

УДК 551.465.5+551.466

© А. Е. Кориненко^{1*}, В. В. Малиновский¹, В. А. Дулов¹, В. Н. Кудрявцев^{1,2}, 2022

¹Морской гидрофизический институт РАН, 299011, Капитанская ул., 2, г. Севастополь, Россия

²Российский государственный гидрометеорологический университет, 195196, Малоохтинский пр., д. 98, г. Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: korinenko.alex@mhi-ras.ru

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ «БАРАШКА» ОБРУШИВАЮЩЕЙСЯ ВОЛНЫ

Статья поступила в редакцию 04.09.2021, после доработки 28.12.2021, принята в печать 10.01.2022

Аннотация

Представлены результаты исследования времени жизни обрушений ветровых волн (барашков) и пространственного распределения моментов зарождения обрушений по профилю длинной поверхностной волны, полученные в ходе специализированных экспериментов с океанографической платформы в Черном море. Регистрация барашков осуществлялась по видеозаписям морской поверхности. Одновременно с видеозаписями измерялись характеристики поверхностного волнения, а также регистрировалась метеорологическая информация.

Показано, что распределение времени жизни барашка хорошо описывается экспоненциальным законом. Установлено, что отношение времени жизни индивидуального барашка к периоду обрушивающейся волны равно 0,3, а распределения этого отношения подобны для различных ветровых и волновых условий. Показано, что зарождение барашков происходит преимущественно в районе гребня длинной волны со смещением на ее передний склон в среднем на 9,6° фазы длинной волны. Возникнув на переднем фронте, барашек за время жизни смещается на задний фронт длинной волны, так что разность фаз между зарождением обрушения и максимумом доли поверхности, занятой барашками, составляет 21,6°.

Ключевые слова: обрушения ветровых волн, время жизни барашка, натурные исследования, начальный момент обрушения ветровой волны, модуляция обрушений коротких волн длинными волнами

© А. Е. Korinenko^{1*}, V. V. Malinovsky¹, V. A. Dulov¹, V. N. Kudryavtsev^{1,2}, 2022

¹Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, 299011, Kapitanskaya Str., 2, Sevastopol, Russia

²Russian State Hydrometeorological University, 195196, Malookhtinsky Pr., 98, St. Petersburg, Russia

*E-mail: korinenko.alex@mhi-ras.ru

ESTIMATION OF THE “WHITECAP” LIFETIME OF BREAKING WAVE

Received 04.09.2021, revised 28.12.2021, accepted 10.01.2022

Abstract

The paper presents the results of a study of the lifetime of wind-wave breaking (“whitecaps”) and the spatial distribution of the moments of wave-breaking initiation along the profile of a long surface wave. The results obtained during the specialized experiments from an oceanographic platform in the Black Sea are given. The registration of the whitecaps was carried out based on the video recordings of the sea surface. The surface waves’ characteristics were measured and the meteorological information was recorded simultaneously with the video recordings.

It is shown that the distribution of the whitecaps’ lifetime is well described by an exponential law. It was found that the ratio of the lifetime of an individual whitecap to the period of the breaking wave is 0.3. The distributions of the above-mentioned ratio are similar for different wind and wave conditions. It is indicated that the generation of whitecaps occurs mainly in the region of the crest of a long wave with a shift to its front slope on average by 9.6 of the phase of the long wave. The whitecap having arisen at the leading edge shifts to the trailing edge of the long wave during its lifetime, so that the phase difference between the breaking initiation and the maximum of the surface fraction covered by the whitecaps equals 21.6.

Keywords: wind wave breaking, whitecap lifetime, field studies, initial moment of wind wave breaking, modulation of short wave breaking by long waves

Ссылка для цитирования: Кориненко А.Е., Малиновский В.В., Дулов В.А., Кудрявцев В.Н. Оценка времени жизни «барашка» обрушивающейся волны // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 1. С. 61–72.

doi: 10.48612/fpg/5g5t-4mzd-94ab

For citation: Korinenko A.E., Malinovsky V.V., Dulov V.A., Kudryavtsev V.N. Estimation of the “Whitecap” Lifetime of Breaking Wave. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 1, 61–72. doi: 10.48612/fpg/5g5t-4mzd-94ab

1. Введение

Обрушения ветровых волн играют важную роль в процессах на морской поверхности — газообмене между океаном и атмосферой [1], диссипации энергии ветровых волн [2], генерации турбулентности в приповерхностном слое моря [3], генерации брызг [4], и влияют на структуру атмосферного погранслоя [5, 6]. Интенсивность обрушений чувствительна к неоднородностям поверхностных течений, связанных с различными океанскими динамическими процессами (внутренние волны, границы суб- и мезомасштабных течений, фронты), что используется в практических приложениях дистанционного зондирования [7–9].

Обрушение волн на морской поверхности представляет собой сложное гидродинамическое явление. Барашек начинает формироваться, когда волна при обрушении вовлекает воздух в поверхностный слой воды. Распространяясь с гребнем обрушивающейся волны, пенная область значительно увеличивается в размерах. Со временем позади барашка появляется шлейф остаточной пены. Традиционно барашек рассматривают, как активную фазу обрушения, «фазу А» по номенклатуре [10, 11], а остаточную «растекшуюся пену», характеризующуюся облаками всплывающих пузырей воздуха, — как пассивную «фазу Б» [10, 11]. Поскольку пространственно-временная стохастическая динамика и электродинамика этих фаз принципиально различна [12], различается и роль этих фаз в физических явлениях на морской поверхности, и, соответственно, важность их исследования для различных специальных задач. Например, если в явлениях газообмена и собственного микроволнового излучения морской поверхности наиболее важна «фаза Б» [12], то для визуализации диссипации волновой энергии [2] и формирования радиолокационного сигнала основной интерес представляют барашки — «фаза А» [13, 14]. В данной работе, основанной на оптической регистрации морской поверхности под углами наблюдения около 45 градусов, акцент сделан на исследовании временной эволюции барашка, возникающего при обрушении ветровой гравитационной волны.

Как показали результаты исследований [15, 16], характерное время жизни обрушения в «фазе Б» длится секунды, а длительность «фазы А» составляет десятые доли секунды. Поэтому в натурных экспериментах определение времени жизни барашка затруднительно, а результаты немногочисленных работ [17–20] противоречивы. В зависимости от ветро-волновых условий среднее значение времени жизни обрушения $\bar{\tau}$ по данным радиолокационных измерений в диапазоне электромагнитных волн 3 см изменяется от 0,8 с до 3 с [19]. По данным акустических измерений $\bar{\tau}$ лежит в пределах 1,2 с до 1,8 с [17]. В то же время анализ распределения τ , полученных в Черном море в районе Стационарной океанографической платформы в работе [20], показывает, что $0,3 \leq \tau \leq 0,8$ с. При изучении среднего времени жизни барашка представляет интерес соотношение между $\bar{\tau}$ и средним периодом обрушивающейся волны $\bar{T}$. Согласно данным [17] $\bar{\tau}$ составляет 45–65 % от $\bar{T}$. В работе [21] показано, что для единичных обрушений отношение τ к периоду обрушивающейся волны лежит в пределах 0,3–0,5. В результате радиолокационных измерений [19] получено значение $\tau/\bar{T} \cong 0,8$. Перечисленные расхождения, указывают на целесообразность дальнейших исследований времени жизни барашков, одной из основных физических характеристик обрушения волны.

В натурных условиях обрушения ветровых волн происходят в присутствии длинных волн — ветровых волн спектрального пика и/или волн зыби. Длинные ветровые волны обрушаются редко [22], но вызывают модуляцию обрушений более коротких волн [23–25].

