

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### ОСОБЕННОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ОБРУШЕНИЙ ВЕТРОВЫХ ВОЛН С БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2023 г. А. Е. Кориненко<sup>a, b, \*</sup>, В. В. Малиновский<sup>a, b</sup>, А. А. Кубряков<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

<sup>b</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

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

Поступила в редакцию 14.10.2022 г.

Приводятся результаты использования беспилотного летательного аппарата (БПЛА) для исследования процессов обрушения гравитационных волн. Эксперименты проводились в прибрежной зоне западного Крыма (район г. Севастополь) в диапазоне скоростей ветра от 5.5 до 9.5 м/с. Определение геометрических размеров обрушений и скоростей их движения осуществлялось по видеозаписям морской поверхности, полученных с БПЛА. Показано, что пространственное разрешение трансформированного изображения играет ключевую роль при разделении активной фазы обрушения и остаточной пены. При грубом пространственном разрешении возникают ошибки при определении кинематических характеристик барашков. Доля морской поверхности, покрытая пеной обрушающихся волн, отношение максимальной длины барашка к длине обрушающейся волны, распределение суммарной длины обрушений в интервалах скоростей движения на единице поверхности, полученные с БПЛА при пространственном разрешении лучше 0.5 м, удовлетворительно соответствуют результатам других авторов. Анализ данных показывает, что использование беспилотных летательных аппаратов позволяет исследовать статистические характеристики и кинематику обрушений ветровых волн. В то же время, необходимо учитывать влияние пространственного разрешения в видеокадре, которое при значениях, сопоставимых или превышающих масштаб обрушения может приводить к искажению или пропуску данных измерений.

*Ключевые слова:* беспилотные летательные аппараты, дистанционное зондирование Океана, обрушения гравитационных волн, кинематические характеристики обрушений, доля морской поверхности, покрытая барашковой пеной

DOI: 10.31857/S0205961423030041, EDN: TYLTRY

#### ВВЕДЕНИЕ

Обрушения ветровых волн – это явление на поверхности океана, наблюдаемое при скоростях ветра около 4–5 м/с и выше. Обрушения являются важным элементом при изучении многих динамических процессов верхнего слоя моря: газообмен, поток импульса из атмосферы в океан, диссипация волновой энергии, турбулентное перемешивание в приповерхностном слое моря, формирование атмосферного аэрозоля и морских брызг в атмосфере. (см. например, Babanin, 2009; Бортковский, 2006; Kudryavtsev et al., 2008; Wu et al., 2015; Sutherland, Melville, 2015).

При разрушении гребня гравитационной волны в приповерхностный слой воды вовлекается воздух, образующий воздушные пузырьки, которые и формируют на морской поверхности белые барашки (обрушения) (Thorpe, Hall, 1982; Monahan, O’Muircheartaigh, 1986; Шарков, 2009). Барашковая пена обладает большой отражательной способностью, в следствии чего хорошо контра-

стируют на фоне окружающей морской поверхности. Эта особенность позволяет регистрировать обрушения с помощью фото и видео аппаратуры.

Современные методы идентификации обрушений на фоне морской поверхности позволяют автоматизировать процесс обработки большого массива данных. Это в свою очередь дает возможность оперативно получать информацию о кинематических характеристиках обрушений, выявлять их временную динамику на различных пространственных масштабах (Melville, Matusov, 2002; Gemmrich et al., 2008; Mironov, Dulov, 2008; Kleiss, Melville, 2011; Sutherland, Melville, 2013).

В настоящее время исследование процессов обрушения гравитационных волн, как правило, осуществляется при помощи оптической аппаратуры с борта самолета, научно-исследовательского судна, стационарных платформ и дистанционных спутников Земли. Экспериментальные данные, получаемые в результате стационарных измере-

ний, имеют высокое пространственное (порядка дециметров и менее) и временное (порядка миллисекунд) разрешение (Gemrich et al., 2008; Sutherland, Melville, 2013; Shemdiman et al., 2014; Korinenko et al., 2018; Korinenko et al. 2020). Как правило, подобные исследования сопровождаются синхронными измерениями параметров атмосферы, течений и поверхностного волнения. Тем не менее, они имеют естественное ограничение — пространственную локальность и небольшой пространственный охват морской акватории. Вследствие этого, стационарные измерения мало пригодны для получения информации об изменчивости пространственных характеристиках обрушений на крупномасштабных динамических процессах. Как известно, 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 (Thorpe, Hall, 1987; Dulov et al., 1998; Kubryakov et al., 2021).

