

**Статистические характеристики обрушений
и их связь с диссипацией энергии ветровых волн
по данным натуральных измерений**

**А. Е. Кориненко^{1,*}, В. В. Малиновский¹, В. Н. Кудрявцев^{1,2},
В. А. Дулов¹**

¹ *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

² *Российский государственный гидрометеорологический университет,*

Санкт-Петербург, Россия

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

Поступила в редакцию 21.05.2020 г.

Цель. Цель работы – исследовать геометрическое подобие обрушений ветровых волн в натуральных условиях, оценить константу Дункана, связывающую диссипацию волновой энергии, обусловленную обрушениями, с распределением длин гребней обрушивающейся волны.

Методы и результаты. Натурные исследования характеристик обрушений проводились со стационарной океанографической платформы, расположенной в Голубом заливе в районе пгт. Кацивели. Геометрические размеры активной фазы обрушений, скоростей и направлений их движения определялись по видеозаписям морской поверхности. Одновременно с видеозаписями регистрировалась метеорологическая информация, а также измерялись характеристики поверхностного волнения. Всего было получено 55 видеозаписей морской поверхности длительностью от 40 до 60 мин каждая. Измерения проводились в широком диапазоне метеорологических условий и параметров волнения (скорость ветра варьировалась от 9,2 до 21,4 м/с, возраст волн менялся от 0,2 до 1,2).

Выводы. Установлено, что плотности вероятности отношения максимальной длины обрушения к длине обрушивающейся волны, полученные в различных ветровых и волновых условиях, подобны. Средняя величина этого отношения равна 0,1. Построены распределения суммарной длины обрушений в интервалах скоростей движения на единице поверхности. Показано, что экспериментальные оценки зависимости этих распределений от скорости ветра и скорости движения обрушения соответствуют теоретическим предсказаниям О. М. Филлипса (1985 г.), при этом зависимость от возраста волн не обнаружено. Получены количественные характеристики связи распределения длин обрушений с диссипацией энергии. Оценена константа Дункана, которая оказалась равной $1,8 \cdot 10^{-3}$ и не зависящей от параметров состояния волнения и атмосферы.

Ключевые слова: обрушения ветровых волн, диссипация энергии, натурные исследования, спектр ветровых волн.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме 0827-2019-0003 «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 Российского научного фонда № 17-77-30019.

Для цитирования: Статистические характеристики обрушений и их связь с диссипацией энергии ветровых волн по данным натуральных измерений / А. Е. Кориненко [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 5. С. 514–531. doi:10.22449/0233-7584-2020-5-514-531

Statistical Characteristics of Wave Breakings and their Relation with the Wind Waves' Energy Dissipation Based on the Field Measurements

A. E. Korinenko^{1,*}, V. V. Malinovsky¹, V. N. Kudryavtsev^{1,2},
V. A. Dulov¹

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

² Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia

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

Purpose. The work is aimed at studying geometric similarity of wind wave breakings in natural conditions, estimating the Duncan constant which connects the wave energy dissipation conditioned by wave breakings, with distribution of the lengths of a breaking wave crests $\Lambda(\epsilon)$.

Methods and Results. The field measurements of the wave breaking characteristics were carried out at the stationary oceanographic platform located in the Golubaya Bay near the village Katsiveli. Geometric dimensions of the wave breakings' active phase, velocities and directions of their movement were determined from the video records of the sea surface; simultaneously, the meteorological information was recorded and the surface waves' characteristics were measured. Altogether 55 video records of the sea surface were obtained; duration of each of them was 40–60 minutes. The measurements were performed in a wide range of meteorological conditions and wave parameters (wind speed varied from 9.2 to 21.4 m/s).

Conclusions. It is found that the probability densities of the ratio between the maximum length of a breaking and the length of a breaking wave, obtained in various wind and wave conditions are similar. The average value of this ratio is 0.1. Distributions of the wave breakings' total length are constructed in the movement velocity intervals on a surface unit. It is shown that the experimental estimates of dependence of these distributions upon the wind speed and the wave breaking movement velocity are consistent with the theoretical predictions of O.M. Phillips (1985); at that no dependence on the waves' age was found. Quantitative characteristics of the relation between the wave lengths' distribution and the energy dissipation are obtained. The Duncan constant was estimated; it turned out to be equal to $1.8 \cdot 10^{-3}$ and independent upon the waves' and atmosphere parameters.

Keywords: wind wave breaking, energy dissipation, *in situ* studies, wind waves' spectrum.

Acknowledgments: the investigation was carried out within the framework of the state task on theme No. 0827-2019-0003 "Fundamental studies of oceanological processes conditioning state and evolution of environment affected by the natural and anthropogenic factors, based on the observational and modeling methods". V.N. Kudryavtsev appreciates support of the Russian Scientific Foundation grant No. 17-77-30019.

For citation: Korinenko, A.E., Malinovsky, V.V., Kudryavtsev, V. N. and Dulov, V.A., 2020. Statistical Characteristics of Wave Breakings and their Relation with the Wind Waves' Energy Dissipation Based on the Field Measurements. *Physical Oceanography*, [e-journal] 27(5), pp. 472-488. doi:10.22449/1573-160X-2020-5-472-488

Введение

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

Для определения статистических характеристик обрушений ветровых волн, как правило, используются видеозаписи морской поверхности, полученные с самолетов, кораблей или стационарных платформ. На основе информации, определяемой по видеозаписям (размеры и скорость обрушений) [4–8], можно построить распределение $\Lambda(\epsilon)$, введенное О. М. Филлипсом [9].

Согласно [9], величина $\Lambda(c)dc$ представляет суммарную длину обрушивающихся гребней, движущихся со скоростями в интервале $(c, c + dc)$, на единице поверхности. Предложенная функция $\Lambda(c)$ позволяет описывать как кинематические, так и динамические свойства обрушений. Например, интеграл $\int \Lambda(c)dc$ представляет собой полную длину обрушивающихся гребней на единице площади морской поверхности. В единицу времени доля морской поверхности, переносимая при обрушении через данную точку пространства, определяется первым моментом от $\Lambda(c)$. Моменты более высокого порядка описывают динамические свойства обрушений. Потери энергии, обусловленные обрушениями, связаны с $\Lambda(c)$ выражением [9, с. 527]:

$$S_{\text{diss}}(c) = bg^{-1}c^5\Lambda(c), \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения; b – константа/параметр пропорциональности (так называемая константа Дункана [9]). В предположении о подобии обрушений О. М. Филлипс считал b константой [9]. В работах [5, 10, 11] b также принималась константой. Однако в лабораторных исследованиях [12–14] было показано, что b не является константой, а зависит от характеристик волнения, в частности крутизны волн. Согласно этим измерениям, значение константы Дункана меняется более чем на три порядка и лежит в пределах от $8 \cdot 10^{-5}$ до $9 \cdot 10^{-2}$. На основе результатов [14] и с использованием полученной в [6] функции $\Lambda(c)$ в работе [15] была построена полуэмпирическая модель диссипации волновой энергии и обнаружена зависимость b от волнового числа обрушающихся волн $b(k)$ через спектр насыщения волн $B(k)$.

