

УДК 551.466.3

ПОЯВЛЕНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА АСИММЕТРИИ МОРСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

© 2022 г. А. С. Запевалов^а, А. В. Гармашов^{а, *}

^аМорской гидрофизический институт РАН, ул. Капитанская, 2, Севастополь, 299011 Россия

*e-mail: ant.gar@mail.ru

Поступила в редакцию 24.11.2021 г.

После доработки 17.12.2021 г.

Принята к публикации 09.02.2022 г.

На основе данных прямых волновых измерений, проведенных в прибрежной зоне Черного моря, исследуется вероятность появления отрицательных значений коэффициента асимметрии возвышений морской поверхности. Показано, что средняя по ансамблю ситуаций вероятность того, что коэффициент асимметрии меньше нуля, составляет около 15%. Проанализировано влияние на вероятность этого события крутизны волн и обратного возраста волн. Установлено, что наиболее часто отрицательные значения коэффициента асимметрии наблюдаются на пологих волнах на стадии затухания.

Ключевые слова: морская поверхность, волновые возвышения поверхности, коэффициент асимметрии, крутизна волн, возраст волн

DOI: 10.31857/S0002351522030130

ВВЕДЕНИЕ

Морское волнение является слабо нелинейным процессом. Выделяют два типа нелинейности: нелинейность, вызванную присутствием связанных волновых составляющих, и вызванную резонансными и квазирезонансными межволновыми взаимодействиями [1]. Нелинейность морских волн приводит к отклонению распределения возвышения морской поверхности от распределения Гаусса, мерой которого являются старшие статистические моменты [2–4]. В настоящее время актуальность исследования изменчивости статистических моментов, наряду с решением традиционных задач воздействия волн на суда и прибрежные сооружения [5, 6], связана с решением задач дистанционного зондирования океана [7, 8]. Изменения распределения возвышений поверхности являются одним из основных источников погрешности определения ее уровня по данным альтиметрических измерений космоса [9–11].

Необходимость решения ряда практических задач стимулировала построение моделей морской поверхности, связывающих параметры их распределения с возрастом волн, их крутизной или пространственным спектром (см. [12–15] и библиографию к ним). Одним из результатов моделирования был вывод о том, что на глубокой воде коэффициент асимметрии возвышений морской поверхности всегда положителен [16].

Вывод о том, что коэффициент асимметрии всегда положителен, противоречит результатам

волновых измерений, проведенных в морских условиях. Согласно данным волновых измерений, проведенных со стационарных платформ в Северном море и двумя типами струнных волнографов на Черном море, нижняя граница диапазона, в котором меняется коэффициент асимметрии, лежит в области отрицательных значений [17–19]. В работе [20] проанализированы данные, полученные в нескольких регионах Мирового океана в штормовых условиях, когда значительная высота волн превышала 4 м. Волновые измерения проводились с помощью направленного вниз радара с двух платформ, установленных в Северном море, волнографом, размещенным на платформе в Мексиканском заливе, и с помощью волнового буя у побережья Португалии. Во всех случаях имели место отрицательные значения коэффициента асимметрии.

Отрицательные значения коэффициента асимметрии возвышений водной поверхности были также получены при моделировании волн в лабораторных условиях, они были зафиксированы на поздних стадиях развития волнового поля [21]. Физические механизмы, приводящие к этому эффекту, не обсуждались. В экспериментах [22], как следует из рис. 14 в указанной работе, отрицательные значения появляются при относительно небольших скоростях ветра и малом разгоне.

Целью настоящей работы является анализ вероятности появления отрицательных значений коэффициента асимметрии возвышений мор-

ской поверхности. Анализ проводится на основе данных прямых волнографических измерений в морских условиях.

АППАРАТУРА И УСЛОВИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Исследования поля морских поверхностных волн проводились на стационарной океанографической платформе, 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. Платформа представляет собой свайную прямоугольную конструкцию, на верхней палубе которой находятся лабораторные помещения. Верхняя палуба расположена на высоте 12 м.

Для волнографических измерений использовался резистивный волнограф, датчиком которого является нихромовая струна, навитая с постоянным шагом на несущий кабель-тросс. Для минимизации возмущений волнового поля, создаваемых опорами платформы, волнограф располагался на выстреле длиной 6 м. Описание измерительной аппаратуры приведено в работе [23]. Измерения скорости и направления ветра осуществлялись с мачты, установленной на середине палубной надстройки, на высоте 21 м. Пересчет скорости ветра к высоте 10 м осуществлялся в рамках предположения о логарифмическом профиле.