Этого недостатка лишены данные, получаемые с самолетных (Бондур, Шарков, 1982; Бондур, Шарков, 1986; Kleiss, Melville, 2010) и космических носителей (Anguelova, Webster, 2006; Anguelova, Bettenhausen, 2019; Kubryakov et al., 2021). К примеру, по данным самолетных измерений выполнен анализ статистических распределений линейных размеров пенных структур (Бондур, Шарков, 1986), рассматривались параметры обрушений в зависимости от разгона волн (Kleiss, Melville, 2010). В работе (Kubryakov et al., 2021) показана возможность использования спутниковых изображений Landsat-8 для исследования влияния суб- и мезомасштабных процессов, температурных фронтов на пространственное распределение полей обрушений гравитационных волн.

Однако, данные спутниковых аппаратов, не позволяют получить высокое пространственное разрешения (порядка дециметров и менее), которое необходимо для детального анализа изменчивости обрушений малых пространственных масштабов. К тому же спутниковые наблюдения не выявляют временную динамику обрушений, поскольку индивидуально обрушение фиксируется в определенный момент его жизни.

В последнее время для научных исследований используются небольшие, беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Современные БПЛА стоят недорого, оборудованы видеокамерами с высокой разрешающей способностью, обладают хорошей стабилизацией. В работах (Klemas, 2015; Brouwer et al., 2015; Holman et al., 2017; Osadchiv et al., 2020; Kubryakov et al., 2021) показано, что БПЛА могут быть использованы в океанологиче-

ских задачах различного профиля (определение скорости поверхностных течений, изучение динамики вдольбереговых течений, батиметрии), в том числе и для изучения волновых характеристик (Yurovskaya et al., 2019; Yurovsky et al., 2021).

Использование БПЛА может оказаться перспективным для исследования процессов обрушения гравитационных волн. В этом случае несомненный интерес представит изучение как временной эволюции геометрических свойств отдельных пенных структур при съемках с высоким пространственным разрешением, так и выявление закономерностей распределения различных характеристик обрушений на больших площадях морских акваторий. Вместе с тем, панорамные наблюдения приводят к ухудшению пространственного разрешения, из-за чего падает точность измеряемых параметров обрушений и увеличиваются минимальные размеры идентифицированных барашков. В этом случае открытым остается вопрос о достоверности дальнейшего расчета таких величин, как доля поверхности, покрытая обрушениями и лямбда функция  $\Lambda(c)$  (Phillips, 1985). Нам не удалось найти работ, посвященных анализу регистрации обрушений с БПЛА, в которых изучалась эта проблема.

В настоящей работе рассматривается возможность использования БПЛА для исследования временной динамики процесса обрушения индивидуальных гравитационных морских волн, а также для выявления закономерностей распределения общей запененности поверхности на больших площадях морских акваторий. Проводится сопоставление основных характеристик обрушений, в частности, доли морской поверхности, покрытой барашковой пеной, лямбда распределения с данными стационарных измерений с океанографической платформы в Черном море.

## ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Геометрические характеристики обрушений ветровых волн определялись по видеозаписям морской поверхности, полученных с помощью беспилотного летательного аппарата. В качестве БПЛА использовался летательный аппарат вертикального взлета и посадки DJI MAVIC 2 Enterprise Dual. Квадрокоптер оснащен 3-х осевой стабилизацией, обеспечивающей стабилизированную съемку по заданному азимуту, тангажу и высоте. Управление азимутом и наклоном видеокамеры осуществляется с наземной станции управления. Бортовой контроллер позволяет стабилизировать и удерживать положение и высоту БПЛА. Точность позиционирования в вертикальной плоскости составляет 0.5 м, горизонтальной плоскости — 1.5 м.

Камера квадрокоптера снабжена CMOS матрицей  $1/2.3''$ , позволяющей записывать видео в формате 4К ( $3840 \times 2160$  пикселей, 30 кадров в секунду). Горизонтальные и вертикальные углы обзора камеры, полученные на основе анализа калибровочной сцены с применением методики (Bouquet, 2001), составляют  $65^\circ$  и  $40^\circ$  соответственно.

