

Экспериментальные исследования статистических характеристик обрушений ветровых волн

А. Е. Кориненко^{1,*}, В. В. Малиновский¹, В. Н. Кудрявцев^{1,2}

¹Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

*E-mail: korinenko.alex@gmail.com

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 04.07.2018 г., после доработки – 05.09.2018 г.

Приводятся результаты анализа характеристик обрушений ветровых волн (длина, скорость, направление движения), которые были получены в Черном море в сентябре – октябре 2015 г. с океанографической платформы в Качивели. Обрушения регистрировались видеокамерой синхронно с измерениями ветрового волнения и метеопараметров. Для идентификации обрушений по видеозаписям использовался алгоритм, основанный на расчете порога, который определяется при анализе функции распределения вариаций яркости видеосигнала. Используемая в эксперименте оптическая аппаратура позволяла надежно идентифицировать обрушения, генерируемые волнами с длинами более 4 м и фазовыми скоростями, превышающими 2,5 м/с. Полученные данные хорошо соответствуют модельным представлениям О. М. Филлипа, разработанным для равновесного интервала спектра ветровых волн. Приводятся гистограммы скоростей обрушений при скоростях ветра 10–16 м/с. Показано, что при развивающемся волнении фазовая скорость обрушивающихся волн может достигать скорости ветровых волн спектрального пика, в то время как при развитом волнении не наблюдалось обрушений со скоростями, превышающими половину фазовой скорости волн спектрального пика. Плотности вероятности длин обрушений в измеряемом диапазоне скоростей ветра описываются степенным законом с показателем степени –3,23. Распределение ориентаций обрушений хорошо описывается степенью косинуса угла, при этом показатель степени линейно уменьшается с 5 до 4 с ростом скорости ветра от 10 до 16 м/с.

Ключевые слова: обрушения ветровых волн, натурные исследования, ориентация обрушений волн, распределение длин обрушений, спектр ветровых волн.

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». В. Н. Кудрявцев отмечает финансовую поддержку гранта РНФ №17-77-30019.

Для цитирования: Кориненко А. Е., Малиновский В. В., Кудрявцев В. Н. Экспериментальные исследования статистических характеристик обрушений ветровых волн // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 6. С. 534–547. doi:10.22449/0233-7584-2018-6-534-547

Experimental Research of Statistical Characteristics of Wind Wave Breaking

A. E. Korinenko^{1,*}, V. V. Malinovsky¹, V. N. Kudryavtsev^{1,2}

¹Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

*e-mail: korinenko.alex@gmail.com

²Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia

The results of characteristics' analysis of the wind wave breaking (length, velocity, direction) obtained in the Black Sea in September-October, 2015 from the oceanographic platform in Katsiveli are presented. Wave breaking was recorded by a video camera synchronously with the measurements of wind waves and meteorological parameters. The algorithm based on calculating the threshold determined at analyzing the distribution function of the video signal brightness was applied to identify breaking using the video records. The optical equipment used in the experiment made it possible to reliably identify the breaking generated by the waves with the lengths greater than 4 m and the phase velocities exceeding 2.5 m/s. The data obtained correspond well to the model conceptions of O.M. Phillips which were developed for the equilibrium interval of the wind wave spectrum. The histograms of

© Кориненко А. Е., Малиновский В. В., Кудрявцев В. Н., 2018

the wave breaking velocities at the wind speeds 10–16 m/s are given. It is shown that at the developing waves, the breaking waves' phase velocity can reach that of the wind waves corresponding to the spectral peak, while at the developed waves, no breaks with the velocities exceeding a half-phase one of the waves corresponding to the spectral peak were observed. Probability densities of the breaking lengths in the wind speeds' measured range are described by the power law with the exponent -3.23. Distribution of the breaking orientations is described well by a degree of the angle cosine, at that the exponent decreases linearly from 5 to 4 with the wind speed increase from 10 to 16 m/s.

Keywords: wind wave breaking, *in situ* studies, wave breaking orientation, breaking lengths' distribution, wind waves' spectrum.

Acknowledgements: the investigation is carried out within the framework of the state task on the theme № 0827-2018-0003 "Fundamental studies of the oceanological processes conditioning the marine environment state and evolution under the influence of natural and anthropogenic factors based on the observational and modeling methods". V. N. Kudryavtsev points to financial support of the RSF grant № 17-77-30019.

For citation: Korinenko, A.E., Malinovsky, V.V. and Kudryavtsev, V.N., 2018. Experimental research of statistical characteristics of wind wave breaking. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, [e-journal] 34(6), pp. 534-547. doi:10.22449/0233-7584-2018-6-534-547 (in Russian).

Введение

Обрушения ветровых волн (ОВВ) играют важную роль в процессах, связанных с газообменом между океаном и атмосферой [1], диссипацией волновой энергии [2], генерацией турбулентности в приповерхностном слое моря [3].

Учет рассеяния электромагнитных волн на обрушениях важен при анализе данных дистанционного зондирования океана, в частности радиолокационных. Внутренние волны, зоны конвергенции течений и другие подповерхностные процессы могут вызывать интенсификацию обрушений и проявляться в радиолокационных изображениях моря [4, 5].

Используемым в различных радиофизических задачах параметром является длина обрушивающихся гребней L_b . В работе [6] показана существенная роль брызг, создаваемых ОВВ, при рассеянии в 8-миллиметровом диапазоне электромагнитных волн, при этом интенсивность брызг определяется величиной L_b . Модель нерезонансной компоненты рассеяния, связанная с ОВВ, при скользких углах зондирования на горизонтальной поляризации облучения предложена в [7], где показано, что эффективная площадь рассеяния зависит от L_b и ориентации обрушений.