Волновые измерения и измерения скорости ветра с несколькими перерывами проводились в период с мая 2018 г. по январь 2019 г. Непрерывные измерения были разбиты на сеансы, длительностью 20 мин, для каждого из которых вычислялись статистические характеристики волн, а также средняя скорость и направление ветра. Общий объем данных составляет более 17 000 сеансов измерений. Средняя скорость ветра в период измерений менялась в пределах от 0 до 26.3 м/с, в порывах скорость ветра достигала 35 м/с. Измерения проводились как при ветре со стороны открытого моря, так и со стороны берега, а также при штилевых условиях.

Волновые измерения в прибрежной зоне у Южного берега Крыма имеют ряд особенностей, связанных с возмущениями поля скорости ветра, вносимыми Крымскими горами [24]. Особенности формирования воздушного потока с горного берега в районе, где установлена стационарная океанографическая платформа, описаны в работах [25, 26]. Количественные оценки статистических характеристик поверхностных волн, полученные в настоящей работе, относятся к прибрежной зоне и нуждаются в уточнении для других акваторий Мирового океана.

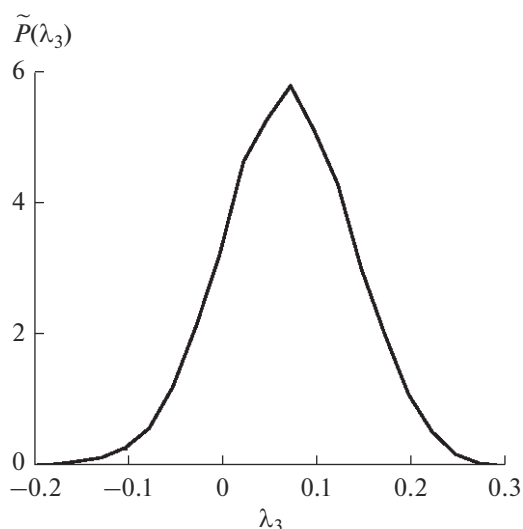


Рис. 1. Функция плотности вероятностей $\tilde{P}(\lambda_3)$ коэффициента асимметрии λ_3 .

ДААННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Рассмотрим стационарное волновое поле, в котором возвышение поверхности в фиксированной точке описывается случайной функцией с нулевым средним значением $\xi = \xi(t)$, где t — время. Статистические моменты порядка n случайной величины ξ определены как

$$m_n = \int \xi^n P(\xi) d\xi, \quad (1)$$

где $P(\xi)$ — функция плотности вероятностей. Коэффициент асимметрии описывается выражением

$$\lambda_3 = m_3 / m_2^{3/2}. \quad (2)$$

Эмпирическая функция плотности вероятностей коэффициента асимметрии $\tilde{P}(\lambda_3)$, построенная по всему массиву полученных данных, представлена на рис. 1. При ее построении отбор по метеорологическим условиям не проводился, функция $\tilde{P}(\lambda_3)$ отображает среднее распределение коэффициента λ_3 по ансамблю ситуаций, возникающих в прибрежной зоне Черного моря у Южного берега Крыма. Из анализа данных измерений следует, что появление отрицательных значений коэффициента λ_3 не является редким событием. Его вероятность, рассчитанная по всему массиву данных, равна 15.1%. Вероятности появления λ_3 меньше уровней -0.05 , -0.1 и -0.15 соответственно равны 4.2, 1.0 и 0.3%.

Следует отметить, что вывод о высокой вероятности появления отрицательных значений коэффициента асимметрии согласуется с данными измерений при значительной высоте волн выше