Экспериментальные исследования проводились в прибрежной зоне западного Крыма (район г. Севастополь). После того, как все параметры съемки установлены, летательный аппарат поднимался на заданную высоту и зависал над морем на 5–10 мин. Параметры пространственного положения (координаты) и угла визирования видеокамеры относительно горизонта  $\varphi$  в момент работы сохранялись в отдельный файл. Всего было выполнено 7 съемок с БПЛА на высотах от 145 до 520 м над уровнем моря и различными углами визирования морской поверхности.

Скорость ветра оценивалась по реанализу NCMADS с пространственным разрешением  $0.25^\circ$  и временным разрешением – 6 ч.

Общая информация об условиях проведения экспериментов приведена в табл. 1, в которой указаны дата измерений, средние значения скорости ветра  $U$ , высота БПЛА над уровнем моря  $H$ , угол визирования видеокамеры  $\varphi$ .

В качестве примера на рис. 1 приведено изображение морской поверхности, полученное 09 сентября 2020 г. с высоты 400 м. При данной

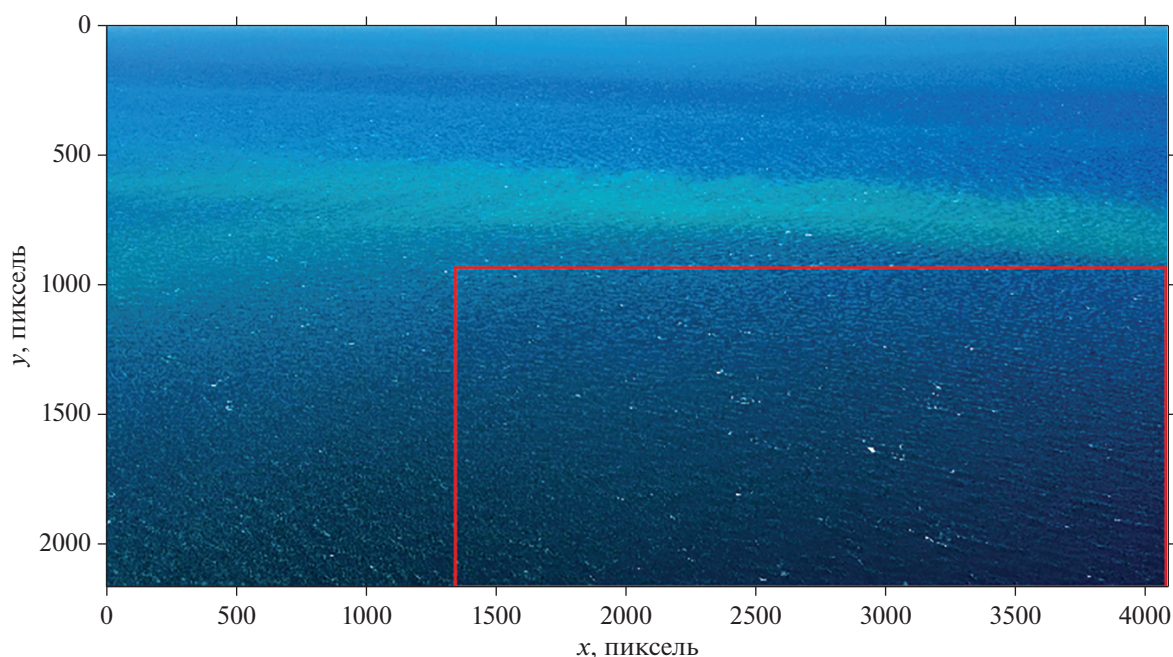
**Таблица 1.** Условия проведения измерений

Дата	$U$ , м/с	$H$ , м	$\varphi$ , град
25.03.2020	9.5	145	36
23.06.2020	5.5	145	90
23.06.2020	5.5	145	90
09.09.2020	8.5	400	21
09.09.2020	8.5	300	17
29.11.2020	6	210	54
30.01.2021	7.5	520	63

геометрии наблюдения площадь морской поверхности составляет около  $154 \text{ км}^2$ . Светлая полоса в центре кадра связана с выносом взвешенного вещества от берега. Данный кадр демонстрирует одно из преимуществ беспилотных летательных аппаратов: возможность наблюдения большой акватории.