В результате барашки концентрируются в окрестности гребня длинной волны, при этом максимумы доли поверхности Q , покрытой обрушениями, смещены на задний склон модулирующей волны [25]. Это, на первый взгляд, противоречит теоретическим представлениям, согласно которым максимум амплитуды коротких волн должен находиться на переднем склоне вблизи гребня длинной волны [26, 27]. Анализ такого расхождения в пространственном расположении Q приводится в [25], где показано, что наблюдаемый сдвиг максимума Q на задний склон модулирующей волны объясняется конечным временем существования барашков, в течение которого они отстают от гребней длинных волн из-за разницы фазовых скоростей длинных и обрушивающихся коротких волн. Это обстоятельство инспирировало наш интерес к более детальным оценкам времен жизни барашков, а также к моментам начала обрушений в присутствии длинных волн. Если эти моменты окажутся сконцентрированы в области усиления амплитуд коротких волн, что, согласно теоретическим предсказаниям, должно иметь место перед гребнем длинной волны, то выводы работы [25] будут существенно дополнены.

Целью настоящей работы является изучение статистических характеристик времени жизни обрушений, их связь с периодом обрушивающейся волны и исследование распределения начальных моментов обрушений вдоль профиля длинной волны.

2. Натурный эксперимент

2.1. Общее описание

Экспериментальные исследования были выполнены в осенний период 2015, 2018–2019 гг. с океанографической платформы в Черном море вблизи пос. Кацивели. Платформа расположена на расстоянии 0,5 км от берега, где глубина воды примерно 30 м. Работы проводились в условиях устойчивого ветра со стороны моря и состояли в синхронной видео съемке морской поверхности, волнографических измерениях и записях скорости ветра (см. рис. 1).

Регистрация обрушений ветровых волн осуществлялась с помощью цифровой видеокамеры с частотой записи 25 кадров в секунду и разрешением 1920×1080 пикселей. Камера располагалась на высоте 12 м над уровнем моря. Угол между оптической осью видеокамеры и поверхностью моря выбирался равным $35\text{--}45^\circ$. Угол обзора объектива по горизонтали составлял 54° , а по вертикали — 32° . Возвышения морской поверхности регистрировались струнным волнографом, расположенным на конце стрелы длиной 11 м. Сбор метеорологической информации осуществлялся многофункциональным комплексом *Davis 6152EU*, расположенным на высоте 23 м над уровнем моря на мачте океанографической платформы (см. рис. 1). Измеренная скорость ветра пересчитывалась в скорость ветра U на высоте 10 м с использованием данных о температуре воздуха, температуре воды и влажности по методике [28]. Эксперименты были проведены при скоростях ветра 9 м/с — 21 м/с. Более подробно методика проведения измерений и описание приборов представлены в [29, 30].

2.2. Времена жизни барашков

Для оценок времени жизни барашков были использованы данные, для которых кадр видеозаписи охватывал площадь морской поверхности около 400 м^2 . При известной геометрии съемки кадр изображения привязывался к координатам на горизонтальной плоскости, расположенной на среднем уровне моря. В пределах кадра разрешение вдоль вертикальной оси изменялось от 0,01 до 0,06 м, а вдоль горизонтальной оси — от 0,01 до 0,02 м.

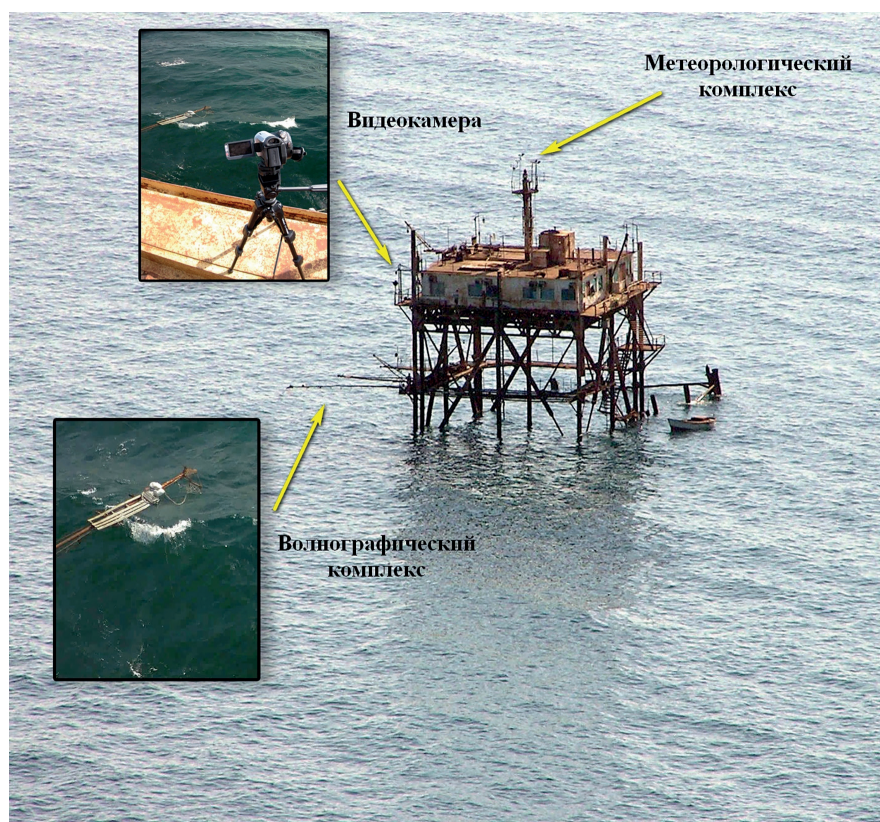


Рис. 1. Схема расположения измерительной аппаратуры на океанографической платформе

Fig. 1. The instrumentation layout on the oceanographic platform

Идентификация барашков по видеозаписям морской поверхности осуществлялась с помощью алгоритма [31]. Алгоритм основан на отличии модельного гауссова распределения яркости I в видеокадре в отсутствии обрушений от фактического распределения яркости в присутствии пенных структур. Обрушения искажают «хвост» нормального распределения $p(I)$ при больших значениях яркости. Уровень яркости I_0 , выше которого наблюдаются искажения $p(I)$, принимался за величину порога, а области морской поверхности с яркостью, превышающей I_0 , рассматривались как пенные структуры. Для последующего анализа выделялась лишь активная фаза обрушений («фаза А», барашки), а пятна растекшейся пены, оставшейся после прохождения обрушения, автоматически отфильтровывались, используя кинематические свойства обрушений в различных фазах [31–33].

Основное различие кинематики фаз выражается в том, что барашки смещаются в горизонтальной плоскости с примерно постоянным вектором скорости, в то время как движения остаточных пенных структур имеют хаотичный характер. Рис. 2 показывает эволюцию барашка с момента, когда он появился впервые (см. врезку с увеличением изображения на рис. 2, *a*), до момента его исчезновения, после которого на морской поверхности осталось лишь пятно растекшейся пены, расположенное вблизи нижней границы рис. 2, *e*. Барашки и растекшаяся пена выглядят яркими образованиями белого цвета. Красным цветом выделены пиксели изображения, которые алгоритм [31] идентифицирует, как активную фазу обрушения. По мере развития барашка вокруг области красного цвета (непосредственно барашка) можно видеть пиксели белого цвета, соответствующие облакам всплывающих пузырьков.