Сложность процесса обрушения не позволяет надежно оценить спектральную зависимость $b(k)$ в натуральных условиях. Как правило, принимается, что b является функцией только характеристик атмосферы и интегральных параметров волнения [16–18] и не зависит от локальных масштабов обрушений.

Анализ натуральных измерений $\Lambda(c)$ и скорости диссипации турбулентной энергии в условиях молодого волнения представлен в работе [17]. Коэффициент b рассчитывался сопоставлением пятого момента $\Lambda(c)$ с измеренной скоростью диссипации волновой энергии. По результатам расчета не выявлена явная связь b с параметрами волнения (среднеквадратичным уклоном, возрастом волн и максимальной крутизной). Среднее значение b оказалось равным $3,2 \cdot 10^{-3}$.

В то же время анализ доступных натуральных данных показал линейную зависимость b от возраста волн и максимальной крутизны волны [18]. Как отмечено в работе [18, с. 2055], если недоступны данные по параметрам волнения, необходимо использовать среднее значение b , равное $2,1 \cdot 10^{-3}$.

В настоящее время вопрос о значении параметра b и его спектральной зависимости остается открытым. Поэтому важно уточнить коэффициент пропорциональности b и определить его возможные изменения в различных гидрометеорологических условиях.

Целью настоящей работы является исследование кинематических характеристик и геометрического подобия обрушений ветровых волн и оценка константы Дункана b на основе данных, полученных в натуральных условиях.

Эксперимент

Натурные исследования проводились в осенний период 2013, 2015, 2018 и 2019 гг. 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 $44^{\circ} 23' 38''$ с. ш., $33^{\circ} 59' 09''$ в. д. Глубина в районе расположения платформы составляет около 30 м.

Метеорологические наблюдения

Сбор метеорологической информации осуществлялся многофункциональным комплексом *Davis Vantage Pro2 6152EU*, расположенном на высоте 23 м над уровнем моря на мачте океанографической платформы. В комплект метеостанции входят измеритель скорости и направления ветра, датчики атмосферного давления, влажности, температуры воздуха и воды (на глубине 3 м). Измеренная скорость ветра пересчитывалась в эффективную нейтрально стратифицированную скорость ветра U на высоте 10 м по методике из работы [19]. В соответствии со стандартной методикой [20] была рассчитана динамическая скорость в воздухе u_* .

Волновые наблюдения

Характеристики поверхностного волнения регистрировались с помощью решетки из шести струнных волнографов, расположенных в центре и вершинах правильного пятиугольника с радиусом описанной окружности 0,25 м. Расстояние от решетки волнографов до ближайшего элемента платформы превышало 10 м. Частотно-угловые спектры возвышений морской поверхности $S(f, \phi)$ рассчитывались по 20-минутным интервалам методом максимальной энтропии. Частотный спектр $S(f)$ определялся интегрированием $S(f, \phi)$ по углу ϕ .

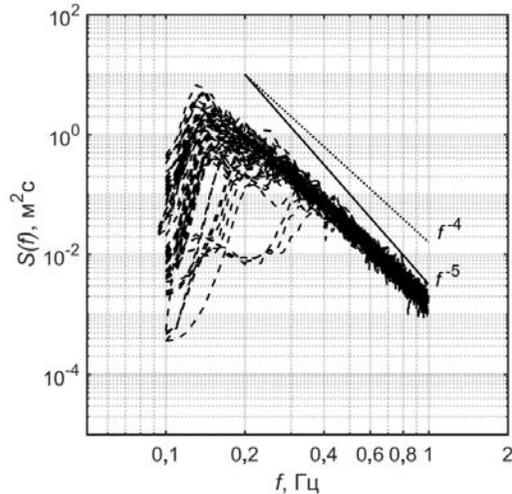
На рис. 1 представлены $S(f)$, измеренные за время проведения экспериментов. Как известно, форма спектра для частот, превышающих значение частоты спектрального пика, имеет вид f^{-n} . При $n = 5$ форма спектра соответствует результатам работы [21], а при $n = 4$ – теории равновесного интервала [9]. Как видно из графика, наклон полученных нами спектров для частот, превышающих значение частоты спектрального пика, близок к закону f^{-4} .

Натурные измерения, как правило, проводятся в условиях смешанного волнения, когда наряду с ветровыми волнами присутствуют волны зыби. При этом зыбь может распространяться под любым углом относительно направления ветровых волн.

Для разделения частотного спектра волнения на волны зыби и волны, генерируемые ветром, использовался подход [22]. Метод основан на концепции равновесного интервала ветровых волн [9]. Согласно работе [22], область спектра, спектральный уровень которой лежит выше равновесного спектра [9], определяемого выражением

$$F(f) = 2\pi a u_{*g} (2\pi f)^{-4}, \quad (2)$$

где $a = 0,06$, относится к интервалу ветровых волн. Если спектральный уровень лежит ниже кривой (2), то наблюдаемые волны не относятся к классу ветровых волн, а являются зыбью.



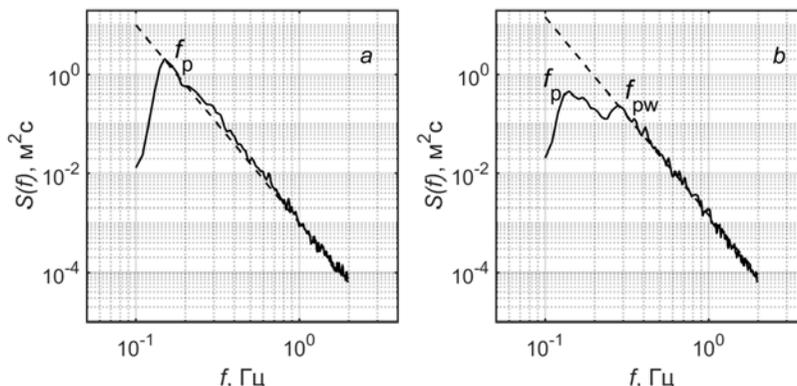
Р и с. 1. Частотные спектры возвышений морской поверхности (сплошной линией демонстрируется зависимость f^{-5} , точками – f^{-4})

F i g. 1. Frequency spectra of the sea surface elevations (solid line shows dependence f^{-5} , dots – dependence f^{-4})

Данный подход иллюстрируется рис. 2, на котором в качестве примера представлены полученные в наших экспериментах частотные спектры поверхностных волн. Частотный спектр на рис. 2, *a* имеет один спектральный максимум на частоте $f_p = 0,15$ Гц, и, согласно работе [22], спектральный диапазон правее f_p относится к ветровому волнению. Иная ситуация представлена на рис. 2, *b*, где демонстрируется частотный спектр с двумя локальными максимумами $f_p = 0,14$ Гц и $f_{pw} = 0,28$ Гц. Спектральный диапазон, лежащий правее значения f_{pw} , относится к ветровому волнению. Локальный максимум f_{pw} будем называть частотой пика ветрового волнения. Область в окрестности спектрального пика на частоте $f_p = 0,14$ Гц относится к волнам зыби, поскольку спектральный уровень лежит ниже кривой (2). Отметим, что в случае ветрового волнения (рис. 2, *a*) значения частоты спектрального пика f_p и частоты пика ветрового волнения f_{pw} совпадают.