К настоящему времени выполнен ряд исследований по изучению длин и ориентаций ОВВ. В одной из первых работ [8], посвященных изучению статистических характеристик обрушений, получены плотности вероятности величин L_b , хорошо описываемые гамма-распределением, и гистограммы ориентаций обрушений, описываемые нормальным распределением. Результаты анализа натурных экспериментов представлены в работе [9], где распределение L_b предлагается описывать экспоненциальным законом. Гистограммы длин обрушений и ориентаций приведены в [10], а в [11] показано, что при молодом волнении скорости обрушений могут достигать фазовой скорости волн спектрального пика, в то время как при полностью развитом волнении обрушиваются волны равновесного интервала спектра.

Обрушения являются основным источником потери энергии ветровых волн в гравитационном интервале [2], поэтому представления об угловом распределении ОВВ необходимы для валидации существующих моделей диссипации волновой энергии.

Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию статистических характеристик обрушений, практически отсутствуют их сопоставления с модельными расчетами. Недостаточно изучены ориентации длин обрушений при различных гидрометеорологических условиях.

Цель настоящей работы – анализ статистических характеристик обрушений ветровых волн, полученных в натуральных условиях, и сопоставление экспериментальных зависимостей с существующими моделями.

Методика обработки данных и условия проведения эксперимента

Натурные эксперименты проводились в сентябре – октябре 2015 г. со стационарной океанографической платформы, расположенной в Голубом заливе в районе пгт Кацивели (Южный берег Крыма). Океанографическая платформа установлена в ~480 м от ближайшей точки берега и имеет координаты 44°23'38" с. ш., 33°59'09" в. д. Глубина в районе расположения платформы составляет около 30 м.

В данной работе определение характеристик обрушений ветровых волн осуществлялось по видеозаписям морской поверхности, выполненным с помощью цифровой видеокамеры, расположенной на высоте 11,4 м над уровнем моря. Направление визирования составляло 30°–40° к горизонту, в азимутальной плоскости – порядка 50°–60° к направлению «на ветер». Использование объектива с углом обзора 54° по горизонтали и 32° по вертикали обеспечивало видеозапись площадки на морской поверхности в виде трапеции с длинами оснований 14–16 и 29–48 м. Запись осуществлялась с частотой 25 кадров в секунду и разрешением 1920 × 1080 пикселей.

Для выделения обрушений на фоне морской поверхности использовалась оригинальная методика, предложенная в [12]. Ее алгоритм основан на расчете порога, который определяется на основе анализа функции распределения вариаций яркости натуральных видеозаписей. Области морской поверхности с яркостью, превышающей величину порога, обозначались логической единицей, все другие – нулем. Последующая обработка данных состояла в разделении процесса обрушения на две фазы – активный барашек и остаточная пена. Выделение активного барашка основывалось на различиях кинематических характеристик этих фаз [12]. Обработка видеозаписей выполнялась в автоматическом режиме.

В дальнейшем выделенные области разделялись на группы, все точки в которых принадлежат областям, связанным в пространстве и времени. В результате для всех серий измерений был получен набор групп, каждая из которых представляла собой информацию об эволюции активной фазы индивидуального обрушения.

Для определения физических размеров обрушений каждый кадр видеозаписи при известной геометрии наблюдений и параметрах видеокамеры (угол наклона, размеры матрицы, значение фокусного расстояния и углы обзора объектива) трансформировался в прямоугольную систему горизонтальных координат на морской поверхности. В зависимости от значения угла поля зрения объектива видеокамеры максимальное пространственное разрешение составляло ~1 см, минимальное ~2,5 см. В результате для каждой группы бы-

ли рассчитаны площадь обрушения S_i^j , ее максимальные линейные размеры L_i^j , представляющие собой длины больших осей эллипсов, аппроксимирующих область обрушения по методике [12]; координаты положения центра масс (x_i^j, y_i^j) , где индекс i – номер обрушения, принадлежащего группе, j – номер группы. Средний модуль скорости движения обрушения и направление пространства рассчитывались следующим образом: $c^j = \sqrt{(c_x^j)^2 + (c_y^j)^2}$, $\phi^j = \arctan(c_y^j/c_x^j)$, где c_x^j, c_y^j – компоненты скорости, которые определялись по движению центра масс методом наименьших квадратов ошибок.

Результатом обработки является база данных, которая содержит информацию о линейных размерах обрушения во времени и пространстве, среднем модуле скорости движения центра масс обрушивающегося гребня и его направлении.

Сбор метеорологической информации осуществлялся многофункциональным комплексом *Davis 6152EU*, расположенным на высоте 23 м над уровнем моря на мачте океанографической платформы. Измеренная скорость ветра пересчитывалась в эффективную нейтрально стратифицированную скорость ветра U на высоте 10 м по методике [13].

Характеристики поверхностного волнения регистрировались с помощью решетки из 6 струнных волнографов, расположенных в центре и вершинах правильного пятиугольника с радиусом описанной окружности 0,25 м. Расстояние решетки волнографов до ближайшего элемента платформы превышало 10 м.

В результате обработки волнографических данных методом максимальной энтропии были рассчитаны частотно-угловые спектры возвышений морской поверхности $S(f, \phi)$, определены значения частот спектрального пика ветровых волн f_p , направления генерального распространения ветрового волнения ϕ_p и волн зыби, высоты значительных волн H_s ($H_s = 4\sqrt{\sigma^2}$, где σ^2 – дисперсия возвышений морской поверхности).