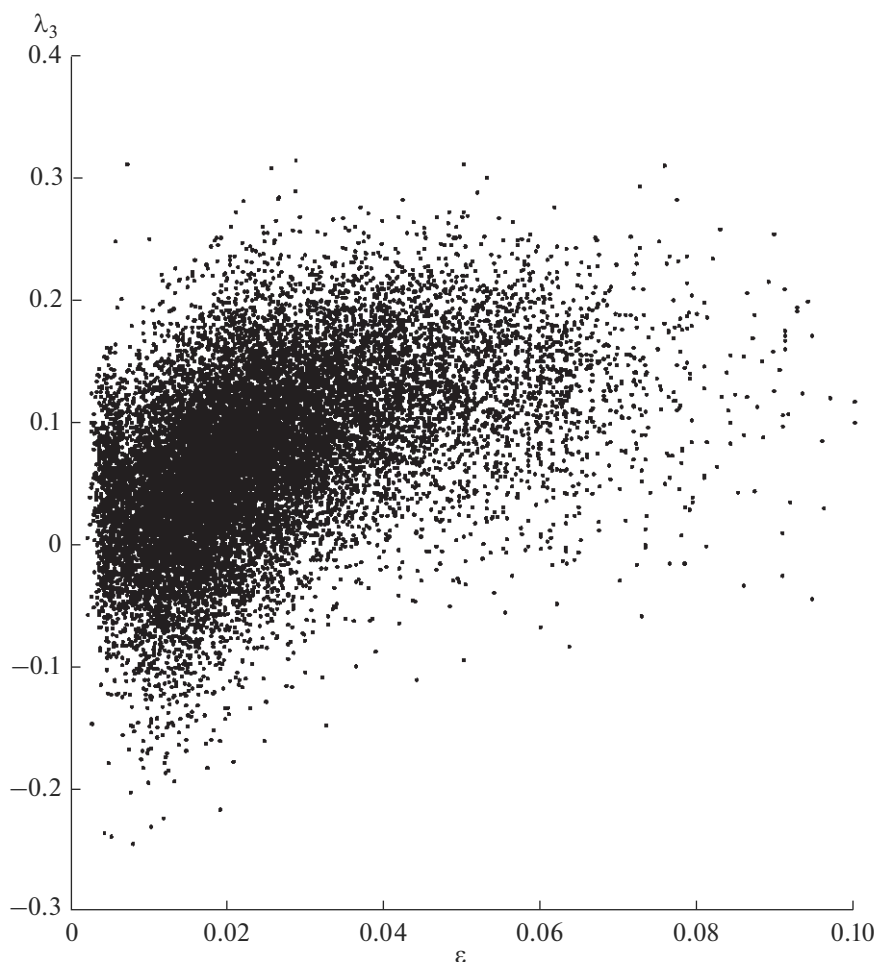


Рис. 2. Зависимость коэффициента асимметрии λ_3 от крутизны ε .

4 м [20]. Из рис. 13, приведенного в указанной работе, следует, что нижняя граница диапазона изменения λ_3 находится вблизи уровня -0.2 .

Эволюцию поля морских волн, как правило, описывают, используя несколько безразмерных параметров. Одним из этих параметров является крутизна волн

$$\varepsilon = m_2^{1/2} k_0, \quad (3)$$

где k_0 — волновое число доминантных волн. Доминантные волны относятся к типу гравитационных волн, для которых на глубокой воде справедливо дисперсионное соотношение $\omega^2 = gk$, откуда следует

$$\varepsilon = m_2^{1/2} \omega_0^2 / g, \quad (4)$$

где ω_0 — частота доминантных волн; g — гравитационное ускорение.

Вторым параметром является обратный возраст, который характеризует стадию развития вол-

нового поля. Будем использовать обратный возраст волн в форме

$$\xi = U_{10} / C_0, \quad (5)$$

где U_{10} — скорость ветра на высоте 10 м; C_0 — фазовая скорость доминантных волн [27]. Чем больше значение ξ , тем более ранней стадии развития волнового поля оно соответствует.

ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА АСИММЕТРИИ ОТ КРУТИЗНЫ

В последние десятилетия при анализе поверхностных волн широкое распространение получили методы, в которых статистическое описание случайного процесса сочетается с решением динамических уравнений [13]. Зависимость коэффициента асимметрии от крутизны в форме

$$\lambda_3 = 3\varepsilon \quad (6)$$

была получена в нелинейной модели второго порядка [12]. В рамках указанной модели возвышение поверхности описывалось в виде суммы ли-

нейной и нелинейной составляющих. Линейная составляющая задана в форме

$$\eta_L(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \psi_n, \quad (7)$$

где x – пространственная координата; a_n – амплитуда; $\psi_n = k_n x - \omega_n t + \varphi_n$; k_n и ω_n – волновое число и угловая частота; φ_n – фаза. Нелинейная составляющая имеет вид

$$\eta_N(x, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \{ a_n a_m [B_{mn}^- \cos(\psi_m - \psi_n) + B_{mn}^+ \cos(\psi_m + \psi_n)] \}, \quad (8)$$

где B_{mn}^- и B_{mn}^+ – передаточные функции второго порядка. Нелинейная модель учитывает появляющиеся в результате взаимодействия свободных волн связанные компоненты второго порядка.