В результате проведенного анализа были определены значения частоты спектрального пика волн f_p , частоты пика ветрового волнения f_{pw} , направления распространения ветрового волнения ϕ_{pw} и волн зыби ϕ_p , высоты зна-

чительных волн H_s ($H_s = 4\sqrt{\sigma^2}$, где σ^2 – дисперсия возвышений морской поверхности), а также возраст ветровых волн ($\alpha = c_{pw} / U$, где c_{pw} – фазовая скорость волн на частоте пика ветровых волн).



Р и с. 2. Частотные спектры возвышений морской поверхности: *a* – ветровое волнение, $u_* = 0,55$ м/с; *b* – смешанное волнение с присутствием волн зыби, $u_* = 0,71$ м/с (штриховой линией показана зависимость (2))

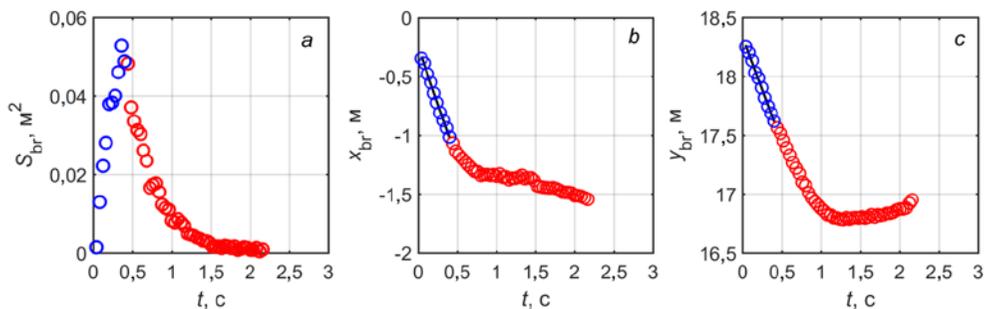
F i g. 2. Frequency spectra of the sea surface elevations: *a* – wind waves, $u_* = 0.55$ m/s; *b* – mixed waves with the swell waves present, $u_* = 0.71$ m/s (dash line shows dependence (2))

Обрушения

Геометрические характеристики обрушений ветровых волн определялись по видеозаписям морской поверхности, выполненным с помощью цифровой видеокамеры. Камера располагалась на высоте 11,4 м над уровнем моря, направление визирования составляло $30^\circ - 40^\circ$ к горизонту, в азимутальной плоскости $\sim 50^\circ - 60^\circ$ навстречу генеральному направлению ветровых волн. Объектив с углом обзора по горизонтали 54° и по вертикали 32° обеспечивал видеозапись площадки на морской поверхности в виде трапеции с длинами оснований 14–16 м и 29–48 м. Запись осуществлялась с частотой 25 кадров в секунду и разрешением 1920×1080 пикселей.

Обрушения на фоне морской поверхности выделялись с использованием алгоритмов [8]. При известной геометрии съемки кадр изображения привязывался к координатам на горизонтальной плоскости, расположенной на среднем уровне моря. Выделялась лишь активная фаза обрушений (барашки), а пятна растекшейся пены, оставшейся после прохождения обрушения, автоматически отфильтровывались. Результатом обработки является база данных о всех барашках, попавших в поле зрения камеры, их характеристиках, включая площадь, координаты, скорость c_{br} и направление распространения в каждый момент времени [8].

На рис. 3 представлен пример временной эволюции площади единичного обрушения и положения его геометрического центра.



Р и с. 3. Временная эволюция геометрических характеристик обрушения: *a* – площади обрушения; *b, c* – *x*-компоненты и *y*-компоненты геометрического центра обрушения соответственно. Синим цветом отмечены параметры обрушений, относящиеся к активной фазе, красным – к растекшейся пене. Начало системы координат на рис. 3, *b, c* соответствует точке пересечения оптической оси фотообъектива с морской поверхностью

F i g. 3. Temporal evolution of wave breaking geometrical characteristics: *a* – wave breaking squares; *b, c* – *x*-components and *y*-components of the wave breaking geometrical center, respectively. Blue color denotes the wave breaking parameters relating to the active phase, red color – to the foam spread. Point of the coordinates' origin in Fig. 3, *b, c* corresponds to the point of intersection of the photolens optical axis and the sea surface

Как видно, процесс обрушения проходит две стадии: стремительный рост площади обрушения, характеризующийся активной генерацией турбулентности (синие кружки) и экспоненциальное уменьшение площади (красные кружки). Подобная временная эволюция площади пенной структуры обрушения совпадает с результатами работ [7, 23].

Важным выводом представленных на рис. 3, *b, c* данных является то, что обрушение (синие кружки) движется с постоянной скоростью. Данный результат отличается от полученного в работах [5, 7], где обрушение движется равнозамедленно. По результатам работ [5, 7] скорость обрушения уменьшается примерно до 0,7 от начальной скорости обрушения.

Используемые в настоящей статье значения *c* определялись следующим образом. По значениям $x_{br}(t)$, $y_{br}(t)$ методом минимального квадрата ошибки рассчитывались компоненты вектора скорости c_{br}^x , c_{br}^y . Черными линиями на рис. 3, *b, c* показаны линейные аппроксимации координат геометрического центра обрушения, позволяющие определить компоненты вектора скорости: $x_{br}(t) = c_{br}^x \cdot t + x_{br}^0$, $y_{br}(t) = c_{br}^y \cdot t + y_{br}^0$, где x_{br}^0 , y_{br}^0 – константы.

В результате определялись модуль $c_{br} = \sqrt{(c_{br}^x)^2 + (c_{br}^y)^2}$ и фаза $\theta = \arctg(c_{br}^y / c_{br}^x)$ скорости обрушения, соответствующая направлению его движения.

Согласно работе [8], скорость обрушения c_{br} равна фазовой скорости обрушивающейся волны *c*. Однако, в соответствии с экспериментальными работами [13, 24, 25], скорость обрушения пропорциональна, но меньше фазовой скорости: $c_{br} = \delta c$, где δ лежит в пределах 0,7–0,95. В данной работе для анализа данных измерений обрушений мы будем использовать $\delta = 1$, тогда

c_{br} связана с частотой волны f дисперсионным соотношением для гравитационных волн: $c_{br} = c = g / (2\pi f)$.