Ниже для анализа полученных результатов используется теория О. М. Филлипса [14], разработанная для равновесного интервала спектра ветровых волн, где приток энергии от ветра, нелинейные взаимодействия и диссипация энергии за счет обрушений находятся в балансе и пропорциональны друг другу.

Как известно, в натуральных условиях помимо ветрового волнения присутствуют волны зыби, эволюция которых не описывается в рамках локального баланса энергии, характерного для равновесного интервала.

Для разделения частотного спектра волнения на волны зыби и ветровые волны использовался метод, предложенный в работе [15], в рамках которого измеренный спектр волн $S(f)$ сравнивается с теоретическим спектром $F(f)$ [14]: $F(f) = 2\pi\gamma u_* g (2\pi f)^{-4}$, где $\gamma = 0,06-0,11$; u_* – динамическая скорость; g – ускорение свободного падения. Согласно этому методу, область спектра, которая лежит выше нижней границы ($\gamma = 0,06$), относится к ветровым волнам, а если область спектра расположена ниже границы, то измеряемые волны классифицируются как волны зыби.

Наши измерения выполнялись в диапазоне скоростей ветра 10–16 м/с. Главным критерием отбора данных измерений были стационарность скорости и направления ветра в течение нескольких часов. Для анализа выбраны случаи, когда угол между направлениями зыби и скорости ветра не превышал 30°.

Общая информация об условиях проведения экспериментов приведена в таблице (дата измерений; средние значения скорости ветра \bar{U} и его направления $\varphi_{\bar{U}}$; H_s ; возраст волн $\alpha = c_p/U$, где c_p – фазовая скорость волн на частоте спектрального пика f_p).

Условия проведения измерений Measuring conditions

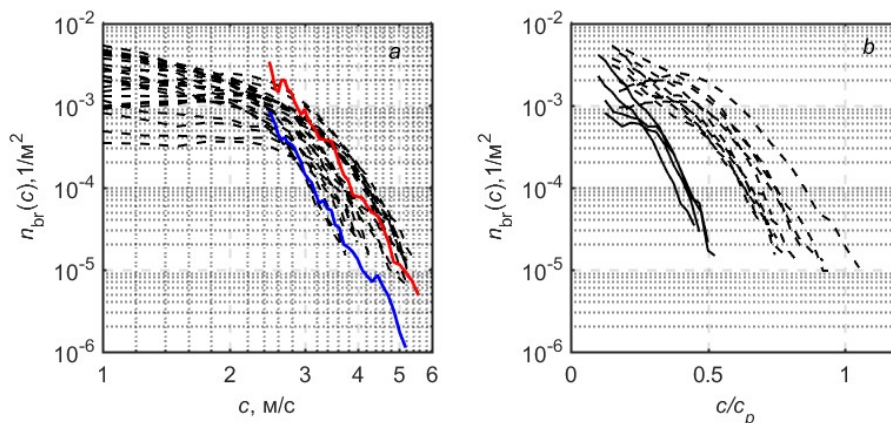
Дата/Date	№ серии измерений/ No. of measurement series	\bar{U} , м/с/ \bar{U} , m/s	$\varphi_{\bar{U}}$ °	H_s , м/ H_s , m	α	f_p °
10.09.2015	1	11,8	85	1,1	0,6	0,21
	2	11,7	85	1,1	0,6	0,21
	3	10,9	85	1,2	0,8	0,19
11.09.2015	1	10,0	90	0,8	0,6	0,28
	2	10,3	90	0,8	0,6	0,26
	3	11,0	90	0,8	0,6	0,26
12.09.2015	1	14,6	70	1,2	0,4	0,28
	2	16,1	75	1,2	0,3	0,29
	3	15,2	85	1,4	0,4	0,25
08.10.2015	1	13,2	70	1,3	0,4	0,29
	2	13,4	80	1,5	0,5	0,24
	3	11,7	80	1,5	0,6	0,24
11.10.2015	1	13,6	70	2,2	0,8	0,14
12.10.2015	1	14,4	65	2,2	0,8	0,13
	2	15,0	65	2,0	0,7	0,14

Результаты натурных измерений

Распределение скоростей обрушений. Рассмотрим статистические характеристики модулей скоростей c обрушений ветровых волн. Согласно предположению [14], скорость движения обрушения равна фазовой скорости c обрушивающейся волны. В этом случае анализ гистограмм обрушений в зависимости от c позволяет с учетом дисперсионного соотношения оценивать вероятность обрушений ветровых волн различных длин.

На рис. 1, а показаны распределения скоростей обрушений на единице поверхности $n_{br}(c)$, полученные из каждой видеозаписи. В представленных данных при $c > 2,5$ –3 м/с наблюдается резкое спадание $n_{br}(c)$ с увеличением скоростей обрушений. При $c < \sim 2,5$ м/с наклон гистограмм существенно меньше и в ряде записей значения $n_{br}(c)$ в этом интервале практически постоянны. Такая особенность гистограмм характеристик обрушений подробно

объясняется в [16], она связана с тем, что при использовании оптической аппаратуры большое количество обрушений, формируемых короткими волнами, при обработке видеозаписей не идентифицируется. Таким образом, гистограммы недостаточно статистически обеспечены при $c < \sim 2,5$ м/с. Для последующего анализа будем рассматривать характеристики тех обрушений, скорость которых превышает 2,5 м/с.



