$$\eta(x, t) = \eta_L(x, t) + \eta_N(x, t) = a_r(x, t)\cos\theta + \frac{1}{2}k_p a_r^2(x, t)\cos(2\theta), \quad (3)$$

где  $a_r(x, t)$  – огибающая;  $\theta = k_p x - \omega t + \varepsilon$ ;  $k_p$  – волновое число, соответствующее пику волнового спектра. Локальные максимумы нелинейного члена  $\eta_N(x, t)$  совпадают с гребнем и впадиной линейной волны  $\eta_L(x, t)$ , следовательно, высота гребня и глубина впадины в рамках модели (3) равны [9]

$$Cr_N = a_r + \frac{1}{2}k_p a_r^2, \quad Th_N = a_r - \frac{1}{2}k_p a_r^2.$$

Чтобы оценить, насколько эта модель применима к описанию статистических распределений гребней и впадин, необходимо проанализировать, как меняются функции  $F_{Cr}(x)$  и  $F_{Th}(x)$  в разных ситуациях, в частности при отрицательных значениях асимметрии или эксцесса. Результаты этого анализа представлены на рис. 3.

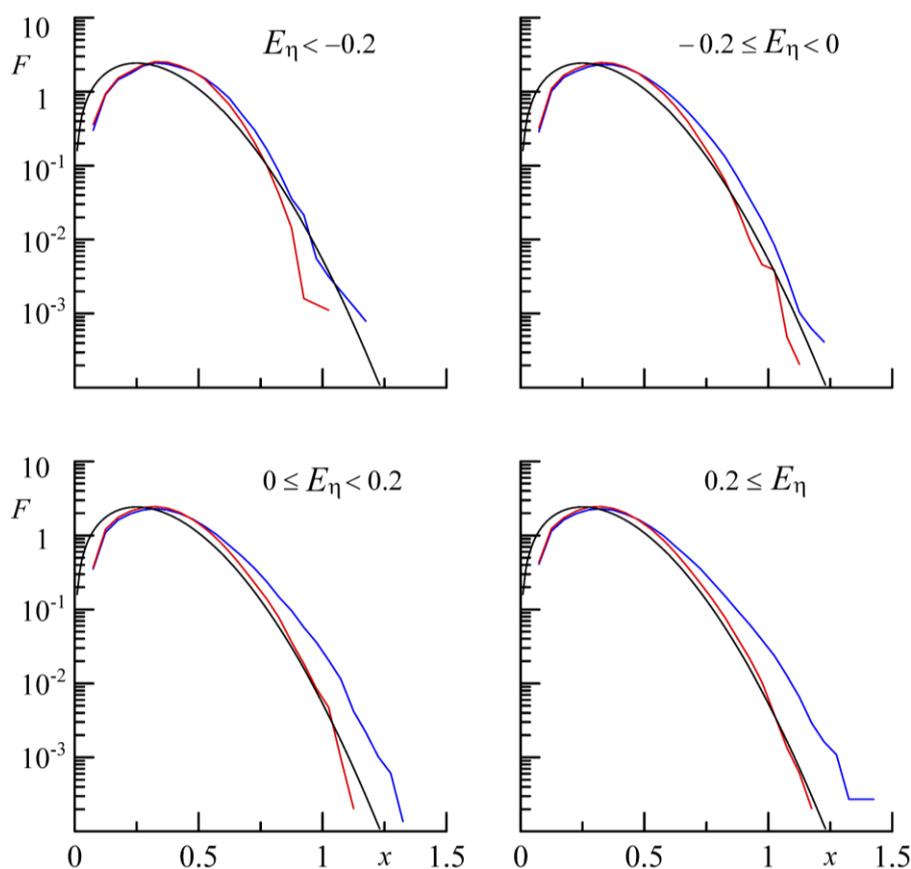


Р и с . 3 . Функции плотности вероятностей  $F$ , рассчитанные для трех диапазонов асимметрии  $A_\eta$ :  $F_{Cr}(x)$  (синяя кривая);  $F_{Th}(x)$  (красная кривая);  $F_R(x)$  (черная кривая)

Fig. 3. Probability density functions  $F$  calculated for three ranges of skewness  $A_\eta$ . The blue curve is  $F_{Cr}(x)$ , the red curve is  $F_{Th}(x)$ , the black curve is  $F_R(x)$

Из рис. 3 следует, что при изменении знака асимметрии  $A_\eta$  вид функции  $F_{Th}(x)$  существенно меняется. Если выполняется условие  $A_\eta < 0$ , то наблюдается равенство  $F_{Th}(x) \approx F_{Cr}(x)$ . Отметим, что равенство  $F_{Th}(x) = F_{Cr}(x)$  имеет место в рамках линейной модели, когда распределения  $Cr$  и  $Th$  описываются распределением Рэля. В данном случае отличие от линейной модели при  $A_\eta < 0$  заключается в том, что в области  $x > 0.45$  выполняются неравенства  $F_{Cr}(x) > F_R(x)$  и  $F_{Th}(x) > F_R(x)$ .

Изменение эксцесса, как следует из рис. 4, оказывает более слабое влияние на форму функций  $F_{Cr}(x)$  и  $F_{Th}(x)$ .



Р и с . 4 . Функции плотности вероятностей  $F$ , рассчитанные для четырех диапазонов эксцесса  $E_\eta$ :  $F_{Cr}(x)$  (синяя кривая);  $F_{Th}(x)$  (красная кривая);  $F_R(x)$  (черная кривая)

Fig. 4. Probability density functions  $F$  calculated for four ranges of excess kurtosis  $E_\eta$ . The blue curve is  $F_{Cr}(x)$ , the red curve is  $F_{Th}(x)$ , the black curve is  $F_R(x)$

### Заклучение

На основе прямых волновых измерений, проведенных в морских условиях, проанализированы распределения глубины впадин  $Th$  и высоты гребней  $Cr$  морских поверхностных волн. В среднем по ансамблю ситуаций рассчитанные по данным измерений большие значения высот гребней имеют вероятность выше, чем это следует из распределения Рэлея, а вероятность глубоких впадин ниже. Качественно такие распределения высот гребней и глубин впадин соответствуют нелинейной модели второго порядка.