Рис. 3 более подробно показывает эволюцию площади (рис. 3, *a*) и движение геометрического центра (X , Y) в локальной системе координат (рис. 3, *b*) того же пенного образования. Символы ($\bullet$) на рис. 3, *a* соответствуют последовательно кадрам, приведенным на рис. 2, *a–e*. Аналогичные примеры эволюции геометрических характеристик барашков проиллюстрированы и в других исследованиях (см., например, рис. 3 и 4 в [22] и рис. 3 в [30]). Временная эволюция барашка, движущегося с вполне определенной скоростью, характеризуется ростом его площади до некоторого максимума. Затем начинается распад барашка на пятна остаточной пены, а движение геометрического центра яркой области существенно замедляется и, наконец, принимает колебательный характер, отражая орбитальные движения доминантных волн. На этом участке спада площади пенной структуры «фазы А и Б» неразличимы на изображениях видимого диапазона. Однако физика явления обрушения волны подразумевает, что яркая область активного обрушения (барашек) жестко связана с обрушивающейся волной, и потому движется с её фазовой скоростью [34]. Поэтому к активной «фазе А» следует относить яркие области, движущиеся с постоянной скоростью. Интервал времени, в течение которого именно такое движение наблюдается, соответствует росту площади барашка. При анализе статистических характеристик активной фазы обрушений, как правило, рассматривают лишь участок роста площади, игнорируя пенные структуры на участке её спада (см., например, [22, 30, 31–33]).

Алгоритм [31], используя дерево решений на основе кинематических параметров пенной области, позволяет адекватно выделять «фазу А» обрушений (рис. 2). В качестве моментов распада барашков принимались моменты достижения максимума их площади (на рис. 3, *a*, этот момент отмечен вертикальной линией). Интервал времени τ между моментами обнаружения и достижения максимума площади барашка принимался в качестве времени его жизни. В данной работе рассматривались только те барашки, которые возникли и распались внутри наблюдаемой области.

Как следует из рис. 3, *b*, до момента распада барашек движется прямолинейно с постоянной скоростью $c = \sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2}$. Мы считали эту скорость равной фазовой скорости обрушивающейся волны, как предложено О.М. Филиппсом [34]. Отсюда, используя дисперсионное соотношение гравитационных волн на глубокой воде, для каждого барашка были оценены периоды несущих волн $T = 2\pi c/g$, где g — ускорение свободного падения.

2.3. Зарождение обрушений под влиянием длинных волн

Для исследования модуляций обрушений длинными волнами в 2018 году была проведена серия из восьми специальных экспериментов при скоростях ветра 13–19 м/с [25]. Камера ориентировалась навстречу направлению длинных волн, которое всегда совпадало с направлением ветра. Выполнялась видеосъемка участка морской поверхности в месте ее пересечения со струной волнографа (рис. 2). При этом волнограф был синхронизирован с видеокамерой путем записи его сигнала вместе со звуковым рядом с камеры в единый файл. Точность синхронизации — 1 мс. В результате в работе [25] было установлено распределение доли поверхности, занятой барашками, вдоль профиля длинной волны. Настоящая работа отвечает на вопрос, как распределены моменты зарождения обрушений вдоль длинной волны.

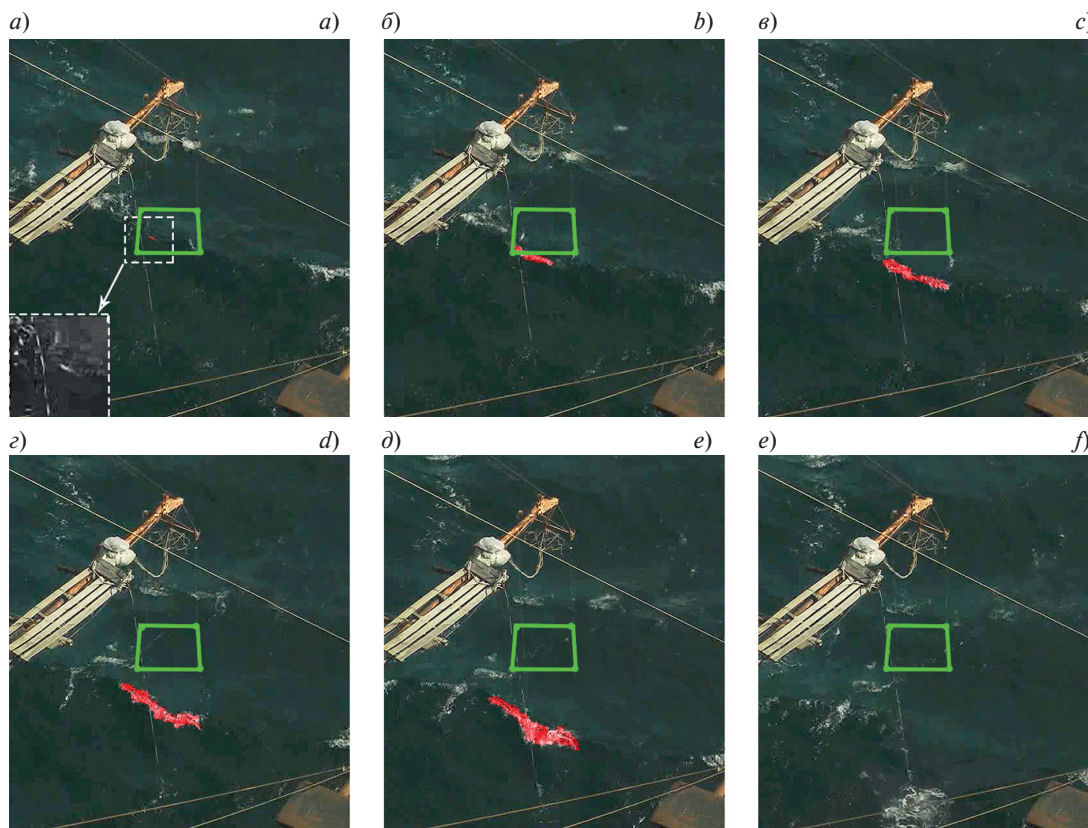


Рис. 2. Эволюция обрушения: *a* — момент зарождения барашка; *b–d* — движение и рост барашка, *e* — пятно растекшейся пены после исчезновения барашка. Красным цветом выделена активная фаза обрушения согласно применяемому алгоритму [31]. Зеленым цветом показаны границы квадратного участка, использованного для исследования влияния длинных волн на зарождение обрушений

Fig. 2. Evolution of wave breaking: *a* — the moment of whitecap generation; *b–e* — movement and growth of the whitecap; *f* — a spot of spreading foam after the disappearance of the whitecap. The active phase of the breaking is highlighted in red according to the applied algorithm [31]. The square area used is shown by green box

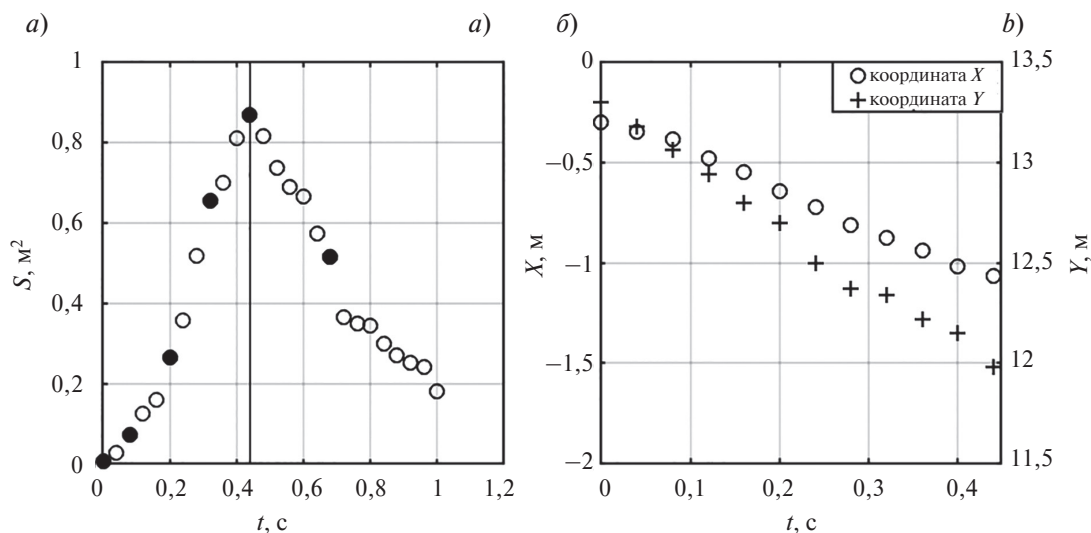


Рис. 3. Изменения площади S (*a*) и координат геометрического центра X и Y (*b*) яркого образования, соответствующего обрушению волны, которое показано на рис. 2. На графике символы ($\bullet$) последовательно соответствуют кадрам, приведенным на рис. 2. Вертикальная прямая отмечает момент распада барашка