Р и с. 1. Статистические характеристики скоростей обрушений: *a* – гистограммы скоростей обрушений при скоростях ветра 10–16 м/с (сплошные линии – результаты расчетов по формуле (9) (см. с. 543) для скорости ветра 10 м/с (синяя кривая) и 16 м/с (красная кривая)); *b* – гистограммы отношения скорости обрушений к фазовой скорости спектрального пика в диапазонах возраста волн 0,3–0,5 (штриховые) и 0,65–0,8 (сплошные)

F i g. 1. Statistical characteristics of wave breaking velocities: *a* – histograms of wave breaking speeds at the wind speeds 10–16 m/s (solid lines are the results of calculations by formula (9) (see p. 543) for the wind speed 10 m/s (blue curve) and 16 m/s (red curve)); *b* – histograms of the relation of the wave breaking velocity to the phase one corresponding to the spectral peak in the wave age range 0.3–0.5 (dash lines) and 0.65–0.8 (solid lines)

На рис. 1, *b* представлены $n_{br}(c)$, где на оси абсцисс указаны значения отношений c/c_p , характеризующих спектральный интервал обрушивающейся волны. При развивающемся волнении фазовая скорость обрушивающихся волн достигает фазовой скорости ветровых волн спектрального пика. При развитом волнении мы не наблюдали обрушений, движущихся со скоростями выше $0,5c_p$. Полученный нами результат согласуется с экспериментальными данными [11, 17].

Распределение длин обрушений. Рассмотрим статистические характеристики длин обрушений L_b , определенных как размер барашка в направлении, параллельном гребню обрушивающейся волны. На рис. 2 точками показаны распределения $p(L_b)$, полученные в каждой видеозаписи при различных гидрометеорологических условиях. Несмотря на достаточно широкий диапазон условий измерений, все распределения практически однотипны.

Как следует из рис. 2, *a*, плотности вероятности длин обрушений в целом близки к степенному закону

$$p(L_b) = \mu L_b^{-\rho}. \quad (1)$$

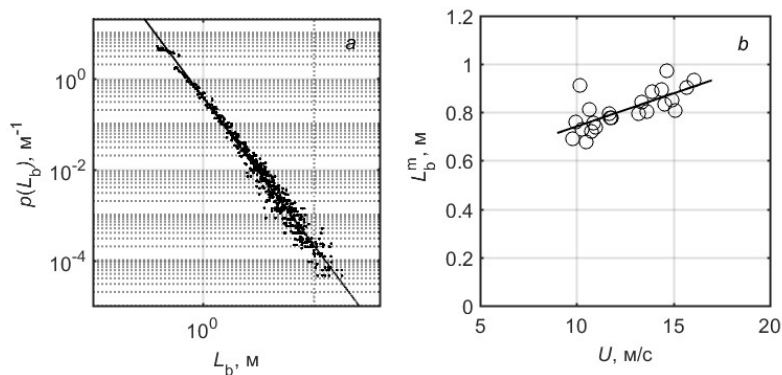


Рис. 2. Статистические характеристики длин обрушений, полученные по всем видеозаписям: *a* – распределение величин L_b ; *b* – ветровая зависимость средней длины обрушения (кружочки), сплошная линия – аппроксимация данных линейной зависимостью

Fig. 2. Statistical characteristics of the wave breaking lengths resulted from all the records: *a* – distribution of L_b values; *b* – wind dependence of the wave breaking average length (circles), solid line denotes data approximation by linear dependence

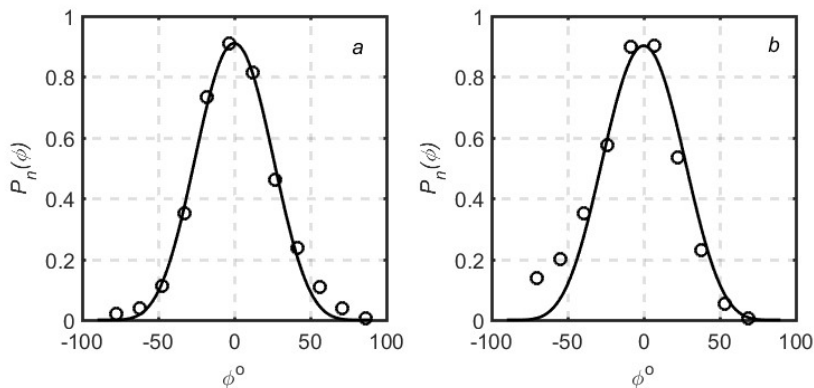
Сплошной линией показан расчет по формуле (1), где коэффициенты для совокупности данных по всем записям были найдены методом наименьших квадратов ошибок и составили $\mu = 0,38$ и $\rho = 3,23$.

Из рис. 2, *b* следует, что с ростом U от 10 до 16 м/с средние значения L_b^m увеличиваются от $\sim 0,7$ до $\sim 0,9$ м. Прямой линией показана линейная зависимость $L_b^m = 0,47 + 0,027U$, наклон которой близок к значению 0,034, полученному в работе [8]. Слабая ветровая зависимость значений L_b^m может быть объяснена резким спаданием $p(L_b)$ с увеличением длины ОБВ. Действительно, средняя длина большой оси обрушения равна первому моменту случайной величины L_b . Тогда с учетом (1) и полученного наклона ρ можно сделать оценку $L_b^m \sim (L_b^{\min})^{-2,23} - (L_b^{\max})^{-2,23}$, где L_b^{\min} и L_b^{\max} – минимальная и максимальная величины регистрируемых L_b . Таким образом, L_b^m в основном определяется ее минимальным размером L_b^{\min} (задаваемым при анализе данных) и растет с увеличением L_b^{\max} при росте ветра.