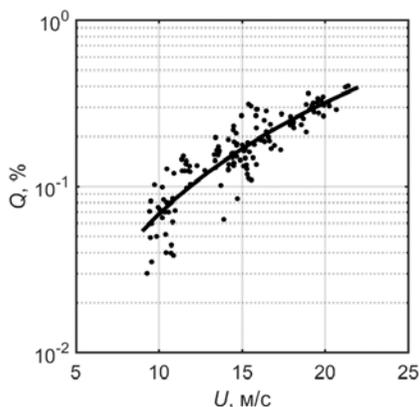
Всего было получено 55 видеозаписей морской поверхности длительно-стью от 40 до 60 мин каждая. Измерения проводились в широком диапазоне метеорологических условий и параметров волнения (скорость ветра варьировалась от 9,2 до 21,4 м/с, возраст волн менялся от 0,2 до 1,2).

Результаты

Зависимость доли морской поверхности, покрытой пеной, от скорости ветра

В литературе приводятся многочисленные измерения доли морской поверхности Q , покрытой пеной обрушивающихся волн (см., например, [6, 8] и цитируемую там литературу). Традиционно изменение Q в зависимости от скорости ветра описывается степенным законом, где показатель степени принимает значения $\sim 2,5-5$ (см., например, [6]).

На рис. 4 представлена полученная по нашим измерениям зависимость доли морской поверхности, покрытой обрушениями в активной фазе, от скорости ветра. Каждое значение на рис. 4 является результатом осреднения Q в интервале времени длительно-стью 20 мин, сплошной линией показана аппроксимация зависимостью $Q = 3,5 \cdot 10^{-4} U^{2,3}$, где коэффициенты рассчитаны методом наименьших квадратов ошибки. Представленная на рис. 4 ветровая зависимость Q согласуется с результатами более ранних исследований (см., например, [6, 8]).



Р и с. 4. Ветровая зависимость доли морской поверхности, покрытой обрушениями в активной фазе

F i g. 4. Wind dependence of the sea surface part covered with breakings in the active phase

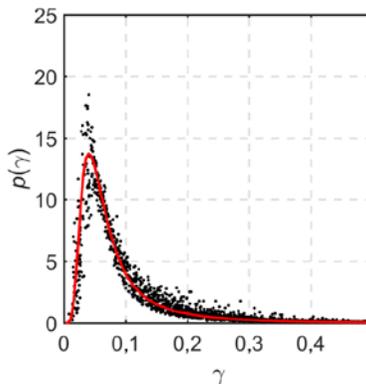
Связь геометрических размеров обрушений с параметрами обрушивающейся волны

Лабораторные исследования [26] показали, что обрушения геометрически подобны и размеры обрушений (в частности, длина) пропорциональны длине обрушивающейся волны. Ниже приводятся натурные данные об отно-

шении $\gamma = L/\lambda$ при различных гидрометеорологических условиях, где L – длина обрушивающегося гребня; $\lambda = 2\pi g^{-1}c^2$ – длина обрушивающейся волны.

Для каждой видеозаписи по полученным массивам γ рассчитывались гистограммы $H(\gamma)$ и строилось распределение $p(\gamma) = \sum_{i=1}^N H(\gamma) / (N\Delta\gamma)$, где N и $\Delta\gamma$ – число отсчетов и интервал гистограммы соответственно. Таким образом, $p(\gamma)$ удовлетворяет условиям нормировки в пределах интегрирования от минимального до максимально возможного значения аргумента $\int p(\gamma)d\gamma = 1$ и может рассматриваться как плотность вероятности случайной величины γ .

На рис. 5 символами «•» показаны $p(\gamma)$ для каждой из 55 видеозаписей, выполненных при скоростях ветра от 9,2 до 21,4 м/с и значениях α от 0,2 до 1,2. Как следует из рис. 5, значения $p(\gamma)$, полученные в широком диапазоне скоростей ветра и развития волнения, имеют относительно небольшой разброс. Максимумы всех распределений локализируются в окрестности значения $\gamma = 0,04$. Среднее значение $\bar{\gamma} = \int \gamma p(\gamma)d\gamma$ составляет $\bar{\gamma} = 0,1 \pm 0,03$.



Р и с. 5. Плотности вероятности безразмерных величин γ (сплошной красной линией показан результат осреднения $p(\gamma)$ всех распределений $p(\gamma)$ с учетом условия нормировки)

F i g. 5. Probability densities of the dimensionless values γ (solid red line shows the result of averaging $p(\gamma)$ of all the distributions $p(\gamma)$ with the standartization condition taken into account)

Учитывая, что полученные при различных U и возрастах волн распределения $p(\gamma)$ подобны и основная часть значений γ с вероятностью 0,8 лежит в диапазоне $0,04 \leq \gamma \leq 0,2$, можно говорить о геометрическом подобии обрушений в условиях открытого моря.

В работе [5] приводятся распределения $P_G(\gamma)$, полученные при скоростях ветра от 11,8 до 13 м/с как при развивающемся, так и при развитом волнении. Основная группа значений γ в работе [5] меньше 0,4, максимумы $P_G(\gamma)$ лежат в окрестности значения $\gamma \approx 0,05$, а распределения правее максимумов резко спадают. Отметим, что форма распределения $P_G(\gamma)$ близка к полученной в нашей работе.

Распределение длин обрушений

В качестве статистической меры обрушений волн О. М. Филлипс [9] предложил использовать распределение длин гребней обрушивающейся волны $\Lambda(c)$. Величина $\Lambda(c)dc$ представляет суммарную длину обрушивающихся гребней на единице поверхности, движущихся в интервале скоростей $(c, c + dc)$. В равновесном спектральном интервале одномерное распределение $\Lambda(c)$ имеет вид [9]

$$\Lambda(c) \sim u_*^3 c^{-6}. \quad (3)$$

Одномерное распределение $\Lambda(c)$ по данным наших измерений оценивалось следующим образом:

$$\Lambda(c) = \frac{1}{S \cdot dc \cdot N_{\text{fr}}} \sum_k L_k |c_k \in [c, c + dc],$$

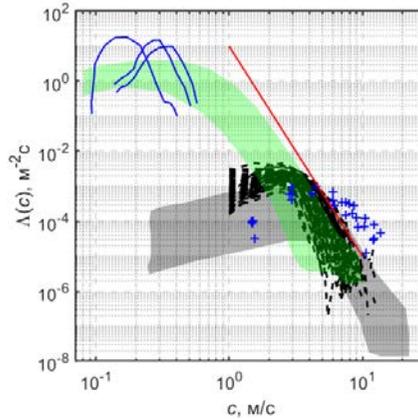
где S – площадь обзора на морской поверхности; dc – интервал скорости, в нашем случае равный 0,5 м/с; N_{fr} – количество видео кадров; L_k – длина k -го гребня обрушивающейся волны, движущейся со скоростью c_k в пределах интервала $c_k \in (c, c + dc)$. Длительность видеозаписей, по которым рассчитывались $\Lambda(c)$, варьировалась от 40 до 60 мин.