Функции B_{mn}^- и B_{mn}^+ рассчитываются из уравнения Лапласа для потенциала скоростей с нелинейными граничными условиями [17].

В работе [28] показано, что простая связь, подобная (6) не существует, связь между λ_3 и ϵ является более сложной. Этот вывод подтвержден прямыми измерениями, в которых установлено, что однопараметрическая зависимость $\lambda_3 = \lambda_3(\epsilon)$ описывает только среднюю тенденцию изменения коэффициента асимметрии с ростом крутизны волн [19].

Зависимость коэффициента λ_3 от крутизны ϵ , полученная по данным измерений на стационарной океанографической платформе, представлена на рис. 2. Видно, что при одном и том же значении ϵ значения λ_3 меняются в широких пределах. В тоже время в положении нижней границы диапазона, в котором находятся значения λ_3 , наблюдается хорошо выраженная тенденция, с ростом ϵ нижняя граница этого диапазона смещается в сторону положительных значений.

Чтобы оценить возможность появления в разных ситуациях отрицательных значений λ_3 рассмотрим условную вероятность $F_{\epsilon}(\lambda_3|\epsilon)$. Разобьем диапазон изменения параметра ϵ на поддиапазоны шириной 0.01 и для каждого из них оценим вероятность появления отрицательных значений. Результаты расчетов условной вероятности $F_{\epsilon}(\lambda_3|\epsilon)$ и гистограмма параметра ϵ представлены на рис. 3. То, что кривые 2, 3 и 4 обрываются, означает, что при больших значениях ϵ событие λ_3 меньше заданного уровня не наступает. В частности, при $\epsilon > 0.8$ значения $\lambda_3 < -0.05$ не наблюдались.

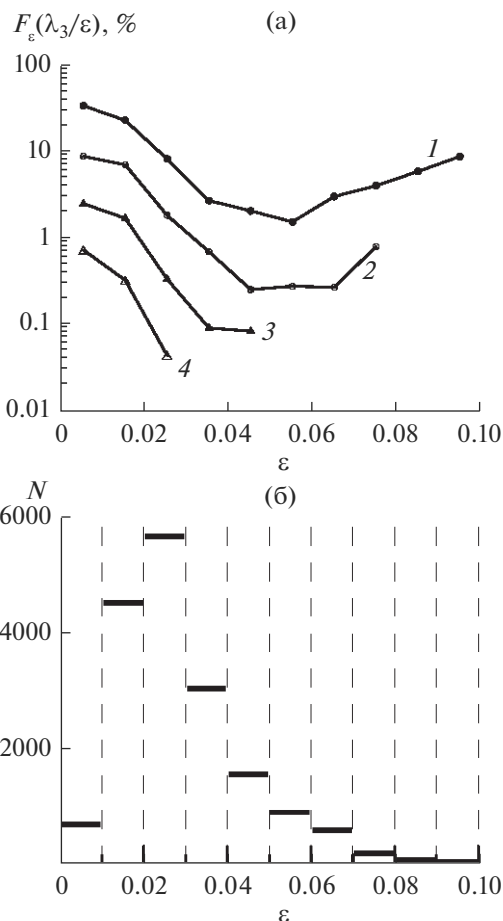


Рис. 3. Верхний фрагмент рисунка – условная вероятность появления отрицательных значений коэффициента асимметрии $F_{\epsilon}(\lambda_3|\epsilon)$: кривая 1 – $\lambda_3 < 0$; кривая 2 – $\lambda_3 < -0.05$; кривая 3 – $\lambda_3 < -0.1$; кривая 4 – $\lambda_3 < -0.15$. Нижний фрагмент рисунка – гистограмма крутизны ϵ .

В морских условиях крайне редко регистрируются ситуации, при которых $\epsilon > 0.1$. Для анализа подобных ситуаций воспользуемся данными лабораторных исследований. Экспериментальные исследования в ветро-волновом лотке, когда крутизна менялась в пределах от 0.131 до 0.191, показали, что во всех случаях $\lambda_3 > 0$ [29]. Этот результат согласуется с выводом о том, что с ростом крутизны нижняя граница диапазона изменения λ_3 смещается в сторону положительных значений.