Распределение ориентаций обрушений. На рис. 3 приведен пример гистограмм углового распределения количества обрушений, полученных 10 и 12 сентября 2015 г. во второй серии измерений. Сплошной линией показана аппроксимация функцией

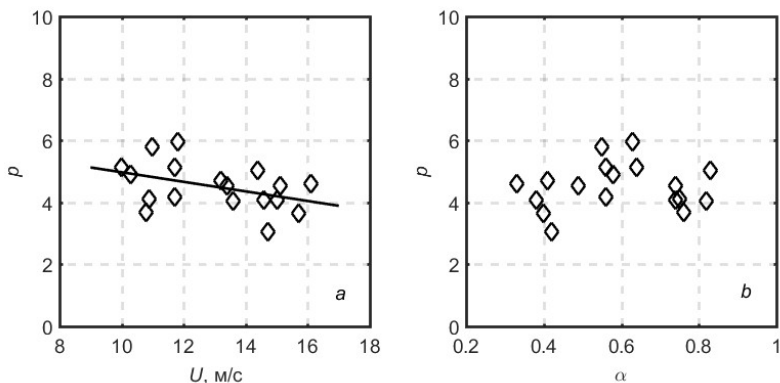
$$P_n(\phi) = A \cos^p(\phi). \quad (2)$$

Для удобства сравнения все угловые распределения нормировались следующим образом: $\int_{-\pi/2}^{\pi/2} P_n(\phi) d\phi = 1$, где $P_n(\phi) = A n_{br}(\phi)$, $A^{-1} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} n_{br}(\phi) d\phi$, $n_{br}(\phi)$ – количество обрушений в направлении ϕ . Начало координат соответствует максимуму распределения. Видно, что распределения ориентаций имеют симметричную унимодальную форму и хорошо описываются выражением (2).



Р и с. 3. Распределения ориентаций обрушений, полученные 10.09.2015 г. – *a* и 12.09.2015 г. – *b*
Fig. 3. Distribution of wave breaking orientations obtained on 10.09.2015 – *a* and 12.09.2015 – *b*

Зависимость от скорости ветра значений p , полученных для всех данных, показана на рис. 4, *a*, где виден достаточно существенный разброс точек. Тем не менее наблюдается слабая ветровая зависимость показателя степени, которую можно аппроксимировать линейной функцией $p = 6,5 - 0,15U$ (сплошная линия). Значения p , полученные при различных возрастах волн, показаны на рис. 4, *b*, где видно отсутствие явной зависимости показателя степени от α .



Р и с. 4. Зависимости показателя степени p (формула (2)) от скорости ветра – *a* и возраста волн – *b*
Fig. 4. Dependence of exponent p (formula (2)) on the wind speed – *a* and wind age – *b*

Обсуждение результатов

Обрушения визуализируют процессы диссипации энергии ветровых волн. Считается, что обрушения являются основным механизмом, ответственным за сброс энергии гравитационных волн в равновесном интервале спектра. Распределение по направлению движения обрушивающихся волн является важной характеристикой, позволяющей связать пространственные характеристики обрушений с угловым спектром поверхностного волнения.

Для оценки статистических характеристик обрушений ветровых волн воспользуемся статистикой обрушений, предложенной О. М. Филлипсом [14]: динамические, кинематические и статистические свойства ОБВ автор

описывает через длину гребня обрушивающейся волны, движущейся со скоростью \mathbf{c} . Была предложена $\Lambda(\mathbf{c})$ -функция – распределение суммарной длины обрушивающихся гребней на единице поверхности в интервале скоростей $(\mathbf{c}, \mathbf{c}+d\mathbf{c})$. Интеграл $\int \Lambda(\mathbf{c}) d\mathbf{c}$ представляет собой полную длину обрушивающихся гребней на единице площади морской поверхности.

В предположении, что обрушения геометрически подобны, средняя длина обрушивающегося гребня будет пропорциональна k^{-1} , где k – волновое число обрушивающейся волны. Тогда количество обрушений n_{br} на единице площади будет пропорционально:

$$n_{br} \sim k \Lambda(\mathbf{k})d\mathbf{k}, \quad (3)$$

где $\Lambda(\mathbf{k})d\mathbf{k}$ – суммарная длина обрушивающихся гребней на единице поверхности в интервале волновых чисел $(\mathbf{k}, \mathbf{k} + d\mathbf{k})$. Отметим, что при переходе от $\Lambda(\mathbf{c})$ к $\Lambda(\mathbf{k})$ используется дисперсионное соотношение для гравитационных волн на глубокой воде $\omega^2 = gk$ и выражение для фазовой скорости $c^2 = g/k$.

Важным выводом теории О. М. Филлипса является связь Λ -функции со средней скоростью диссипации энергии $D(\mathbf{k})$ на единице поверхности за счет обрушений [14]:

$$D(\mathbf{k}) = bg^{3/2}k^{-5/2}\Lambda(\mathbf{k}), \quad (4)$$

где $b = 0,03-0,07$ – безразмерный параметр [18].

Для нахождения $D(\mathbf{k})$ рассмотрим баланс энергии в равновесном интервале спектра поверхностных волн. Согласно [14], диссипация энергии за счет обрушений будет пропорциональна притоку энергии от ветра:

$$D(\mathbf{k}) = g\omega\beta(k, \phi)F(\mathbf{k}), \quad (5)$$

где $\beta(k, \phi)$ – коэффициент ветро-волнового взаимодействия; $F(\mathbf{k})$ – спектр возвышений.