Измеренные в данной работе и представленные в литературе $\Lambda(c)$ показаны на рис. 6. Особенностью демонстрируемых данных является наличие максимума $\Lambda(c)$. Для оптических методов регистрации обрушений максимальное значение $\Lambda(c)$ наблюдается для скоростей движения обрушений 2–3 м/с. При использовании инфракрасной камеры спектральный максимум $\Lambda(c)$ наблюдается при скоростях движения обрушений, равных 0,8 м/с и менее. Такая особенность $\Lambda(c)$ подробно объясняется в работе [28] и связана с тем, что при использовании оптической аппаратуры (региструющей барашки) обрушения коротких волн (без захвата воздуха, формирующего барашки), дающих основной вклад в число обрушений на единицу поверхности, при обработке видеозаписей не идентифицируются. Таким образом, построенные нами графики $\Lambda(c)$ недостаточно статистически обеспечены при $c < \sim 2,5$ м/с, соответственно, далее будем рассматривать характеристики тех обрушений, скорость которых превышает 2,5 м/с. Как видно из рисунка, для скоростей барашков, превышающих скорость, соответствующую максимуму $\Lambda(c)$, функциональная зависимость $\Lambda(c)$ от c хорошо соответствует закону (3). Отметим, что разброс значений $\Lambda(c)$ при фиксированной скорости обрушения может достигать двух порядков.

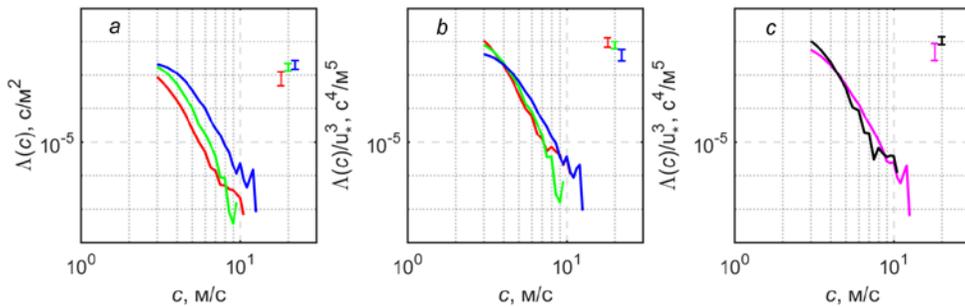
Осредненные в трех диапазонах динамической скорости в воздухе распределения $\Lambda(c)$ представлены на рис. 7, а. При фиксированной скорости обрушения значение $\Lambda(c)$ увеличивается более чем на порядок с ростом u_* . На рис. 7, б, в демонстрируются $\Lambda(c)$, нормированные на u_*^3 и осредненные по интервалам динамической скорости (рис. 7, б) и по интервалам возраста

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 36 № 5 2020 523

волн (рис. 7, *c*). Данные на рис. 7, *b* после нормировки на u_*^3 группируются в универсальную кривую, не зависящую от u_* . Подобное поведение демонстрируют распределения $\Lambda(c)/u_*^3$, осредненные по интервалам возрастов волн (рис. 7, *c*). Этот факт указывает на отсутствие зависимости $\Lambda(c)/u_*^3$ от возраста волн в имеющейся у нас базе данных.



Р и с. 6. Измеренная $\Lambda(c)$ (черные штриховые линии) в сравнении с данными из работы [5] (синие крестики), лабораторными измерениями из работы [27] (синие линии), данными оптических измерений из работы [6] (серая область), измерениями инфракрасной камерой из работы [28] (зеленая область). Красной прямой линией показана зависимость $\sim c^{-6}$
F i g. 6. Measured $\Lambda(c)$ (black dash lines) as compared to the data from [5] (blue crosses), laboratory measurements from [27] (blue lines), optical measurements data from [6] (grey area) and infra-red camera measurements from [28] (green area). Red straight line denotes dependence $\sim c^{-6}$



Р и с. 7. Лямбда распределения (*a*); зависимость $\Lambda(c)/u_*^3$, усредненная в различных диапазонах u_* (*b*) и α (*c*) (красная линия – данные, усредненные в диапазоне значений u_* от 0,34 до 0,52 м/с; зеленая линия – от 0,53 до 0,67 м/с; синяя линия – от 0,68 до 1,00 м/с; черная линия – данные, усредненные в диапазоне α от 0,6 до 1,1, розовая линия – от 0,2 до 0,55; вертикальные отрезки – среднеквадратичные отклонения в соответствующих диапазонах u_* и α)

F i g. 7. Lambda of distribution (*a*); dependence $\Lambda(c)/u_*^3$ averaged in different ranges u_* (*b*) and α (*c*) (red line – the data averaged in the range of values u_* from 0.34 to 0.52 m/s; green line – from 0.53 to 0.67 m/s; blue line – from 0.68 to 1.00 m/s; black line – the data averaged in the range of values α from 0.6 to 1.1, pink line – from 0.2 to 0.55; vertical sections – mean square deviations in the corresponding ranges u_* and α)

Таким образом, анализ данных показывает, что $\Lambda(c)$ имеют функциональную зависимость от u_* и c , предсказываемую формулой (3), при этом зависимость $\Lambda(c)$ от возраста волн явно не проявляется.

Связь длины обрушений с диссипацией энергии

Теория О. М. Филлипса [9] связывает кинематические характеристики барашков $\Lambda(c)$ со средней скоростью диссипации энергии $S_{\text{diss}}(c)$, обусловленной обрушениями, на единице поверхности с помощью формулы (1). Согласно работам [12–14], значение константы Дункана b лежит в широких пределах от $8 \cdot 10^{-5}$ до $9 \cdot 10^{-2}$. В настоящее время вопрос о значении b и его спектральной зависимости остается открытым. Если, следуя работам [5, 10, 11], предположить, что b – постоянная величина, то, согласно выражению (1),

$$b = \frac{\int S_{\text{diss}}(c)dc}{g^{-1} \int c^5 \Lambda(c)dc}. \quad (4)$$

Оценка коэффициента b по формуле (4) проводилась в рамках концепции равновесного спектрального интервала [9], которая предполагает локальный баланс энергии между притоком энергии от ветра и диссипации, вызываемой обрушениями. Согласно работе [9], для развитого ветрового волнения равновесный интервал спектра лежит в пределах интервала $k \in (2k_p, gu_*^{-2})$, где k_p – волновое число спектрального пика. В данной работе нижнюю границу равновесного интервала определим как $2k_{\text{pw}}$, где k_{pw} – волновое число пика ветрового волнения. Верхняя граница выбрана равной $k_m = 1,6$ рад/м, что соответствует минимальной скорости обрушения $c_m = 2,5$ м/с, надежно регистрируемой оптической видеокамерой.