В период проведения измерений в прибрежной зоне Черного моря наиболее часто наблюдались значения крутизны, лежащие в диапазоне от 0.02 до 0.03. Условная вероятность появления отрицательных значений λ_3 в этом диапазоне ϵ равна 8.2%.

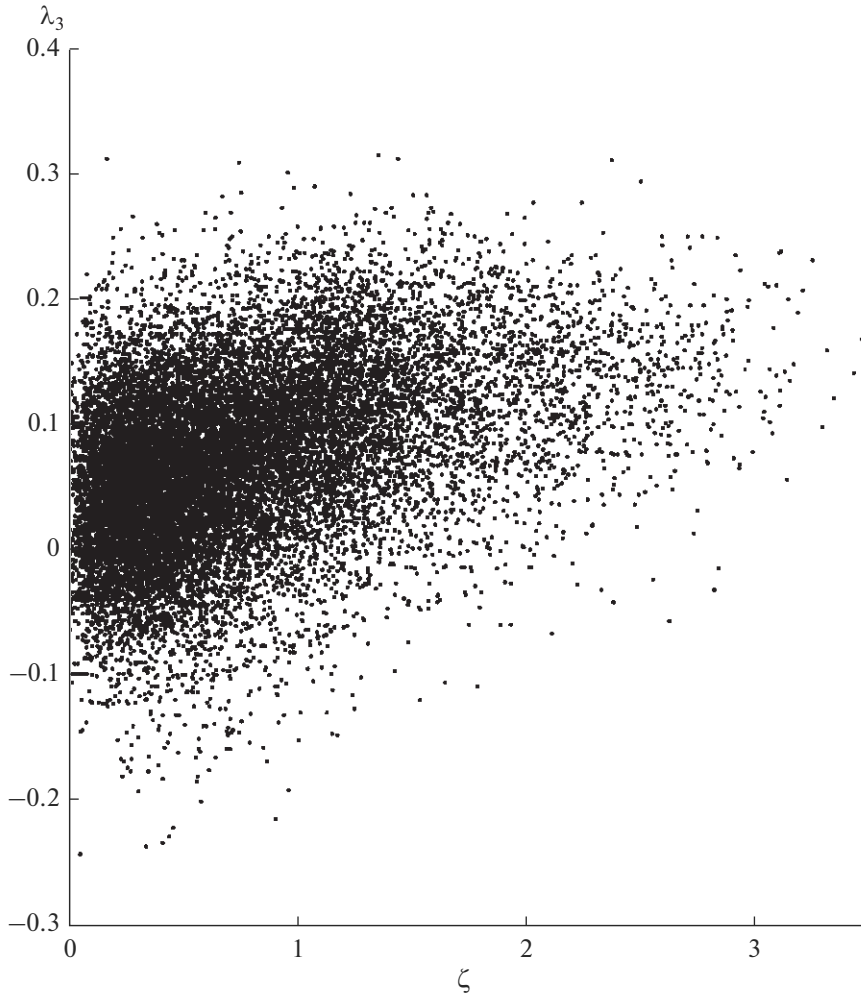


Рис. 4. Зависимость коэффициента асимметрии λ_3 от обратного возраста волн ζ .

ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА АСИММЕТРИИ ОТ ОБРАТНОГО ВОЗРАСТА ВОЛН

Теоретический анализ зависимости старших статистических моментов возвышений морской поверхности от стадии развития волнового поля проводится в рамках предположения, что статистические моменты могут быть рассчитаны, если известен пространственно-временной спектр поверхностных волн [30]. В работе [15] были рассмотрены изменения статистических моментов третьего и четвертого порядков на основе анализа эволюции спектра JONSWAP в форме

$$S(\omega) = 4\pi^2 \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \frac{\omega}{\omega_p} \exp\left[-\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^4\right] \gamma^v \Theta_\omega(\theta), \quad (9)$$

где ω – циклическая частота; ω_p – частота спектрального пика; g – гравитационное ускорение; $\alpha = 0.006\zeta^{0.55}$ при $0.83 < \zeta < 5$; $\gamma = 1.7$ при

$0.83 < \zeta < 1$, $\gamma = 1.7 + 6.0 \lg \zeta$ при $1 \leq \zeta < 5$; $v = \exp\left[-\left(\frac{\omega}{\omega_p} - 1\right)^2 / (2\sigma^2)\right]$; $\sigma = 0.08(1 + 4/\zeta^3)$ при $0.83 < \zeta < 5$; $\Theta_\omega(\theta)$ – функция углового распределения волновой энергии. В данной постановке задачи для спектра (9) коэффициент асимметрии является функцией одного параметра

$$\lambda_3 = 0.153\zeta^{0.3}. \quad (10)$$

Из (10) следует, что коэффициент λ_3 не может быть отрицательным.