Из (4) и (5) можно получить выражение $\Lambda(\mathbf{k}) = b^{-1}k^3 \beta(k, \phi)F(\mathbf{k})$, подставляя которое в (3) запишем n_{br} следующим образом:

$$n_{br}(\mathbf{k}) \sim b^{-1}\beta(k, \phi)k^4F(\mathbf{k}). \quad (6)$$

В работе [19] предложено выражение для коэффициента ветро-волнового взаимодействия $\beta(k, \phi) = C_\beta(u_*/c)^2 \cos^2 \phi$, где C_β – параметр. В переменных (ω, ϕ) с учетом дисперсионного соотношения выражение (6) запишется в виде

$$n_{br}(\omega, \phi) \sim b^{-1}C_\beta u_*^2 g^{-6} \cos^2 \phi \omega^{10} S(\omega, \phi). \quad (7)$$

Согласно (7), азимутальное распределение количества обрушений, которые генерируются волнами из частотного интервала (ω_0, ω_1) , запишется как

$$n_{br}(\phi) \sim b^{-1}C_\beta u_*^2 g^{-6} \int_{\omega_0}^{\omega_1} \cos^2 \phi \omega^{10} S(\omega, \phi) d\omega, \quad (8)$$

где $\omega_0 = 1,5\omega_p$ и ω_1 – нижняя и верхняя границы равновесного интервала соответственно [20]. Как отмечалось выше, используемая методика позволяет

надежно регистрировать обрушения, скорость которых превышает 2,5 м/с. Тогда для наших условий $\omega_1 = 4$ рад/с.

Выражение (7) позволяет оценить количество обрушений на единице поверхности в интервале скоростей ($c, c + dc$). Интегрируя (7) по азимуту, с учетом дисперсионного соотношения в переменных c можно записать

$$n_{br}(c) \sim b^{-1} C_{\beta} u_*^2 g^2 c^{-7} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 \phi B(\omega, \phi) d\phi, \quad (9)$$

где $B(\omega) = S(\omega, \phi) \omega^5 / 2g^2$ – функция насыщения [14].

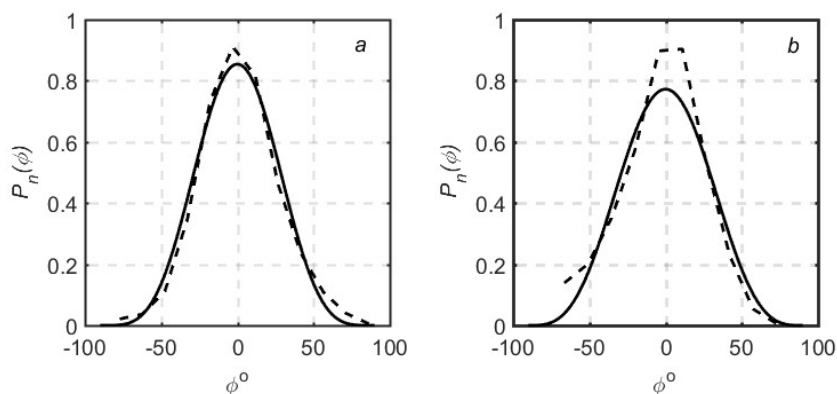
Суммарное число обрушений n_{br} (движущихся со скоростями в интервале $c_0 - c_1$) на единице площади в данный момент времени запишется в виде

$$n_{br}(c_0, c_1) \sim b^{-1} C_{\beta} u_*^2 g^2 \int_{c_1}^{c_0} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} c^{-7} \cos^2 \phi B(\omega, \phi) d\phi dc, \quad (10)$$

где $c_0 = 0,7c_p$; $c_1 = 2,5$ м/с – минимальная скорость обрушений, надежно регистрируемая используемой методикой обработки видеоизображений.

Для количественного сопоставления экспериментально измеренных статистических характеристик обрушений ветровых волн с модельными выражениями (8) – (10) необходимо определить значения константы b и коэффициента пропорциональности, связывающего среднюю длину обрушивающегося гребня с волновым числом. Как следует из [21], значения b , полученные разными авторами, отличаются более чем на три порядка. Поскольку оценка констант выходит за рамки настоящей работы, проведем качественное сопоставление результатов измерений и модельных расчетов (8) – (10), за $S(\omega, \phi)$ возьмем измеренные во время проведения экспериментов частотно-угловые спектры возвышений морской поверхности.

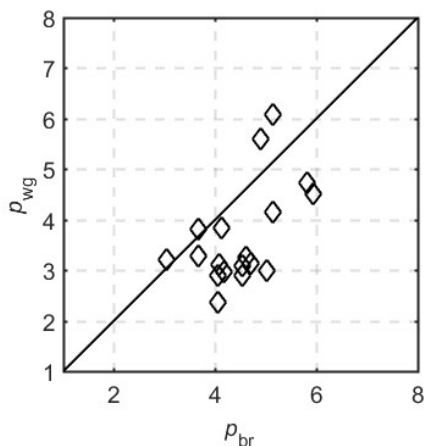
На рис. 5 показаны примеры распределений ориентаций обрушений: штриховые линии – данные, полученные по видеозаписям морской поверхности, сплошные – рассчитанные по модели (6) с учетом измеренных спектров волн.



Р и с. 5. Распределения количества обрушений по направлениям: *a* – при скорости ветра 11,7 м/с и возрасте волн 0,64; *b* – при $U = 16$ м/с и возрасте волн 0,33

F i g. 5. Distribution of wave breaking quantity according to directions: *a* – at wind speed 11.7 m/s and wave age 0.64; *b* – at $U = 16$ m/s and wave age 0.33

Для сравнения распределений $P_n(\phi)$, полученных по экспериментальным данным и модельным расчетам, аппроксимируем угловые распределения количества обрушений и выражение (8) степенной функцией косинуса с показателем степени p . Сравнение значений коэффициентов p_{br} , найденных при аппроксимации натуральных данных, и величин p_{wg} , полученных при аппроксимации (8), приведено на рис. 6, где наблюдается удовлетворительная корреляция экспериментальных результатов и модельных расчетов. Однако ряд значений p_{wg} приблизительно в 1,2–1,5 раза меньше соответствующих величин p_{br} . Такое расхождение ширины распределений ориентаций обрушений требует дополнительного исследования. Одной из причин может оказаться модулирующее влияние длинных волн, не учитываемое в модели.