Баланс притока энергии от ветра и диссипации в пределах равновесного интервала записывается в виде

$$\int_{2k_{\text{pw}}}^{k_m} S_{\text{diss}}(\mathbf{k})d\mathbf{k} = \int_{2k_{\text{pw}}}^{k_m} S_{\text{in}}(\mathbf{k})d\mathbf{k}. \quad (5)$$

Корректность выражения (5) подтверждается результатами работы [29], где показано, что в равновесном интервале спектра наблюдается баланс суммарного притока энергии от ветра и суммарной диссипации волновой энергии.

Поток энергии от ветра равен

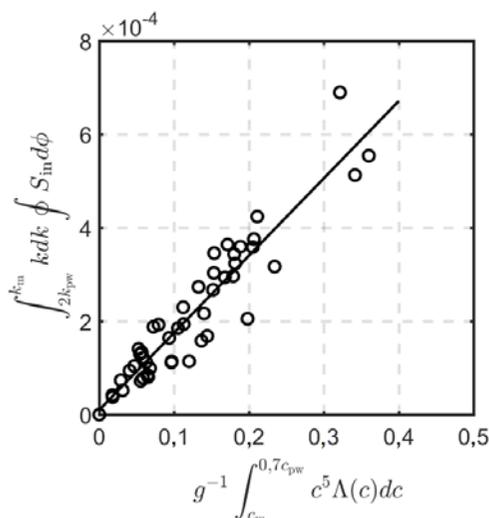
$$S_{\text{in}}(\mathbf{k}) = g\omega\beta(k, \phi)F(\mathbf{k}), \quad (6)$$

где $\beta(k, \phi) = 0,03(u_* / c)^2 \cos^2 \phi$ – коэффициент взаимодействия ветра и волн [30] с угловой зависимостью в виде, предложенном в работе [31]; $F(\mathbf{k})$ – спектр возвышений морской поверхности. Пространственно-угловой спектр $F(k, \phi)$ рассчитывался по измеренному частотно-угловому спектру по формуле $F(k, \phi)k = S(\omega, \phi) \frac{d\omega}{dk}$.

Таким образом, выражение (4) с учетом (5) запишется как

$$b = \frac{\int_{2k_{pw}}^{k_m} kdk \oint S_{in}(k)d\phi}{g^{-1} \int_{c_m}^{0,7c_{pw}} c^5 \Lambda(c)dc}. \quad (7)$$

На рис. 8 сопоставлены между собой интегральная скорость диссипации (знаменатель в выражении (7)) и интегральный приток энергии от ветра (числитель в (7)). Как видно, существует высокая корреляция двух независимо полученных массивов данных. Из данных, показанных на рис. 8, следуют МНК-оценки коэффициента $b = 1,8 \cdot 10^{-3} \pm 4,5 \cdot 10^{-4}$.



Р и с. 8. Скорость диссипации волновой энергии в сравнении с притоком энергии от ветра (сплошная линия – аппроксимация данных линейной зависимостью)

Fig. 8. Wave energy dissipation velocity as compared to the wind energy inflow (solid line shows data approximation by linear dependence)

Обсуждение результатов

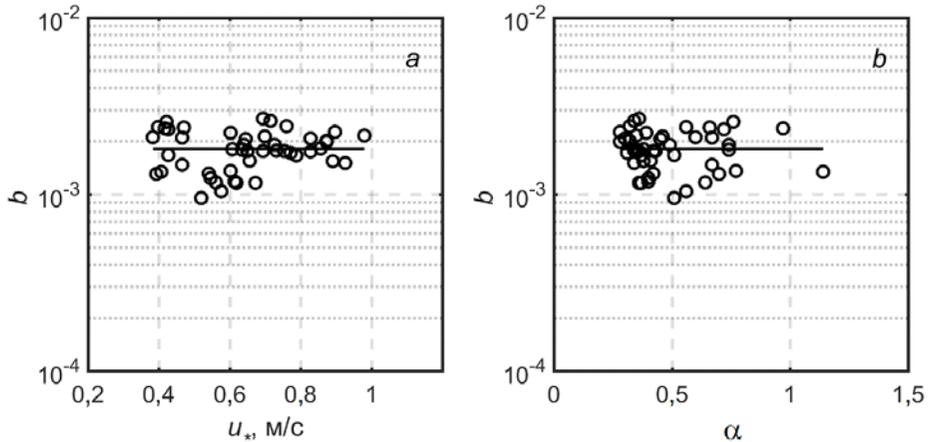
Используя наши натурные данные о скорости ветра, спектрах ветровых волн и характеристиках обрушений, сопоставим рассчитанные по формуле (7) значения b с параметрами волнения и атмосферы.

На рис. 9 представлена зависимость b от динамической скорости в воздухе и возраста волн. Как видно из рис. 9, явной зависимости коэффициента b от u_* и α , по нашим данным, не наблюдается.

Анализ доступных в литературе натурных оценок значения коэффициента b и объяснение отличия между ними представлены в работе [18]. Согласно [18], b линейно зависит от значимой крутизны волны $H_S k_p / 2$ и возраста волн, рассчитанного в терминах u_* : $\alpha_* = c_p / u_*$.

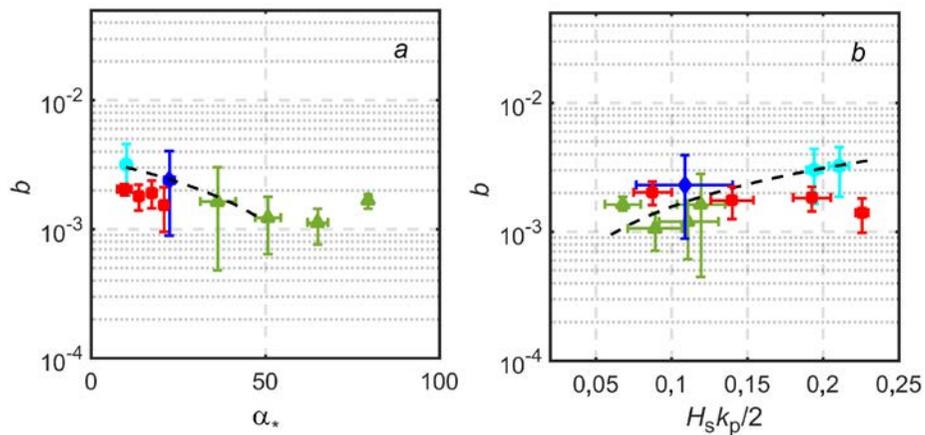
На рис. 10 представлены зависимости от параметров волнения коэффициента b , рассчитанного по выражению (7), а также данные, заимствованные из работы [18, с. 2056–2057] (см. рис. 2 и 3, а). Согласно модели из работы

[18], с увеличением возраста волн коэффициент b уменьшается, а с ростом $H_S k_p / 2$ – увеличивается. В целом, как следует из рис. 10, наши значения b соответствуют по порядку величины значениям, представленным в работах [17, 18]. В то же время, согласно нашим измерениям, явной статистической зависимости константы Дункана от u_* , α , α_* , $H_S k_p / 2$ не обнаружено.