Fig. 3. Changes in the area, S , (*a*) and coordinates of the geometric center X and Y , (*b*) of breaking shown in Fig. 2. The symbols ($\bullet$) correspond to the video frames shown in Fig. 2. The vertical line indicates the moment of whitecap disappearance

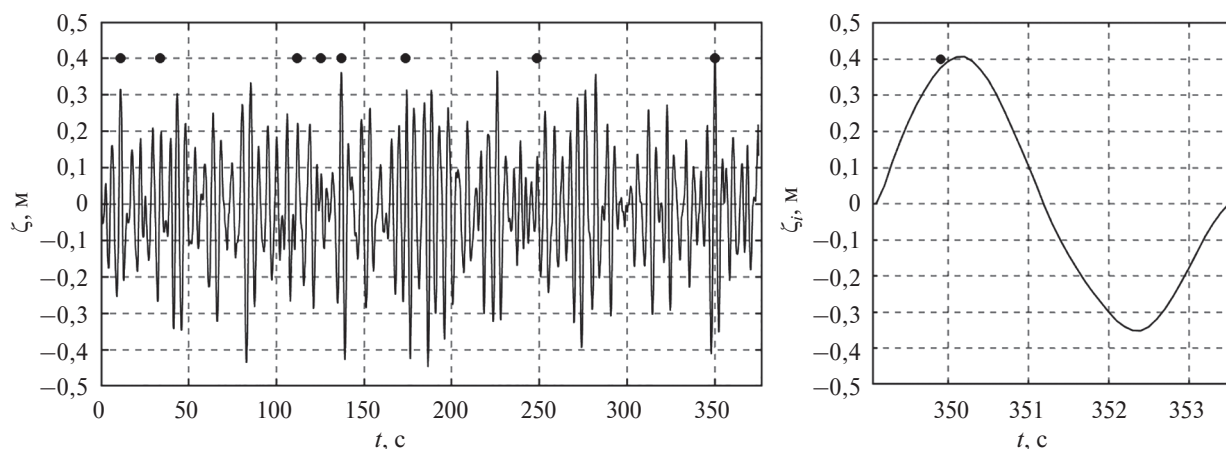


Рис. 4. Фрагмент записи возвышений морской поверхности $\zeta(t)$ с отметками (•) в моменты начала обрушений. Справа — растянутый по оси времени участок, соответствующий индивидуальной волне

Fig. 4. A record fragment of the sea surface elevations $\zeta(t)$ with the marks (•) at the moments of the beginning of the breaking. An individual breaking event is zoomed on the right panel

В этой части эксперимента особое внимание уделялось фиксации начального этапа обрушения волны: когда только начинает формироваться барашек. Мы определяли моменты зарождения обрушений в квадратном участке со стороной $L_m = 0,9$ м и центром в точке пересечения со струной волнографа (см. рис. 2, где границы квадрата показаны зелёным цветом).

Рис. 4 дает пример получаемых данных: возвышений морской поверхности $\zeta(t)$ и привязанных к ним по времени моментов начала обрушений. Для получения характеристик длинных волн была использована методика анализа индивидуальных волн (см., например, [23, 25]). Момент пересечения нуля «снизу вверх» сигналом $\zeta(t)$ рассматривался, как начало индивидуальной волны, которая продолжалась до следующего пересечения нуля «снизу вверх» (см. пример на рис. 4 справа). Длительность индивидуальной волны считалась ее периодом T_i . Тогда фаза волны в момент времени t есть $\Phi = 2\pi(t - t_i)/T_i$, где момент t_i соответствует началу волны. Волновое число индивидуальной волны определялось, как $K_i = (2\pi/T_i)^2/g$, а после умножения его на амплитуду индивидуальной волны получали оценку параметра крутизны волны AK .

В результате были получены данные для более чем 1300 индивидуальных волн. Детали методики такой обработки, оценки ошибок, а также подробное описание метео-волновых условий во время этих экспериментов приведено в [25].

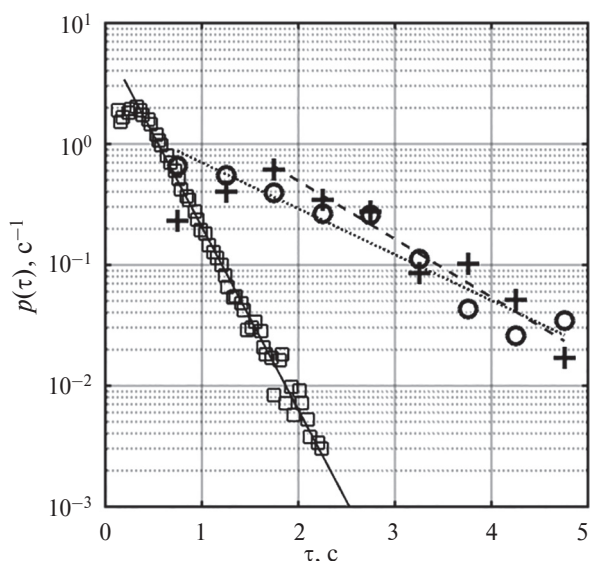


Рис. 5. Плотности вероятности времени жизни обрушений. Символы (□) — результаты наших измерений, (○) и (+) — данные из работ [17] и [19]. Линии — аппроксимирующие кривые $p(\tau) = p \cdot \exp(-q \cdot \tau)$

Fig. 5. Probability densities of the breaking lifetime. Symbols (□) are our measurements, (○) and (+) — the data from [17] and [19]. Lines are approximating curves, $p(\tau) = p \cdot \exp(-q \cdot \tau)$

3. Результаты

3.1. Статистика времени жизни обрушений

На рис. 5 показана плотность вероятности $p(\tau)$, полученная по всем данным. Как следует из рис. 5, а, распределение $p(\tau)$ хорошо аппроксимируется экспонентой $p(\tau) = 6,88 \cdot \exp(-3,49 \cdot \tau)$, показанной сплошной линией. Среднее значение по всем данным составляет $\bar{\tau} = 0,46$ с. Экспоненциальный вид распределения согласуется с результатами, приведенными в [19], где среднее значение времени жизни составило 0,4 с.