Между параметрами ζ и ϵ наблюдается высокая корреляция. Для анализируемого здесь массива данных коэффициент корреляции между ζ и ϵ равен 0.71, поэтому зависимость $\lambda_3 = \lambda_3(\zeta)$, представленная на рис. 4, подобна зависимости $\lambda_3 = \lambda_3(\epsilon)$, приведенной на рис. 2. Для нее также характерен значительный разброс значений λ_3

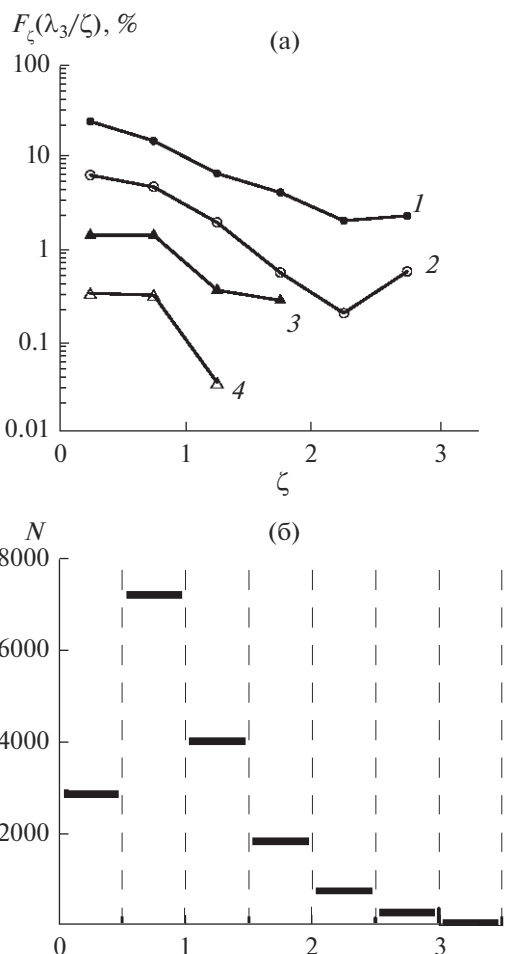


Рис. 5. Верхний фрагмент рисунка – условная вероятность появления отрицательных значений коэффициента асимметрии $F_\zeta(\lambda_3|\zeta)$: кривая 1 – $\lambda_3 < 0$; кривая 2 – $\lambda_3 < -0.05$; кривая 3 – $\lambda_3 < -0.1$; кривая 4 – $\lambda_3 < -0.15$. Нижний фрагмент рисунка – гистограмма обратного возраста волн ζ .

при фиксированных значениях ζ , т.е. зависимость (10) не описывает всего многообразия ситуаций, возникающих в морских условиях. С ростом ζ нижняя граница диапазона, в котором находятся значения λ_3 , смещается в сторону положительных значений. Значения $\lambda_3 < 0$ в основном наблюдаются при небольших значениях ζ .

Рассмотрим условную вероятность $F_\zeta(\lambda_3|\zeta)$. Разобьем диапазон изменения параметра ζ на поддиапазоны шириной 0.5. Результаты расчетов условной вероятности $F_\zeta(\lambda_3|\zeta)$ и гистограмма параметра ζ представлены на рис. 5. На ранних стадиях развития волнового поля, при $\zeta > 3$ отрицательные значения коэффициента асимметрии не наблюдаются.

Гистограмма ζ показывает, что наиболее вероятными в прибрежной зоне являются значения обратного возраста волн, лежащие в пределах от 0.5 до 1. Условная вероятность появления отрицательных значений в этом диапазоне ζ равна 14.0%.