#### *Особенности кинематики пенных структур*

На первом этапе идентификация барашков по видеозаписям морской поверхности осуществлялась с помощью алгоритма (Mironov, Dulov, 2008). Алгоритм основан на отличии модельного гауссова распределения яркости  $I$  в кадре в отсутствие обрушений от фактического распределения яркости в присутствии пенных структур. Обрушения искажают “хвост” нормального распределения



**Рис. 1.** Пример кадра видеозаписи БПЛА. Красными прямоугольниками отмечена область, в которой производилось выделение обрушений.

$p(I)$  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.

Последующим и самым важным этапом обработки является выделение активной фазы обрушений и игнорирование растекшейся пены, оставшейся после прохождения барашка. На данном этапе используются кинематические свойства обрушений в различных фазах (Mironov, Dulov, 2008; Kleiss, Melville, 2010; Kleiss, Melville, 2011).

В то же время, как показал предварительный анализ наших данных, при разделении активной фазы и остаточной пены ключевую роль играет пространственное разрешение  $\Delta$  видеозаписей. Рассмотрим влияние  $\Delta$  на определение кинематических характеристик пенных структур.

Для начала кратко остановимся на этапах эволюции пенного образования. Когда гравитационная волна становится неустойчивой, происходит разрушение ее гребня и в поверхностный слой воды вовлекается воздух. В этот момент начинает формироваться пенный барашек (обрушение). Распространяясь с гребнем обрушивающейся волны, пенная область значительно увеличивается в размерах. Со временем позади барашка появляются пятна остаточной пены. Основное различие кинематики фаз выражается в том, что область активного обрушения жестко связана с обрушивающейся волной, и потому движется с ее фазовой скоростью (Phillips, 1985), в то время как движение геометрического центра остаточной пены принимает колебательный характер, отражая орбитальные движения проходящих длинных волн. Время жизни каждой из фаз, так же сильно отличается. Если в активной фазе барашек живет порядка  $0.3T-0.8T$  (Phillips et al., 2001; Korinenko et al., 2022), то пассивная фаза существует десятки секунд (Callaghan et al., 2012). Здесь  $T$  – период обрушивающейся волны.

Таким образом, к основным признакам обрушения в активной фазе можно отнести следующее: барашек движется в направлении распространения обрушающихся волн с вполне определенной скоростью, и его площадь растет в течение  $\sim 0.3T-0.8T$  с (Mironov, Dulov, 2008; Kleiss, Melville, 2010; Kleiss, Melville, 2011).