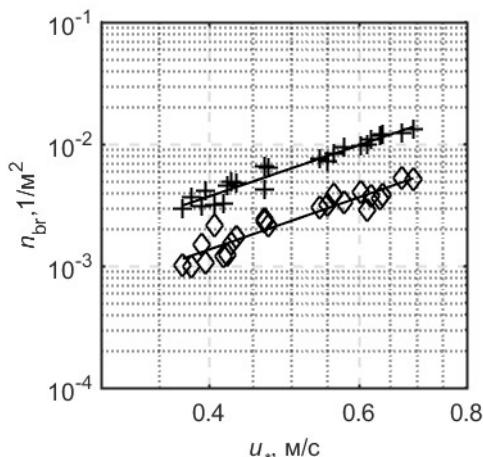
Р и с. 6. Показатель степени функции $\cos^p(\phi)$ при аппроксимации натуральных данных и выражения (8). Сплошная линия соответствует равенству двух величин
F i g. 6. Exponent of function $\cos^p(\phi)$ at approximation of *in situ* data and expression (8). Solid line corresponds to equality of two values

Как отмечалось выше, значение b требует дальнейшего уточнения, поскольку у разных авторов оно отличается на порядки. В таком случае мы можем сравнивать только вид модельных зависимостей с результатами натуральных измерений. При расчетах по (9), (10) значения констант выбирались так, чтобы уровни модельных и экспериментальных зависимостей были близки. На рис. 1, *a* цветными линиями показаны распределения скоростей обрушений, рассчитанные по (9), а в качестве $S(\omega, \phi)$ использованы измеренные частотно-угловые спектры возвышений морской поверхности.

Как следует из рис. 1, *a*, наклоны рассчитанных по (9) кривых хорошо совпадают с натурными данными. Отметим, что уровни модельных распределений при фиксированной скорости обрушений растут с увеличением ветра, что объясняет наблюдаемый разброс экспериментальных значений $n_{br}(c)$, полученных при различных ветрах.

Рассмотрим поведение суммарного числа обрушений n_{br} , полученных в различных условиях. На рис. 7 ромбиками показана экспериментальная зави-

симось n_{br} , крестиками – результаты расчетов по (10), прямыми линиями – аппроксимация зависимостью $n_{br} = 0,0128u_*^{2,5}$ (для ромбиков) и $n_{br} \sim u_*^{2,4}$ (для крестиков), где коэффициенты рассчитаны методом наименьших квадратов ошибок. Видно, что наклоны модельных и экспериментальных ветровых зависимостей n_{br} совпадают.



Р и с. 7. Зависимость суммарного числа обрушений на единице поверхности при $c > 2,5$ м/с от динамической скорости

F i g. 7. Dependence of total wave breakings per a unit of surface ($c > 2.5$ m/s) on the dynamic speed

Заклучение

Выполненный анализ статистических характеристик обрушений ветровых волн позволяет сделать следующие выводы. В зависимости от состояния морской поверхности обрушения формируются в различных интервалах волнового спектра. При развитом волнении обрушиваются волны равновесного интервала с фазовыми скоростями, не превышающими 0,5 фазовой скорости спектрального пика. При развивающемся волнении скорости обрушивающихся волн достигают фазовой скорости ветровых волн спектрального пика. Распределения длин обрушений хорошо описываются степенным законом с показателем $-3,23$. Средние значения длин ОБВ имеют слабый линейный рост с увеличением скорости ветра.

Распределения ориентаций обрушений (движущихся со скоростями в интервале $c_0 - c_1$, где $c_0 = 0,7c_p$; $c_1 = 2,5$ м/с) можно аппроксимировать функцией $A \cos^p(\phi)$. Значения показателя степени p линейно уменьшаются с 5 до 4 с ростом скорости ветра от 10 до 16 м/с. Явной зависимости величин p от возраста волн не обнаружено.

Для оценки статистических характеристик обрушений ветровых волн, полученных в натуральных условиях, использовался подход О. М. Филлипса, связывающий динамические, кинематические и статистические свойства ОБВ с длинами гребней обрушивающихся волн (Λ -функция). С учетом данного подхода Λ -функцию можно выразить через коэффициент ветро-волнового взаимодей-

ствия $\beta(\omega, \phi)$ и спектр волн $S(\omega, \phi)$ и таким образом построить модель для числа обрушений на единице поверхности. Правильность используемого теоретического подхода к описанию статистических характеристик обрушений подтверждается при сопоставлении экспериментальных данных с модельными расчетами.

Сопоставление модельных и натуральных распределений ориентаций ОВВ при их аппроксимации функцией $A\cos^p(\phi)$ показало их хорошее соответствие. В то же время для ряда измерений расчетные величины p оказались примерно в 1,2–1,5 раза меньше полученных по экспериментальным данным.