Наряду с параметром ζ в качестве характеристики стадии развития волнового поля при анализе радиоальтиметрических измерений используется еще один безразмерный параметр, получивший название псевдовозраст [11, 31, 32]

$$v = gH_S/U_{10}^2, \tag{11}$$

где H_S – значительная высота волн (средняя высота 1/3 самых высоких волн). Достоинством этого параметра является то, что он может быть определен непосредственно по данным альтиметрических измерений. Для анализируемого здесь массива данных коэффициент корреляции между параметрами λ_3 и v равен -0.07 . Возможно, целесообразно вместо v использовать обратный псевдовозраст, т.е. $\tilde{v} = v^{-1}$, коэффициент корреляции между параметрами λ_3 и \tilde{v} выше и равен 0.19.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отклонения распределения возвышений морской поверхности от распределения Гаусса вызваны присутствием связанных волновых составляющих, а также резонансными и квазирезонансными межволновыми взаимодействиями. К настоящему времени построено большое число моделей, в рамках которых анализируется влияние указанных физических механизмов на вид распределения поверхностных волн. Общим результатом, следующим из этих моделей, является то, что коэффициент асимметрии λ_3 является всегда положительным. Однако, этот результат противоречит данным натурных измерений, проведенным в разных районах Мирового океана.

Измерения, проведенные на стационарной океанографической платформе Морского гидрофизического института РАН, показали, что в прибрежной зоне вероятность появления отрицательных значений λ_3 составляет около 15%. Это событие наиболее вероятно при малых значениях крутизны и обратного возраста волн.