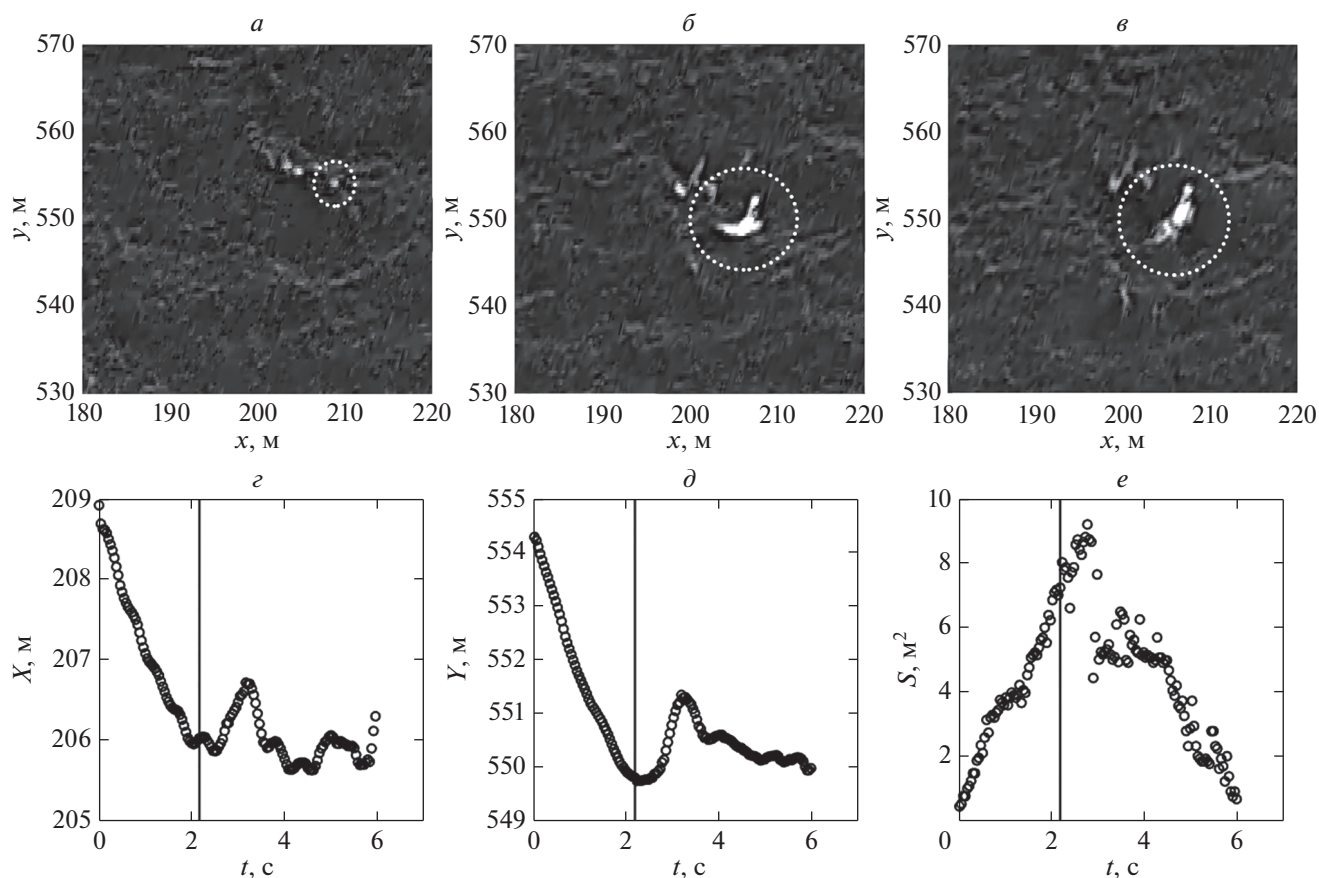
На рис. 2, *a–2, в* приведен пример эволюции пенного образования с момента  $t = 0$  с, соответствующего началу регистрации обрушения, до момента  $t = 3.21$  с, когда на морской поверхности осталось лишь пятно растекшейся пены. Значения  $\Delta$  показанного на рис. 2 фрагмента видеокадра составляют  $\Delta x = 0.3$  м и  $\Delta y = 0.5$  м по осям  $x$  и  $y$ , соответственно. Эволюция геометрических параметров обрушения, выделенного пунктирным

кружочком, подробно показана на рис. 2, *г–2, д*. Как следует из рис. 2, *г–2, д* пенное образование движется поступательно в течение 2.17 с, и в этом интервале времени наблюдается рост площади барашка (рис. 2, *е*). При  $t > 2.17$  с координаты геометрического центра пенного образования начинают повторять орбитальные движения, связанные с проходящими длинными волнами. При этом площадь продолжает расти, а затем начинает уменьшаться, из-за распада сплошной белой области на отдельные части. Учитывая кинематические свойства пенной структуры в различных фазах, можно утверждать, что данные правее прямой линии на рис. 2, *г–2, е* относятся к остаточной пене. Соответственно, в течение 2.17 с рассматриваемое обрушение движется в активной фазе со скоростью  $c_{br} = \sqrt{(\partial X/\partial t)^2 + (\partial Y/\partial t)^2}$ , где  $X, Y$  – координаты геометрических центров обрушения (рис. 2, *г, 2, д*). Будем считать эту скорость равной фазовой скорости обрушивающейся волны, как предложено в (Phillips, 1985). Тогда, используя дисперсионное соотношение гравитационных волн на глубокой воде, оценим период несущей волны  $T = 2\pi c_{br}/g$ , где  $g$  – ускорение свободного падения.