Распределения $p(\tau)$, полученные при акустических и радиолокационных (РЛ) измерениях, демонстрируются, соответственно, в [17] и [19], и, как указывалось выше, средние значения времени жизни обрушений, приводимые в этих работах, существенно больше $\bar{\tau}$,

полученного при наших измерениях. Такое расхождение в значениях $\bar{\tau}$ может быть вызвано применением различных измерительных методов. Используемые в наших экспериментах видеокамера и методика обработки видеок кадров позволяют идентифицировать обрушения с минимальной длительностью $\tau_{\min} = 0,12$ с, тогда как при измерениях [17] и [19] $\tau_{\min}$ составило 0,5 с. Как отмечено в [19] обрушения мелких масштабов проявляются при РЛ съемке, но для большей их части определение τ не представляется возможным и значительное число малых обрушений игнорируется. В результате на гистограмме τ наблюдается максимум при $\tau = 1,75$ с и левее максимума происходит уменьшение числа зарегистрированных событий, (см. рис. 3 в [19]). При акустическом методе измерений [17] для 45 % обрушений $\tau > 2$. Таким образом, большие значения $\bar{\tau}$ при измерениях акустическим и РЛ методами могут быть связаны как с регистрацией обрушений с минимальным значением $\tau_{\min} \sim 0,5-0,7$ с, так и регистрацией «фазы Б», что приводит к завышению $\bar{\tau}$. Здесь необходимо отметить, что измерения времени жизни обрушений, приводимые в [17] и [19], выполнялись в условиях открытого океана с характерными периодами волн 5–7 с и при наличии зыби.

В [19] приведены гистограммы $H(\tau)$, построенные как по радиолокационным, так и по акустическим данным (последние были предоставлены авторами [17]). Используя значения обеих гистограмм, мы рассчитали соответствующие этим измерениям плотности вероятности величины τ , представленные на рис. 5 символами ($\diamond$) и ($\circ$). Так же, как и в нашем случае, $p(\tau)$ удовлетворительно описываются экспоненциальным законом $p(\tau) = p \cdot \exp(-q \cdot \tau)$, где коэффициенты p составляют 1,51 и 0,52, значения q равны 1,1 и 0,9 для данных [19] и [17], соответственно. Здесь при расчете $p(\tau)$ для РЛ данных проигнорированы статистически слабо обеспеченные значения $H(\tau)$, левее максимума (см. анализ результатов в [19]).

На рис. 6 показаны распределения отношения времени жизни барашка к периоду обрушивающейся волны $\gamma_T = \tau/T$ для индивидуальных событий обрушений. Распределения для шестидесяти четырех реализаций, характеризующихся различными скоростями ветра, показаны точками. Сплошная линия показывает усредненное распределение γ_T . Стандартное отклонение от него составляет $\sqrt{(\gamma_T)^2} = 0,13$, подтверждая, что распределения γ_T для различных скоростей ветра имеют одинаковую форму, оценка которой представлена усредненным распределением. Максимум распределений наблюдается при $\gamma_T = 0,2$. Среднее значение отношения времени жизни барашка к периоду обрушивающейся волны составляет $\overline{\gamma_T} = 0,3$. Величины γ_T лежат в интервале 0,1–0,41 с вероятностью 75 % и в интервале от 0,1–0,56 — с вероятностью 90 %.

3.2. Распределение событий начала обрушений вдоль профиля длинной волны

На рис. 7 показаны распределения событий начала обрушений вдоль профиля длинной волны для всех серий измерений. Каждое событие характеризуется фазой длинной волны (см. подраздел 2.3), поэтому ненормированные распределения получены путем построения гистограмм для этих фаз $N(\Phi)$. Также на рис. 7 приведены усредненные безразмерные профили длинных волн, $\zeta(\Phi) = \overline{K_i \zeta_i(\Phi)}$, где усреднение выполнено по всем индивидуальным волнам в реализации при фиксированной фазе.

Главной особенностью $N(\Phi)$ является то, что точки зарождения барашков концентрируются в области гребня и существенно реже возникают в районе впадины. В то время как средний профиль длинной волны синусоидальный, средний профиль количества обрушений имеет явно выраженный ассиметричный вид. Для определения фазового сдвига, Φ_1 между реализациями ζ и N представим полученные профили N в виде усеченного разложения Фурье: $N = \bar{N} + N_1 \sin(\Phi - \Phi_1) + \dots$. Положительное значение Φ_1 означает сдвиг максимума N на задний склон длиной волны. На рис. 8 представлены зависимости Φ_1 от среднего

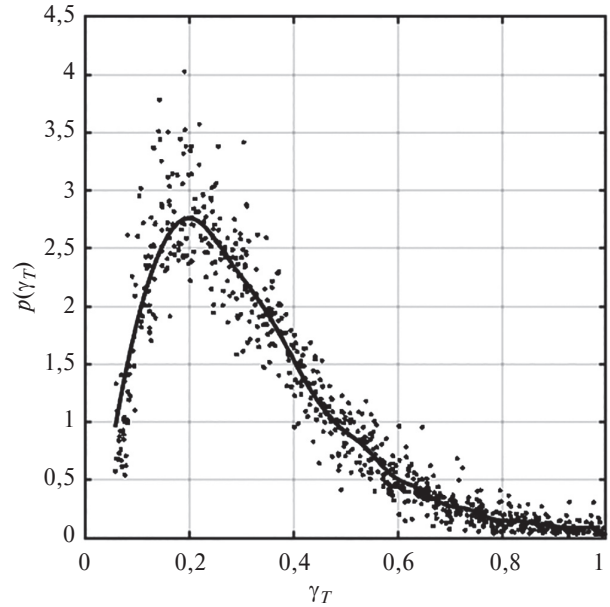


Рис. 6. Распределения отношений времени жизни обрушений к периоду обрушивающейся волны γ_T для всех серий измерений, сплошная линия — результат усреднения

Fig. 6. Distributions of the ratios of breaking lifetime to the period of the breaking wave γ_T for all measurements, the solid line is the result of averaging

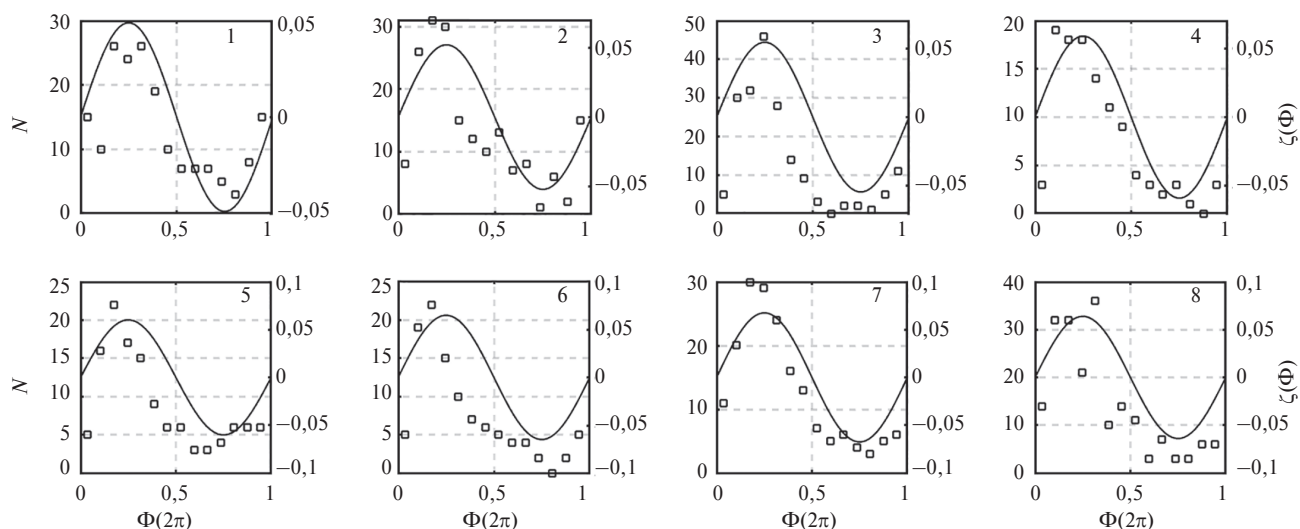


Рис. 7. Ненормированное распределение событий начала обрушений N (символы) вдоль профиля длинной волны для всех серий измерений. Сплошные линии — усредненные профили длинных волн $\zeta(\Phi)$

Fig. 7. Unnormalized distribution of events of the breaking beginning N (symbols) along the long wave profile for all series of measurements. Solid lines are the averaged profiles of long waves $\zeta(\Phi)$

уклона длинной волны $\overline{KA}$ и скорости ветра U вместе с данными для доли поверхности Q , занятой барашками, которые получены в работе [25]. Рис. 8 демонстрирует, что Φ_1 практически не зависит от $\overline{KA}$ и U в исследованном диапазоне этих величин. Величины фазового сдвига Φ_1 для Q смещаются на задний склон длинной волны в среднем на $11,6^\circ$, в то время как моменты зарождения обрушений смещены на передний склон в среднем на $-9,6^\circ$.