Работа выполнена в рамках тем госзадания 0555-2021-0002 и 0555-2021-0004 “Фундаментальные исследования океанологических процессов, определяющих состояние и эволюцию морской среды под влиянием естественных и антропогенных факторов, на основе методов наблюдения и моделирования”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Taklo T.M.A., Trulsen K., Gramstad O., Krogstad H.E., Jensen A.* Measurement of the dispersion relation for random surface gravity waves // *J. Fluid Mech.* 2015. V. 766. P. 326–336.
2. *Babanin A.V., Polnikov V.G.* On non-Gaussian wind waves // *Physical Oceanography.* 1994. № 3. P. 79–82.
3. *Gao Z., Sun Z., Liang S.* Probability density function for wave elevation based on Gaussian mixture models // *Ocean Engineering.* 2020. V. 213. 107815.
4. *Annenkov S.Y., Shrira V.I.* Large-time evolution of statistical moments of wind-wave fields // *J. Fluid Mech.* 2013. V. 726. P. 517–546.
5. *Song J.-B., Wu Y.-H., Wiwatanapataphee B.* Probability distribution of random wave forces in weakly nonlinear random waves // *Ocean Engineering.* 2000. V. 27. № 12. P. 1391–1405.
6. *Agarwal P., Manuel L.* On the modeling of nonlinear waves for prediction of long-term offshore wind turbine loads // *J. Offshore Mechanics and Arctic Engineering.* 2009. V. 131. № 4. 041601.
7. *Лебедев С.А., Гусев И.В.* Международный опыт калибровки данных спутниковой альтиметрии на стационарных и временных полигонах // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2021. Т. 18. № 2. С. 18–35.
8. *Abdalla S., Abdeh Kolahchi A., Ablain M., Adusumilli S., Aich Bhowmick S., Alou-Font E., ... Aouf L.* Altimetry for the future: Building on 25 years of progress // *Advances in Space Research.* 2021. V. 68. № 2. P. 319–363.
9. *Запевалов А.С.* Влияние асимметрии и эксцесса распределения возвышений взволнованной морской поверхности на точность альтиметрических измерений ее уровня // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2012. Т. 48. № 2. С. 224–231.
10. *Pires N., Fernandes M., Gommenginger C., Scharroo R.* A conceptually simple modeling approach for Jason-1 sea state bias correction based on 3 parameters exclusively derived from altimetric information // *Remote Sensing.* 2016. V. 8. № 7. P. 576.
11. *Badulin S.I., Grigorieva V.G., Shabanov P.A., Sharmar V.D., Karpov I.O.* Sea state bias in altimetry measurements within the theory of similarity for wind-driven seas // *Advances in Space Research.* 2021. V. 68. № 2. P. 978–988.
12. *Tayfun M.A., Alkhalidi M.A.* Distribution of Surface Elevations in Nonlinear Seas // *Offshore Technology Conference.* 22–25 March 2016. Kuala Lumpur. Malaysia. OTC-26436-MS.
13. *Hou Y., Song G., Zhao X., Song J., Zheng Q.* Statistical distribution of nonlinear random water wave surface elevation // *Chinese Journal Oceanology and Limnology.* 2006. V. 24. № 1. P. 1–5.
14. *Socquet-Juglard H., Dysthe K., Trulsen K., Krogstad H.E., Liu J.* Probability distributions of surface gravity waves during spectral changes // *J. Fluid Mech.* 2005. V. 542. № 1. P. 195–216.
15. *Annenkov S.Y., Shrira V.I.* Evaluation of skewness and kurtosis of wind waves parameterized by JONSWAP Spectra // *J. Physical Oceanography.* 2014. V. 44. № 6. P. 1582–1594.
16. *Longuet-Higgins M.S.* The effect of nonlinearities on statistical distributions in the theory of sea waves // *J. Fluid Mech.* 1963. V. 17. P. 459–480.
17. *Jha A.K., Winterstein S.R.* Nonlinear random ocean waves: prediction and comparison with data // *19th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium. Proceedings.* 2000. Paper № OMAE 00-6125.
18. *Запевалов А.С., Большаков А.Н., Смолов В.Е.* Моделирование плотности вероятностей возвышений морской поверхности с помощью рядов Грам-Шарлье // *Океанология.* 2011. Т. 51. № 3. С. 432–439.
19. *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.
20. *Guedes Soares C., Cherneva Z., Antão E.M.* Steepness and asymmetry of the largest waves in storm sea states // *Ocean Engineering.* 2004. Vol. 31. P. 1147–1167.
21. *Huang N.E., Long S.R.* An experimental investigation of the surface elevation probability distribution and statistics of wind-generated waves // *J. Fluid Mech.* 1980. V. 101. № 1. P. 179–200.
22. *Zavadsky A., Liberzon D., Shemer L.* Statistical analysis of the spatial evolution of the stationary wind wave field // *J. Phys. Oceanogr.* 2013. V. 43. P. 65–79.
23. *Толокнов Ю.Н., Коровушкин А.И.* Система сбора гидрометеорологической информации // *Системы контроля окружающей среды.* 2010. Вып. 10. С. 50–53.
24. *Ефимов В.В., Комаровская О.И.* Возмущения, вносимые Крымскими горами в поля скорости ветра // *Морской гидрофизический журнал.* 2019. Т. 35. № 2 (206). С. 134–146.
25. *Solov'ev Yu. P., Ivanov V.A.* Preliminary results of measurements of atmospheric turbulence over the sea // *Physical Oceanography.* 2007. № 3. P. 154–172.
26. *Соловьев Ю.П.* Измерения атмосферной турбулентности в прибрежной зоне моря при слабом ветре с горного берега // *Изв. РАН. Физика Атмосферы и Океана.* 2013. Т. 49. № 3. С. 344–357.
27. *Young I.R., Donelan M.A.* On the determination of global ocean wind and wave climate from satellite observations // *Remote Sensing of Environment.* 2018. V. 215. P. 228–241.
28. *Srokosz M.A., Longuet-Higgins M.S.* On the skewness of sea-surface elevation // *J. Fluid Mech.* 1986. V. 164. P. 487–497.
29. *Leykin I.A., Donelan M.A., Mellen R.H., McLaughlin D.J.* Asymmetry of wind waves studied in a laboratory tank // *Nonlinear Processes in Geophysics.* 1995. V. 2. № 3/4. P. 280–289.
30. *Janssen P.A.E.M.* On some consequences of the canonical transformation in the Hamiltonian theory of water waves // *J. Fluid Mech.* 2009. V. 637. P. 1–44.
31. *Glazman R.E., Srokosz M.A.* Equilibrium Wave Spectrum and Sea State Bias in Satellite Altimetry // *J. Physical Oceanography.* 1991. V. 21. № 11. P. 1609–1621.
32. *Fu L.-L., Glazman R.* The effect of the degree of wave development on the sea state bias in radar altimetry measurement // *J. Geophysical Research: Oceans.* 1991. V. 96. № C1. P. 829–834.

The Appearance of Negative Values of the Skewness of Sea Surface Waves

A. S. Zapevalov¹ and A. V. Garmashov^{1, *}

¹ *Marine Hydrophysical Institute of RAS, Kapitanskaya str., 2, Sevastopol, 299011 Russian Federation*

**e-mail: ant.gar@mail.ru*

Based on the data of direct wave measurements carried out in the coastal zone of the Black Sea, the probability of the appearance of negative values of the skewness of the sea surface elevations is being studied. It is shown that ensemble average probability that the skewness is less than zero is about 15%. The influence of the steepness and the inverse wave age on the probability of this event is analyzed. It was found that most often negative values of the skewness are observed for sloping waves at the decay stage.

Keywords: sea surface, wave elevations of the surface, skewness, steepness, inverse wave age