Для рассматриваемого случая период обрушивающейся волны составляет  $T = 1.5$  с и, соответственно, время жизни в активной фазе оценивается от 0.45 с до 1.2 с (Phillips et al., 2001; Korinenko et al., 2022). Эта оценка времени жизни меньше значения 2.17 с, указанного прямой линией на рис. 2, *г–2, е*. Следует отметить, что площадь в момент обнаружения составляет  $0.5$  м<sup>2</sup>, а длина гребня равна 0.45 м. Соответственно, обрушение на рис. 2 идентифицировано при помощи порогового метода не в момент его зарождения, а спустя некоторый промежуток времени. В результате, большую часть времени левее прямой линии пенная структура представляет смешанный вид, а именно, заканчивающуюся активную фазу и формирующуюся остаточную пену. Подобная особенность, может быть связана с тем, что при пространственным разрешении несколько дециметров и более остаточная пена на изображениях будет представлять собой не разрозненную пятнистую структуру, а сплошную белую область с продолжающимся вовлечением близко расположенных отдельных пенных структур.

Таким образом, при малом пространственном разрешении отделить обрушение в активной фазе от пассивной примеси достаточно затруднительно.

Следующий случай представлен на рис. 3, где приведен пример эволюции трех отдельных пенных образований с момента  $t = 0$  с, когда обрушение под номером 3 идентифицируется впервые, до момента их объединения в видеокadre в цельную структуру. Как видно по серии кадров, пред-



**Рис. 2.** Эволюция индивидуального обрушения, отмеченного кружочком: *a–в* – последовательность трансформированного на горизонтальную плоскость фрагмента кадра, в моменты времени 0 (*a*), 2.17 (*б*), 3.21 с (*в*); *z, д* – изменение во времени координат  $X$  и  $Y$  геометрического центра; *e* – зависимость площади обрушения от времени. Вертикальная прямая соответствует времени окончания прямолинейного движения барашка.

ставленных на рис.3, по мере увеличения площади обрушений происходит их слияние в единую область. Первоначально происходит объединение обрушений под номерами 2 и 3 в обрушение под номером 3 (рис. 3, *б*). Затем наблюдается слияние обрушений под номерами 1 и 3. Отметим, что объединение соседних обрушений в один барашек на видеокadre может быть вызвано как реальным их слиянием, так и связано с пространственным разрешением. Пространственное разрешение трансформированного изображения на рис. 3, *a–3, в* составляет 0.3 и 0.5 м по оси абсцисс и ординат, соответственно.