Указанное различие в фазовых сдвигах Q и N связано с конечным временем жизни барашка. Согласно физической модели [25] обрушения формируются главным образом на гребне доминантной волны. Барашек, двигаясь с фазовой скоростью c обрушивающейся короткой волны в течение времени жизни

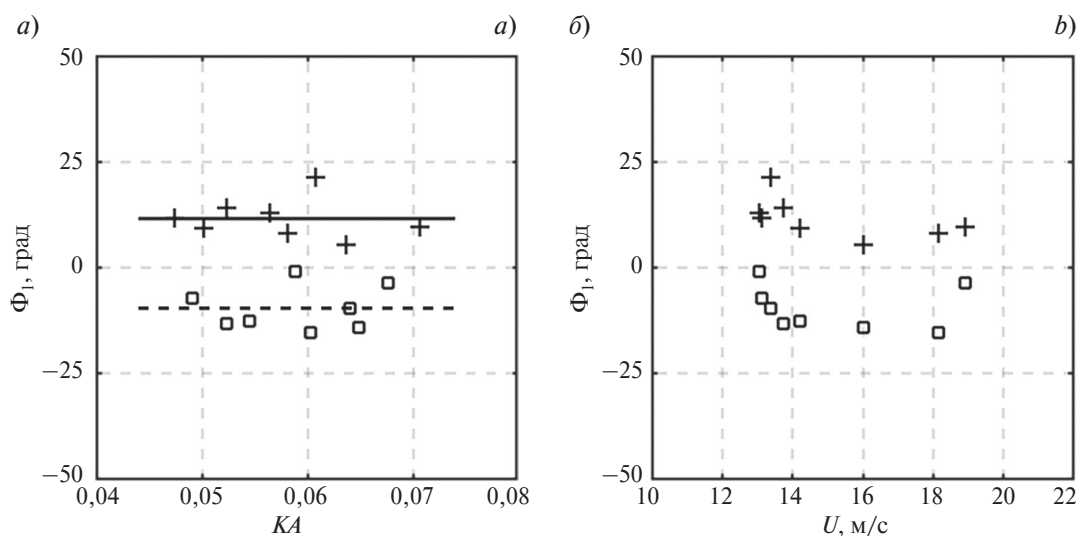


Рис. 8. Зависимость фазового сдвига Φ_1 от ветроволновых условий: a — от крутизны волны; b — от скорости ветра. Символами ($\square$) представлены данные настоящей работы, символами ($+$) показаны результаты [25]. Уровни сплошных линий соответствуют средним значениям $-9,6^\circ$ для наших данных и $11,6^\circ$ для данных [25].

Fig. 8. Dependence of the phase shift Φ_1 : a — on the wave steepness; b — on the wind speed. Symbols ($\square$) represent the present paper data, symbols ($+$) show the results of [25]. The levels of the solid lines correspond to the mean values $-9,6^\circ$ for our data and $11,6^\circ$ for the data of [25].

τ , отстанет от гребня длинной волны, движущейся со своей фазовой скоростью C . Тогда оценка сдвига фаз $\Delta\Phi$ между N и Q определяется смещением барашка относительно длинной волны за время жизни τ : $\Delta\Phi = K(C - c) \cdot \tau$ [25], где K — волновое число длинной волны. Если охарактеризовать длинные волны их средней фазовой скоростью $C = 8,2$ м/с (рассчитанной путем усреднения по всем индивидуальным длинным волнам), а короткие обрушивающиеся волны — средней по всем данным фазовой скоростью $c = 2,5$ м/с, то с учетом полученной ранее оценки $\tau \approx 0,3T$ приходим к величине фазового сдвига $\Delta\Phi = 24^\circ$, что в точности согласуется с экспериментом.

4. Заключение

В настоящей работе представлены результаты двух экспериментов, проводимых на Стационарной океанографической платформе в Черном море, с использованием видеокамеры и струнного волнографа при скоростях ветра от 9 до 21 м/с.

Время жизни (длительность) обрушений τ хорошо описывается экспоненциальным законом. Вид плотности вероятности τ согласуется с результатами [17, 19, 20]. Среднее по всем записям время жизни обрушений составляет 0,46 с, что существенно меньше значений, полученных при акустических (1,3–1,7 с [17]) и радиолокационных (0,7–3 с [19]) измерениях.

Плотности вероятности отношений длительности индивидуальных обрушений к периоду обрушивающихся волн, γ_T , полученные для 64 серий измерений при различных гидрометеорологических условиях, совпадают. Распределения γ_T имеют максимум при $\gamma_T = 0,2$. С вероятностью 75 % величины γ_T находятся в интервале 0,1–0,41 и с вероятностью 90 % лежат в интервале от 0,1 до 0,56. Среднее значение отношения времени жизни индивидуальных барашков к периоду соответствующих обрушивающихся волн составляет 0,3, что совпадает со значениями $0,3 \leq \overline{\gamma_T} \leq 0,5$, приводимых в [21, но ниже, чем оценка $\tau/T \approx 0,8$, полученная в [19].

Зарождения барашков происходят преимущественно в районе гребня длинной волны и смещены на ее передний склон на $9,6^\circ$ фазы длинной волны. Факт концентрации начальных моментов обрушений на переднем склоне модулирующей волны соответствует теоретическим выводам [26, 27]. В то же время, как показано в [25], максимум доли поверхности, покрытой обрушениями, смещен по фазе длинной волны на $11,6^\circ$ на задний склон относительно ее гребня. Таким образом, барашек возникает на переднем склоне и за время жизни смещается на задний склон длинной волны в среднем на $\sim 21^\circ$, что подтверждает выводы [25].

5. Финансирование

Работа выполнена по проекту Российского научного фонда № 21-17-00236, <https://rscf.ru/project/21-17-00236/> с использованием архивных данных, полученных в рамках государственных заданий 0555-2021-0004 и 0763-2020-0005.