Р и с. 9. Зависимость константы Дункана от u_* (a) и α (b) (прямая линия – $b = 1,8 \cdot 10^{-3}$)

F i g. 9. Dependence of the Duncan constant on u_* (a) and α (b) (straight line – $b = 1,8 \cdot 10^{-3}$)



Р и с. 10. Зависимость коэффициента b от возраста волн (a); значимой крутизны волн (b) (■ – по нашим данным; ●, ▲, ◆ – по данным из работы (см. рис. 2 и 3, a [18, с. 2056–2057]); штриховая линия – расчеты по модели из работы [18]; вертикальные и горизонтальные отрезки указывают среднеквадратичные отклонения)

F i g. 10. Dependence of the coefficient b on the waves' age (a); significant wave steepness (b) (■ – based on our data; ●, ▲, ◆ – based on the data from (see Fig. 2 and 3, a [18, p. 2056–2057]); dash line – model calculations from [18]; vertical and horizontal sections denote mean square deviations)

Применимость представленных выше результатов расчета b и $\bar{\gamma}$ проверим при сопоставлении некоторых характеристик обрушений, полученных при натуральных измерениях, с их модельными расчетами.

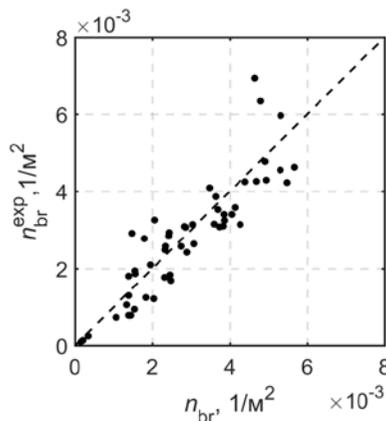
В работе [32] для оценки полученного в натуральных условиях числа обрушений на единице поверхности использовалась концепция равновесного интервала [9]. С учетом данного подхода функция $\Lambda(\mathbf{k})$ выражалась через коэффициент ветро-волнового взаимодействия $\beta(k, \phi)$ и спектр волн $F(\mathbf{k})$ как $\Lambda(\mathbf{k}) = b^{-1}k^3\beta(k, \phi)F(\mathbf{k})$. Таким образом, была построена модель для числа обрушений на единице поверхности $n_{br}(\mathbf{k}) = (2\pi\bar{\gamma})^{-1}k\Lambda(\mathbf{k})$:

$$n_{br}(\mathbf{k}) = (2\pi\bar{\gamma})^{-1}b^{-1}\beta(k, \phi)k^4F(\mathbf{k}). \quad (8)$$

Поскольку в работе [32] не производились оценки значений констант b и $\bar{\gamma}$, с результатами натуральных измерений сравнивался только вид модельной зависимости (8). Показано, что наклоны распределений скоростей обрушений (при $c > 2,5$ м/с), полученные при измерениях и в результате модельных расчетов, совпадают. Совпадают также показатели степени ветровой зависимости суммарного числа обрушений на единице площади.

Используя результаты настоящей работы (измеренный спектр волн, значения констант b и $\bar{\gamma}$), проведем количественное сопоставление суммарного числа обрушений волн в равновесном интервале спектра $n_{br}(2k_{pw}, k_m)$ с экспериментальными данными.

На рис. 11 приведено сопоставление модельных значений $n_{br}(2k_{pw}, k_m)$, рассчитанных по формуле (8), и значений $n_{br}^{exp}(2k_{pw}, k_m)$, полученных экспериментально. Пунктирная прямая линия имеет наклон, равный 1, т. е. соответствует равенству двух величин.



Р и с. 11. Сравнение модельных расчетов суммарного количества обрушений с данными, полученными в натуральных условиях (пунктирная линия соответствует равенству двух величин)

F i g. 11. Comparison of the simulated total quantity of wave breakings with the data obtained in the field conditions (dotted line corresponds to equality of two values)

Как следует из рис. 11, наблюдается неплохое соответствие между натурными и модельными значениями суммарного количества обрушений ветровых волн на единице площади.

Таким образом, рассчитанные значения константы Дункана $b = 1,8 \cdot 10^{-3}$ и $\bar{\gamma} = 0,1$ позволяют удовлетворительно описывать количественные характеристики обрушений модельными функциями.

Заключение

В работе представлены результаты натурных исследований геометрических и динамических характеристик обрушений ветровых волн. Эксперименты проводились со стационарной океанографической платформы, расположенной в Голубом заливе в районе пгт. Качивели (Южный берег Крыма) в диапазоне скоростей ветра от 9,2 до 21,4 м/с при возрастах волн от 0,2 до 1,2.

Определение геометрических размеров обрушений в активной фазе, скоростей и направлений их движения осуществлялось по видеозаписям морской поверхности. В результате обработки 55 видеозаписей были построены распределения длин обрушений волн $\Lambda(c)$. Анализ данных показывает, что $\Lambda(c)$ имеют функциональную зависимость от u_* и c , предсказываемую теорией О. М. Филлипса [9], при этом зависимости $\Lambda(c)$ от возраста волн явно не проявляется.

Плотности вероятности отношения максимальной длины обрушения к длине обрушивающейся волны, рассчитанные для различных ветровых и волновых условий, подобны и имеют небольшой разброс. Среднее значение отношений $\overline{L/\lambda}$, полученных для всех измерений, составляет $\bar{\gamma} = 0,1$.

В настоящей работе оценки коэффициента b , связывающего диссипацию энергии, обусловленную обрушениями, с $\Lambda(c)$ соотношением (1), проводились в рамках концепции равновесного интервала спектра ветровых волн. Согласно расчетам по нашим данным, среднее значение параметра b составляет $1,8 \cdot 10^{-3}$. Полученное нами значение b близко к результатам натурных работ [17, 18]. Анализ данных не выявил явной связи b с параметрами волнения (среднеквадратичным уклоном, возрастом волн и максимальной крутизной) и атмосферы (динамической скоростью в воздухе).

Использование полученной здесь экспериментальной оценки параметра b и $\bar{\gamma}$ позволило интерпретировать на количественном уровне измерения числа обрушений волн на единицу поверхности, приведенные в работе [32].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. On the vertical structure of wind-driven sea currents / V. Kudryavtsev [et al.] // Journal of Physical Oceanography. 2008. Vol. 38, iss. 10. P. 2121–2144. <https://doi.org/doi:10.1175/2008JPO3883.1>
2. Environmental turbulent mixing controls on air-water gas exchange in marine and aquatic systems / C. J. Zappa [et al.] // Geophysical Research Letters. 2007. Vol. 34, iss. 10. L10601. <https://doi.org/10.1029/2006GL028790>
3. Thorpe S. A. Energy loss by breaking waves // Journal of Physical Oceanography. 1993. Vol. 23, iss. 11. P. 2498–2502. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1993\)023<2498:ELBBW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1993)023<2498:ELBBW>2.0.CO;2)
4. Melville W. K., Matusov P. Distribution of breaking waves at the ocean surface // Nature. 2002. Vol. 417, iss. 6884. P. 58–63. <https://doi.org/10.1038/417058a>