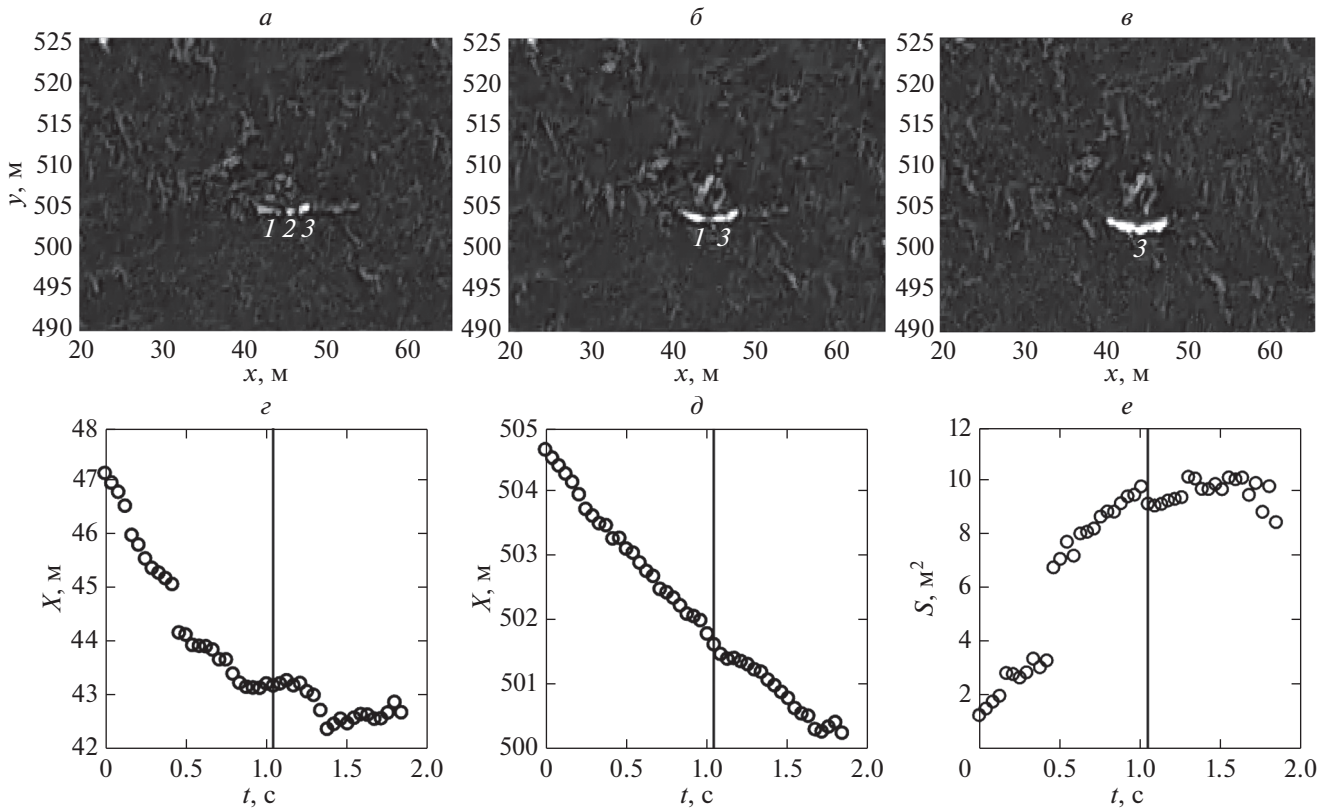
Эволюция геометрических параметров обрушения под номером 3 подробно показана на рис. 3, *z–3, e*. Моменты слияния обрушений отчетливо видны по скачкам  $X$  координаты геометрического центра и значений площади при  $t = 0.125$  с и  $t = 0.42$  с на рис. 3, *z, 3, e*.

Отметим, что кинематические характеристики левее прямой на рис. 3, *z–3, e* в целом соответствуют активной фазе барашка. Однако объединение небольших пенных структур в одну об-

ласть на изображении приводит к искажению определяемых характеристик отдельного обрушения, например, времени жизни, длины гребня и площади барашка.

В результате детального анализа большого массива данных об эволюции геометрических характеристик единичных пенных образований и представленных выше примеров можно сделать следующие выводы.

Одно и то же обрушение может занимать разное количество пикселей на изображениях с различным пространственным разрешением. К примеру, небольшое обрушение (линейный размер несколько дециметров) при пространственном разрешении порядка нескольких сантиметров займет десяток пикселей и отраженный от обрушения свет будут формировать полностью яркость данных пикселей. При грубом пространственном разрешении (несколько дециметров – метры) линейные размеры обрушения могут быть меньше элемента пространственного разрешения, вследствие чего яркость в пикселе, формируемая барашком, будет занижена из-за рассеяния от



**Рис. 3.** Фрагменты видеокadres участка морской поверхности, трансформированные на горизонтальную плоскость, показывающие группу идентифицированных обрушений, отмеченных цифрами 1, 2, 3, и эволюцию геометрических параметров обрушения 3: *a* – для момента времени  $t = 0$  с, соответствующего регистрации барашка 3, *б* – для момента времени  $t = 0.17$  с, *в* – для момента времени  $t = 0.58$  с; *z*, *д* – изменения во времени координат  $X$  и  $Y$  геометрического центра обрушения 3; *е* – зависимость от времени площади обрушения 3 с последующим его объединением с обрушениями 1 и 2. Вертикальная прямая отмечает окончание активного роста площади.

прилегающего участка морской поверхности. В результате яркость пенной структуры может оказаться ниже порогового уровня и соответственно не будет обнаружена при регистрации.

С другой стороны, при фактических значениях  $[\Delta x, \Delta y]$ , составляющих дециметры – метры, идентификация барашка происходит не в момент его зарождения, а через некоторый промежуток времени, после которого выполняется условие  $I > I_0$ . Это не позволяет правильно определить продолжительность активной фазы обрушения.