Наклоны распределений скоростей обрушений при $c > 2,5$ м/с, полученные при измерениях и в результате модельных расчетов, совпадают. При этом модель показывает увеличение уровня $n_{br}(c)$ с ростом ветра, что объясняет разброс наблюдаемых данных. Ветровая зависимость числа обрушений на единице площади при $c > 2,5$ м/с хорошо описывается степенным законом $n_{br} = 0,0128u_*^{2,5}$. Наклон модельной кривой $n_{br} \sim u_*^{2,4}$ совпадает с натурными данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Environmental turbulent mixing controls on air-water gas exchange in marine and aquatic systems / C. J. Zappa [et al.] // Journal of Geophysical Research Letters. 2007. Vol. 34. L10601. <https://doi.org/10.1029/2006GL028790>
2. Thorpe S. A. Energy Loss by Breaking Waves // Journal of Physical Oceanography. 1993. Vol. 23, no. 11. P. 2498–2502.
3. On the Vertical Structure of Wind-Driven Sea Currents / V. Kudryavtsev [et al.] // Journal of Physical Oceanography. 2008. Vol. 38, no. 10. P. 2121–2144. <https://doi.org/doi:10.1175/2008JPO3883.1>
4. On radar imaging of current features: 2. Mesoscale eddy and current front detection / J. A. Johannessen [et al.] // Journal of Geophysical Research. 2005. Vol. 110, iss. C7. C07017. <https://doi.org/10.1029/2004JC002802>
5. On radar imaging of current features. 1: Model and comparison with observations / V. Kudryavtsev [et al.] // Journal of Geophysical Research. 2005. Vol. 110, iss. C7. C07016. <https://doi.org/10.1029/2004JC002505>
6. Yurovsky Y. Y., Malinovsky V. V. Radar backscattering from breaking wind waves: field observation and modelling // International Journal of Remote Sensing. 2012. Vol. 33, iss. 8. P. 2462–2481. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.614966>
7. Churyumov A. N., Kravtsov Yu. A. Microwave backscatter from mesoscale breaking waves on the sea surface // Waves in Random Media. 2000. Vol. 10, iss. 1. P. 1–15. <https://doi.org/10.1088/0959-7174/10/1/301>
8. Бондур В. Г., Шарков Е. А. Статистические характеристики элементов линейной геометрии пенных структур на поверхности моря по данным оптического зондирования // Исследование Земли из космоса. 1986. № 4. С. 21–31.
9. Миронов А. С., Дулов В. А. Статистические характеристики событий и диссипация энергии при обрушении ветровых волн // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2008. № 16. С. 97–115.
10. Wave breaking in developing and mature seas / J. Gemmrich [et al.] // Journal of Geophysical Research. 2013. Vol. 118, iss. 9. P. 4542–4552. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20334>
11. Gemmrich J. R., Banner M. L., Garrett C. Spectrally Resolved Energy Dissipation Rate and Momentum Flux of Breaking Waves // Journal of Physical Oceanography. 2008. Vol. 8, no. 6. P. 1296–1312. <https://doi.org/10.1175/2007JPO3762.1>

12. *Mironov A. S., Dulov V. A.* Detection of wave breaking using sea surface video records // Measurement Science and Technology. 2008. Vol. 19, no. 1. 015405. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/1/015405>
13. Bulk Parameterization of Air-Sea Fluxes: Updates and Verification for the COARE Algorithm / C. W. Fairall [et al.] // Journal of Climate. 2003. Vol. 16. P. 571–591. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<0571:BPOASF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<0571:BPOASF>2.0.CO;2)
14. *Phillips O. M.* Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves // Journal of Fluid Mechanics. 1985. Vol. 156. C. 505–531. <https://doi.org/10.1017/S0022112085002221>
15. *Hanson J. L., Phillips O. M.* Wind Sea Growth and Dissipation in the Open Ocean // Journal of Physical Oceanography. 1999. Vol. 29, no. 8. P. 1633–1648.
16. *Sutherland P., Melville W. K.* Field measurements and scaling of ocean surface wave-breaking statistics // Geophysical Research Letters. 2013. Vol. 40, iss. 12. P. 3074–3079. <https://doi.org/10.1002/grl.50584>
17. *Kleiss J. M., Melville W. K.* Observations of Wave Breaking Kinematics in Fetch-Limited Seas // Journal of Physical Oceanography. 2010. Vol. 40, no. 12. P. 2575–2604. <https://doi.org/10.1175/2010JPO4383.1>
18. *Duncan J. H.* An experimental investigation of breaking waves produced by a towed hydrofoil // Proceedings of the Royal Society A. 1981. Vol. 377, iss. 1770. P. 331–348. <https://doi.org/10.1098/rspa.1981.0127>
19. *Makin V. K., Kudryavtsev V. N.* Coupled sea surface-atmosphere model 1. Wind over waves coupling // Journal of Geophysical Research. 1999. Vol. 104, no. C4. P. 7613–7623.
20. *Donelan M. A., Hamilton J., Hui W. H.* Directional spectra of wind-generated ocean waves // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 1985. Vol. 315, iss. 1534. P. 509–562. <https://doi.org/10.1098/rsta.1985.0054>
21. *Romero L., Melville W. K., Kleiss J. M.* Spectral Energy Dissipation due to Surface Wave Breaking // Journal of Physical Oceanography. 2012. Vol. 42, no. 9. P. 1421–1444. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-11-072.1>

Об авторах:

Кориненко Александр Евгеньевич, научный сотрудник, отдел дистанционных методов исследования, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **Scopus Author ID: 23492523000**, korinenko.alex@gmail.com

Малиновский Владимир Васильевич, старший научный сотрудник, отдел дистанционных методов исследования, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **Scopus Author ID: 23012976200**, dvs-ltd@mail.ru

Кудрявцев Владимир Николаевич, ведущий научный сотрудник, отдел дистанционных методов исследования, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук; исполнительный директор лаборатории спутниковой океанографии, Российский государственный гидрометеорологический университет (192007, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79), **Scopus Author ID: 7102703183**, kudr@rshu.ru