Литература

1. Zappa C.J., McGillis W.R., Raymond P.A., Edson J.B., Hints E.J., Zemmellink H.J., Dacey J.W.H., Ho D.T. Environmental turbulent mixing controls on air-water gas exchange in marine and aquatic systems // Journal of Geophysical Research Letters. 2007. Vol. 34, No 10. doi: 10.1029/2006GL028790
2. Thorpe S.A. Energy loss by breaking waves // Journal of Physical Oceanography. 1993. Vol. 23, No 11. P. 2498–2502. doi: 10.1175/1520-0485(1993)023<2498: ELBBW>2.0.CO;2
3. Kudryavtsev V.N., Shrira V., Dulov V.A., Malinovsky V.V. On the vertical structure of wind-driven sea currents // Journal of Physical Oceanography. 2008. Vol. 38, No 10. P. 2121–2144. doi: 10.1175/2008JPO3883.1
4. Troitskaya Y., Kandaurov A., Ermakova O., Kozlov D., Sergeev D., Zilitinkevich S. Bag-breakup fragmentation as the dominant mechanism of sea-spray production in high winds // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. 1614. doi: 10.1038/s41598-017-01673-9
5. Kudryavtsev V., Chapron B. On growth rate of wind waves: impact of short-scale breaking modulations // Journal of Physical Oceanography. 2016. Vol. 46, No 1. P. 349–360. doi: 10.1175/JPO-D-14-0216.1
6. Troitskaya Y., Sergeev D., Kandaurov A., Vdovin M., Zilitinkevich S. The effect of foam on waves and the aerodynamic roughness of the water surface at high winds // Journal of Physical Oceanography. 2019. Vol. 49. doi: 10.1175/JPO-D-18-0168.1
7. Thorpe S.A., Belloul M.B., Hall A.J. Internal waves and whitecaps // Nature. 1987. Vol. 330. P. 740–742. doi: 10.1038/330740a0
8. Dulov V.A., Kudryavtsev V.N., Sherbak O.G., Grodsky S.A. Observations of wind wave breaking in the gulf stream frontal zone // The Global Atmosphere and Ocean System. 1998. Vol. 6, No 3. P. 209–242.

9. Kubryakov A.A., Kudryavtsev V.N., Stanichny S.V. Application of Landsat imagery for the investigation of wave breaking // *Remote Sensing of Environment*. 2021. Vol. 253. 112144. doi: 10.1016/j.rse.2020.112144
10. Бондур В.Г., Шарков Е.А. Статистические характеристики пенных образований на взволнованной морской поверхности // *Океанология*. 1982. Т. 22, № 3. С. 372–378.
11. Monahan E.C., Woolf D.K. Comments on «Variations of whitecap coverage with wind stress and water temperature» // *Journal of Physical Oceanography*. 1989. Vol. 19, No 5. P. 706–709. doi: 10.1175/1520-0485(1989)019<0706: COOWCW>2.0.CO;2
12. Шарков Е.А. Обрушающиеся морские волны: структура, геометрия, электродинамика. М.: Научный мир, 2009. 304 с.
13. Phillips O.M. Radar returns from the sea surface — Bragg scattering and breaking waves // *Journal of Physical Oceanography*. 1988. Vol. 18, No 8. P. 1065–1074. doi: 10.1175/1520-0485(1988)018<1065: RRFTSS>2.0.CO;2
14. Kudryavtsev V.N., Hauser D., Caudal G., Chapron B. A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface 1. Background model // *Journal of Geophysical Research*. 2003. Vol. 108, No C3. doi: 10.1029/2001JC001003
15. Шарков Е.А. Экспериментальные исследования времени жизни дисперсной фазы обрушивающейся гравитационной волны // *Известия АН. ФАО*. 1994. Т. 30, № 6. С. 844–847.
16. Callaghan A.H., Deane G.B., Stokes M.D., Ward B. Observed variation in the decay time of oceanic whitecap foam // *Journal of Geophysical Research*. 2012. Vol. 117, No C9. doi: 10.1029/2012JC008147
17. Ding L., Farmer D.M. Observation of breaking surface wave statistics // *Journal of Physical Oceanography*. 1994. Vol. 24, No 6. P. 1368–1387. doi: 10.1175/1520-0485(1994)024<1368: OOBWS>2.0.CO;2
18. Bortkovskii R.S., Novak V.A. Statistical dependences of sea state characteristics on water temperature and wind-wave age // *Journal of Marine Systems*. 1993. Vol. 4, No 2–3. P. 161–169. doi: 10.1016/0924-7963(93)90006-8
19. 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, No 2. P. 450–460. doi: 10.1175/1520-0485(2001)031<0450: HRRMO>2.0.CO;2
20. Миронов А.С., Дулов В.А. Статистические характеристики событий и диссипация энергии при обрушении ветровых волн // *Сборник научных трудов*. Вып. 16. НАН Украины, МГИ, Севастополь, 2008. С. 97–115.
21. Thorpe S.A., Hall A.J. The characteristics of breaking waves, bubble clouds, and near-surface currents observed using side-scan sonar // *Continental Shelf Research*. 1983. Vol. 1, No 4. P. 353–384. doi: 10.1016/0278-4343(83)90003-1
22. Pivaev P.D., Kudryavtsev V.N., Korinenko A.E., Malinovsky V.V. Field observations of breaking of dominant surface waves // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, No 16. 3321. doi: 10.3390/rs13163321
23. Dulov V.A., Kudryavtsev V.N., Bol'shakov A.N. A field study of whitecap coverage and its modulations by energy containing surface waves // *Gas Transfer at the Water Surface*. Geophys. Monogr. 127 / Ed. Donelan M.A., Drennan W.M., Saltzman E.S., Wanninkhof R. AGU: Washington DC. USA, 2002. P. 187–192. doi: 10.1029/GM127p0187
24. Yurovsky Y.Y., Kudryavtsev V.N., Chapron B. Simultaneous radar and video observations of the sea surface in field conditions // *Proceedings of the Electromagnetics Research Symposium — Spring (PIERS)*. St. Petersburg, 2017. P. 2559–2565. doi: 10.1109/PIERS.2017.8262183
25. Dulov V.A., Korinenko A.E., Kudryavtsev V.N., Malinovsky V.V. Modulation of wind-wave breaking by long surface waves // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, No 14. 2825. doi: 10.3390/rs13142825
26. Longuet-Higgins M.S., Stewart R.W. Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents // *Journal of Fluid Mechanics*. 1960. Vol. 8. P. 565–583. doi: 10.1017/S0022112060000803
27. Phillips O.M. On the response of short ocean wave components at a fixed wave number to ocean current variations // *Journal of Physical Oceanography*. 1984. Vol. 14, No 9. P. 1425–1433. doi: 10.1175/1520-0485(1984)014<1425: OTROSO>2.0.CO;2
28. Fairall C.W., Bradley E.F., Hare J.E., Grachev A.A., Edson J.B. Bulk parameterization of air–sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm // *Journal of Climate*. 2003. Vol. 16, No 4. P. 571–591. doi: 10.1175/1520-0442(2003)016<0571: BPOASF>2.0.CO;2
29. 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
30. Кориненко А.Е., Малиновский В.В., Кудрявцев В.Н., Дулов В.А. Статистические характеристики обрушений и их связь с диссипацией энергии ветровых волн по данным натурных измерений // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 5. С. 514–531. doi: 10.22449/0233-7584-2020-5-514-531
31. Mironov A.S., Dulov V.A. Detection of wave breaking using sea surface video records // *Measurement Science and Technology*. 2008. Vol. 19. P. 015405. doi: 10.1088/0957-0233/19/1/015405
32. 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. doi: 10.1175/2010JPO4383.1

33. Kleiss J.M., Melville W.K. The analysis of sea surface imagery for whitecap kinematics // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2011. Vol. 28, No 2. P. 219–243. doi: 10.1175/2010JTECHO744.1
34. 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. doi: 10.1017/S0022112085002221