5. *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, iss. 6. P. 1296–1312. <https://doi.org/10.1175/2007JPO3762.1>
6. *Kleiss J. M., Melville W. K.* Observations of wave breaking kinematics in fetch-limited seas // *Journal of Physical Oceanography*. 2010. Vol. 40, iss. 12. P. 2575–2604. <https://doi.org/10.1175/2010JPO4383.1>
7. *Kleiss J. M., Melville W. K.* The analysis of sea surface imagery for whitecap kinematics // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2011. Vol. 28, iss. 2. P. 219–243. <https://doi.org/10.1175/2010JTECHO744.1>
8. *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>
9. *Phillips O. M.* Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves // *Journal of Fluid Mechanics*. 1985. Vol. 156. P. 505–531. <https://doi.org/10.1017/S0022112085002221>
10. *Phillips O. M., Posner F. L., Hansen J. P.* High range resolution radar measurements of the speed distribution of breaking events in wind-generated ocean waves: Surface impulse and wave energy dissipation rates // *Journal of Physical Oceanography*. 2001. Vol. 31, iss. 2. P. 450–460. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<0450:HRRRMO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<0450:HRRRMO>2.0.CO;2)
11. *Thomson J., Gemmrich J. R., Jessup A. T.* Energy dissipation and the spectral distribution of whitecaps // *Geophysical Research Letters*. 2009. Vol. 36, iss. 11. L11601. <https://doi.org/10.1029/2009GL038201>
12. *Melville W. K.* Energy dissipation by breaking waves // *Journal of Physical Oceanography*. 1994. Vol. 24, iss. 10. P. 2041–2049. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1994\)024<2041:EDBBW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1994)024<2041:EDBBW>2.0.CO;2)
13. *Banner M. L., Peirson W. L.* Wave breaking onset and strength for two-dimensional deep-water wave groups // *Journal of Fluid Mechanics*. 2007. Vol. 585. P. 93–115. <https://doi.org/10.1017/S0022112007006568>
14. *Drazen D. A., Melville W. K., Lenain L.* Inertial scaling of dissipation in unsteady breaking waves // *Journal of fluid mechanics*. 2008. Vol. 611. P. 307–332. <https://doi.org/10.1017/S0022112008002826>
15. *Romero L., Melville W. K., Kleiss J. M.* Spectral energy dissipation due to surface wave breaking // *Journal of Physical Oceanography*. 2012. Vol. 42, iss. 9. P. 1421–1444. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-11-072.1>
16. Wave breaking in developing and mature seas / J. Gemmrich [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2013. Vol. 118, iss. 9. P. 4542–4552. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20334>
17. *Schwendeman M., Thomson J., Gemmrich J. R.* Wave breaking dissipation in a young wind sea // *Journal of Physical Oceanography*. 2014. Vol. 44, iss. 1. P. 104–127. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-0237.1>
18. On the variation of the effective breaking strength in oceanic sea states / C. J. Zappa [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2016. Vol. 46, iss. 7. P. 2049–2061. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-15-0227.1>
19. Bulk parameterization of air-sea fluxes: updates and verification for the COARE algorithm / C. W. Fairall [et al.] // *Journal of Climate*. 2003. Vol. 16, iss. 4. 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)
20. *Large W. G., Pond S.* Sensible and latent heat flux measurements over the ocean // *Journal of Physical Oceanography*. 1982. Vol. 12, iss. 5. P. 464–482. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1982\)012<0464:SALHFM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1982)012<0464:SALHFM>2.0.CO;2)
21. *Phillips O. M.* The equilibrium range in the spectrum of wind-generated waves // *Journal of Fluid Mechanics*. 1958. Vol. 4, iss. 4. P. 426–434. <https://doi.org/10.1017/S0022112058000550>

22. *Hanson J. L., Phillips O. M.* Wind sea growth and dissipation in the open ocean // *Journal of Physical Oceanography*. 1999. Vol. 29, iss. 8. P. 1633–1648. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<1633:WSGADI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<1633:WSGADI>2.0.CO;2)
23. Observed variation in the decay time of oceanic whitecap foam / A. H. Callaghan [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2012. Vol. 117, iss. C9. C09015. <https://doi.org/10.1029/2012JC008147>
24. *Rapp R. J., Melville W. K.* Laboratory measurements of deep-water breaking waves // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1990. Vol. 331, iss. 1622. P. 735–800. <https://doi.org/10.1098/rsta.1990.0098>
25. *Stansell P., MacFarlane C.* Experimental investigation of wave breaking criteria based on wave phase speeds // *Journal of Physical Oceanography*. 2002. Vol. 32, iss. 5. P. 1269–1283. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2002\)032<1269:EIOWBC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2002)032<1269:EIOWBC>2.0.CO;2)
26. *Duncan J. H.* An experimental investigation of breaking waves produced by a towed hydrofoil // *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*. 1981. Vol. 377, iss. 1770. P. 331–348. <https://doi.org/10.1098/rspa.1981.0127>
27. *Jessup A. T., Phadnis K. R.* Measurement of the geometric and kinematic properties of microscale breaking waves from infrared imagery using a PIV algorithm // *Measurement Science and Technology*. 2005. Vol. 16, no. 10. P. 1961–1969. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/16/10/011>
28. *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>
29. Waves and the equilibrium range at Ocean Weather Station P / J. Thomson [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2013. Vol. 118, iss. 11. P. 5951–5962. <https://doi.org/10.1002/2013JC008837>
30. *Plant W. J.* A relation between wind stress and wave slope // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1982. Vol. 87, iss. C3. P. 1961–1967. <https://doi.org/10.1029/JC087iC03p01961>
31. *Meirink J. F., Makin V. K., Kudryavtsev V. N.* Note on the growth rate of water waves propagating at an arbitrary angle to the wind // *Boundary-Layer Meteorology*. 2003. Vol. 106, iss. 1. P. 171–183. <https://doi.org/10.1023/A:1020835211837>
32. *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

Об авторах:

Кориненко Александр Евгеньевич, научный сотрудник, отдел дистанционных методов исследования, ФГБУН ФИЦ 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 исследований, лаборатория прикладной физики моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-5799-454X**, **ResearcherID: F-8709-2014**, **SPIN-код: 9206-3020**, **Scopus Author ID: 23012976200**, vladimir.malinovsky@mhi-ras.ru

Кудрявцев Владимир Николаевич, заведующий Лабораторией спутниковой океанографии, Российский государственный гидрометеорологический университет (192007, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79), доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2); **Scopus Author ID: 7102703183**, kudr@rshu.ru

Дулов Владимир Александрович, заведующий лабораторией прикладной физики моря, отдел дистанционных методов исследований ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-0038-7255**, **ResearcherID: F-8868-2014**, **SPIN-код: 8303-6244**, **Scopus Author ID: 6602725409**, dulov@mhi-ras.ru