В тоже время нелинейная модель второго порядка не описывает  $F_{Th}(x)$  и  $F_{Cr}(x)$  в ситуации, когда асимметрия распределения возвышений морской поверхности  $A_\eta$  является отрицательной. Показано, что при  $A_\eta < 0$  функции  $F_{Th}(x)$  и  $F_{Cr}(x)$  примерно равны.

Изменения эксцесса распределения возвышений морской поверхности в меньшей мере влияют на функции плотности вероятностей  $Th$  и  $Cr$ , чем изменения асимметрии распределения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зависимость вероятностных распределений высот волн от физических параметров по результатам измерений у острова Сахалин / А. В. Слюняев [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2023. Т. 16, № 3. С. 18–29. EDN DNFYXE. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2023.16\(3\)-2](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2023.16(3)-2)
2. *Longuet-Higgins M. S.* On the statistical distributions of the heights of sea waves // *Journal of Marine Research*. 1952. Vol. 11. P. 245–265.
3. *Naess A.* On the distribution of crest to trough wave heights // *Ocean Engineering*. 1985. Vol. 12, iss. 3. P. 221–234. [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(85\)90014-9](https://doi.org/10.1016/0029-8018(85)90014-9)
4. *Gemmrich J., Thomson J.* Observations of the shape and group dynamics of rogue waves // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44, iss. 4. P. 1823–1830. <https://doi.org/10.1002/2016GL072398>
5. *Dysthe K., Krogstad H. E., Muller P.* Oceanic Rogue Waves // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2008. Vol. 40. P. 287–310. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102203>
6. *Forristall G. Z.* Wave crest distributions: Observations and second-order theory // *Journal of Physical Oceanography*. 2000. Vol. 30, iss. 8. P. 1931–1943. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2000\)030<1931:WCDOAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2000)030<1931:WCDOAS>2.0.CO;2)
7. *Nieto-Reyes A.* On the non-Gaussianity of sea surface elevations // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10, iss. 9. P. 1303. <https://doi.org/10.3390/jmse10091303>
8. *Tayfun M. A.* Narrow-band nonlinear sea waves // *Journal of Geophysical Research*. 1980. Vol. 85, iss. C3. P. 1548–1552. <https://doi.org/10.1029/JC085iC03p01548>
9. Wave crest and trough distributions in a broad-banded directional wave field / A. Toffoli [et al.] // *Ocean Engineering*. 2008. Vol. 35, iss. 17. P. 1784–1792. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.08.010>
10. *Longuet-Higgins M. S.* The effect of nonlinearities on statistical distributions in the theory of sea waves // *Journal of Fluid Mechanics*. 1963. Vol. 17, iss. 4. P. 459–480. <https://doi.org/10.1017/S0022112063001452>
11. *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. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2003.10.014>

12. *Запевалов А. С., Гармашов А. В.* Появление отрицательных значений коэффициента асимметрии морских поверхностных волн // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 3. С. 310–317. EDN JHQQDE. <https://doi.org/10.31857/S0002351522030130>
13. *Запевалов 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. EDN SKHDZD. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-4-447-459>
14. 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.
15. *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. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-2021-2010>
16. *Запевалов А. С., Гармашов А. В.* Соотношение глубины впадины и высоты гребня поверхностных волн в прибрежной зоне Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 1. С. 78–86. EDN ZNPAZD.
17. *Запевалов А. С., Большаков А. Н., Смолов В. Е.* Исследование уклонов морской поверхности с помощью массива волнографических датчиков // Океанология. 2009. Т. 49, № 1. С. 37–44. EDN JVSICB.
18. *Толокнов Ю. Н., Коровушкин А. И.* Система сбора гидрометеорологической информации // Системы контроля окружающей среды. 2010. Вып. 13. С. 50–53.
19. Second-order theory and setup in surface gravity waves: A comparison with experimental data / A. Toffoli [et al.] // Journal of Physical Oceanography. 2007. Vol. 37, iss. 11. P. 2726–2739. <https://doi.org/10.1175/2007JPO3634.1>
20. *Tayfun M. A., Alkhalidi M. A.* Distribution of surface elevations in nonlinear seas // Proceedings of Offshore Technology Conference. Kuala Lumpur, Malaysia, 22–25 March 2016. 2016. P. 1274–1287. <https://doi.org/10.4043/26436-MS>
21. *Forristall G. Z.* Wave crest distributions: Observations and second-order theory // Journal of Physical Oceanography. 2000. Vol. 30, iss. 8. P. 1931–1943. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2000\)030<1931:WCDOAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2000)030<1931:WCDOAS>2.0.CO;2)
22. *Prevosto M., Forristall G. Z.* Statistics of wave crests from models vs. measurements // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2004. Vol. 126, iss. 1. P. 43–50. <https://doi.org/10.1115/1.1641795>

Поступила 15.02.2024 г.; одобрена после рецензирования 26.03.2024 г.; принята к публикации 17.06.2024 г.; опубликована 25.09.2024 г.

*Об авторе:*

**Запевалов Александр Сергеевич**, главный научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **SPIN-код: 6784-7782, ResearcherID: V-7880-2017, Scopus Author ID: 7004433476, ORCID ID: 0000-0001-9942-2796, sevzepter@mail.ru**

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*