References

1. Zappa C.J., McGillis W.R., Raymond P.A., Edson J.B., Hints E.J., Zemmelen H.J., Dacey J.W.H., Ho D.T. Environmental turbulent mixing controls on air-water gas exchange in marine and aquatic systems. *Journal of Geophysical Research Letters*. 2007, 34, 10. doi: 10.1029/2006GL028790
2. Thorpe S.A. Energy loss by breaking waves. *Journal of Physical Oceanography*. 1993, 23, 11, 2498–2502. doi: 10.1175/1520-0485(1993)023<2498: ELBBW>2.0.CO;2
3. Kudryavtsev V.N., Shrira V., Dulov V.A., Malinovsky V.V. On the vertical structure of wind-driven sea currents. *Journal of Physical Oceanography*. 2008, 38, 10, 2121–2144. doi: 10.1175/2008JPO3883.1
4. Troitskaya Y., Kandaurov A., Ermakova O., Kozlov D., Sergeev D., Zilitinkevich S. Bag-breakup fragmentation as the dominant mechanism of sea-spray production in high winds. *Scientific Reports*. 2017, 7, 1614. doi: 10.1038/s41598-017-01673-9
5. Kudryavtsev V., Chapron B. On growth rate of wind waves: impact of short-scale breaking modulations. *Journal of Physical Oceanography*. 2016, 46, 1, 349–360. doi: 10.1175/JPO-D-14-0216.1
6. Troitskaya Y., Sergeev D., Kandaurov A., Vdovin M., Zilitinkevich S. The effect of foam on waves and the aerodynamic roughness of the water surface at high winds. *Journal of Physical Oceanography*. 2019, 49. doi: 10.1175/JPO-D-18-0168.1
7. Thorpe S.A., Belloul M.B., Hall A.J. Internal waves and whitecaps. *Nature*. 1987, 330, 740–742. doi: 10.1038/330740a0
8. Dulov V.A., Kudryavtsev V.N., Sherbak O.G., Grodsky S.A. Observations of wind wave breaking in the gulf stream frontal zone. *The Global Atmosphere and Ocean System*. 1998, 6, 3, 209–242.
9. Kubryakov A.A., Kudryavtsev V.N., Stanichny S.V. Application of Landsat imagery for the investigation of wave breaking. *Remote Sensing of Environment*. 2021, 253, 112144. doi: 10.1016/j.rse.2020.112144
10. Bondur V.G., Sharkov E.A. Statistical characteristics of foam formations on a disturbed sea-surface. *Okeanologiya*. 1982, 22, 3, 372–378 (in Russian).
11. Monahan E.C., Woolf D.K. Comments on “Variations of whitecap coverage with wind stress and water temperature”. *Journal of Physical Oceanography*. 1989, 19, 5, 706–709. doi: 10.1175/1520-0485(1989)019<0706: COOWCW>2.0.CO;2
12. Sharkov E.A. Breaking ocean waves: geometry, structure and remote sensing. *Berlin; Heidelberg; N.Y., Springer/PRAXIS*, 2007. 278 p.
13. Phillips O.M. Radar returns from the sea surface-Bragg scattering and breaking waves. *Journal of Physical Oceanography*. 1988, 18, 8, 1065–1074. doi: 10.1175/1520-0485(1988)018<1065: RRFTSS>2.0.CO;2
14. Kudryavtsev V.N., Hauser D., Caudal G., Chapron B. A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface 1. Background model. *Journal of Geophysical Research*. 2003, 108, C3. doi: 10.1029/2001JC001003
15. Sharkov E.A. Experimental studies of the lifetime of the dispersed phase of a breaking gravitational wave. *Izvestiya AN USSR Fizika Atmosfery i Okeana*. 1994, 30, 6, 844–847 (in Russian).
16. Callaghan A.H., Deane G.B., Stokes M.D., Ward B. Observed variation in the decay time of oceanic whitecap foam. *Journal of Geophysical Research*. 2012, 117, C9. doi: 10.1029/2012JC008147
17. Ding L., Farmer D.M. Observation of breaking surface wave statistics. *Journal of Physical Oceanography*. 1994, 24, 6, 1368–1387. doi: 10.1175/1520-0485(1994)024<1368: OOBWS>2.0.CO;2
18. Bortkovskii R.S., Novak V.A. Statistical dependences of sea state characteristics on water temperature and wind-wave age. *Journal of Marine Systems*. 1993, 4, 2–3, 161–169. doi: 10.1016/0924-7963(93)90006-8
19. 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, 31, 2, 450–460. doi: 10.1175/1520-0485(2001)031<0450: HRRRMO>2.0.CO;2
20. Mironov A.S., Dulov V.A. Statistical characteristics of events and energy dissipation during wavebreaking. *Sbornik Nauchnykh Trudov. NAN Ukrainy, MGI, Sevastopol*. 2008, 16, 97–115 (in Russian).
21. Thorpe S.A., Hall A.J. The characteristics of breaking waves, bubble clouds, and near-surface currents observed using side-scan sonar. *Continental Shelf Research*. 1983, 1, 4, 353–384. doi: 10.1016/0278-4343(83)90003-1
22. Pivaev P.D., Kudryavtsev V.N., Korinenko A.E., Malinovsky V.V. Field observations of breaking of dominant surface waves. *Remote Sensing*. 2021, 13, 16, 3321. doi: 10.3390/rs13163321
23. Dulov V.A., Kudryavtsev V.N., Bol'shakov A.N. A field study of whitecap coverage and its modulations by energy containing surface waves. *Gas Transfer at the Water Surface*. Geophys. Monogr. 127 / Ed. Donelan M.A., Drennan W.M., Saltzman E.S., Wanninkhof R. AGU, Washington DC, USA, 2002, 187–192. doi: 10.1029/GM127p0187

24. Yurovsky Y.Y., Kudryavtsev V.N., Chapron B. Simultaneous radar and video observations of the sea surface in field conditions. *Proceedings of the Electromagnetics Research Symposium — Spring (PIERS)*. St. Petersburg, 2017, 2559–2565. doi: 10.1109/PIERS.2017.8262183
25. Dulov V.A., Korinenko A.E., Kudryavtsev V.N., Malinovsky V.V. Modulation of wind-wave breaking by long surface waves. *Remote Sensing*. 2021, 13, 14, 2825. doi: 10.3390/rs13142825
26. Longuet-Higgins M.S., Stewart R.W. Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents. *Journal of Fluid Mechanics*. 1960, 8, 565–583. doi: 10.1017/S0022112060000803
27. Phillips O.M. On the response of short ocean wave components at a fixed wave number to ocean current variations. *Journal of Physical Oceanography*. 1984, 14, 9, 1425–1433. doi: 10.1175/1520-0485(1984)014<1425:OTROSO>2.0.CO;2
28. Fairall C.W., Bradley E.F., Hare J.E., Grachev A.A., Edson J.B. Bulk parameterization of air–sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm. *Journal of Climate*. 2003, 16, 4, 571–591. doi: 10.1175/1520-0442(2003)016<0571: BPOASF>2.0.CO;2
29. Korinenko A.E., Malinovsky V.V., Kudryavtsev V.N. Experimental research of statistical characteristics of wind wave breaking. *Physical Oceanography*. 2018, 25, 6, 489–500. doi: 10.22449/1573-160X-2018-6-489-500
30. Korinenko A.E., Malinovsky V.V., Kudryavtsev V.N., Dulov V.A. Statistical characteristics of wave breakings and their relation with the wind waves' energy dissipation based on the field measurements. *Physical Oceanography*. 2020, 27, 5, 472–488. doi: 10.22449/1573-160X-2020-5-472-488
31. Mironov A.S., Dulov V.A. Detection of wave breaking using sea surface video records. *Measurement Science and Technology*. 2008, 19, 015405. doi: 10.1088/0957-0233/19/1/015405
32. Kleiss J.M., Melville W.K. Observations of wave breaking kinematics in fetch-limited seas. *Journal of Physical Oceanography*. 2010, 40, 12, 2575–2604. doi: 10.1175/2010JPO4383.1
33. Kleiss J.M., Melville W.K. The analysis of sea surface imagery for whitecap kinematics. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2011, 28, 2, 219–243. doi: 10.1175/2010JTECHO744.1
34. Phillips O.M. Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves. *Journal of Fluid Mechanics*. 1985, 156, 505–531. doi: 10.1017/S0022112085002221