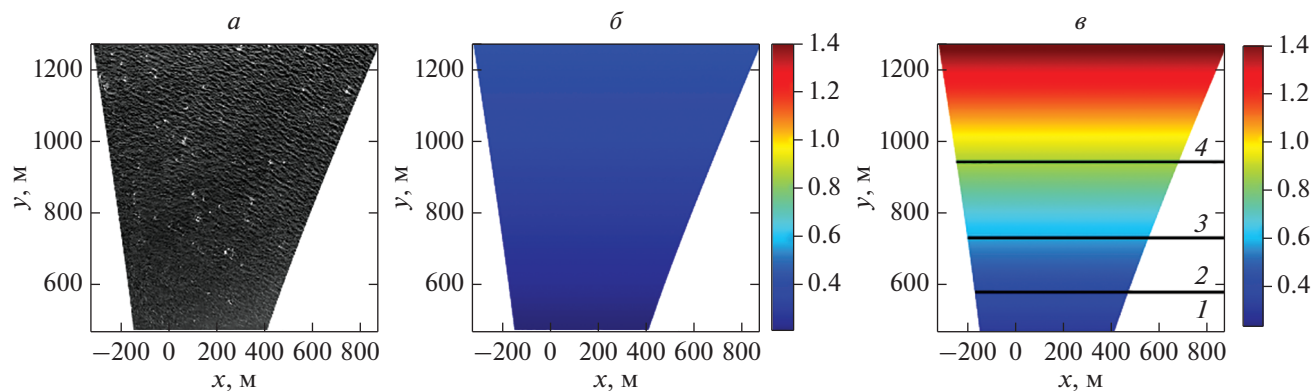
Как было сказано выше, окончание активной фазы обрушения сопровождается появлением остаточной пены, которая представляет собой пятнистую структуру. На изображениях с малым пространственным разрешением отдельные пятна пены будут выглядеть как сплошная яркая область. Соответственно, в этом случае, отделить активную фазу обрушения от пассивной примеси проблематично.

Как известно, доминантные волны практически не обрушиваются, однако вызывают модуляцию более коротких волн (Dulov et al., 2002; Dulov

et al., 2021). В результате происходит концентрация обрушений малых пространственных масштабов на гребне длинной волны. И если при пространственном разрешении в несколько сантиметров мы можем с достаточной точностью их различать (Dulov et al., 2021), то при малом пространственном разрешении в несколько дециметров и более, невозможно отдельно идентифицировать находящиеся рядом небольшие обрушения, максимальная длина гребня которых имеет размер несколько дециметров и менее.

#### *Влияние пространственного разрешения на статистические характеристик обрушений*

Как показано выше при малом пространственном разрешении возникают трудности с достоверным определением активной фазы обрушения, что может приводить к ошибкам при определении кинематических характеристик барашков. Нам не удалось найти работ, посвященных анализу регистрации обрушений с БПЛА, в которых рассматривается эта проблема. Рассмотрим на полученных нами данных особенности иденти-



**Рис. 4.** Трансформированный на горизонтальную плоскость выделенный на рис. 1 фрагмент изображения: *a* – участок морской поверхности; *б* – разрешение по *x* координате; *в* – разрешение по *y* координате. Черными линиями выделяются зона 1 со средним значением  $\Delta y = 0.35$  м, зона 2 с  $\Delta y = 0.4$  м, зона 3 с  $\Delta y = 0.65$  м, зона 4 с  $\Delta y = 1.1$  м. Цветные шкалы показывают значения.

фикации обрушений при разном пространственном разрешении.

Обрушения на фоне морской поверхности идентифицировались с использованием алгоритмов (Mironov, Dulov, 2008). Выделялась лишь активная фаза обрушений, а пятна растекшейся пены, оставшейся после прохождения обрушения, автоматически отфильтровывались. Дополнительную информацию об алгоритме, см. в (Mironov, Dulov, 2008), а также в других исследованиях, где проиллюстрированы примеры эволюции геометрических характеристик барашков (см., например, рис. 3 и 4 в (Pivaev et al., 2021) и рис. 3 в (Koginenko et al., 2020)).

Для последующего анализа полученные нами в эксперименте исходные видеокadres с учетом известной геометрии наблюдений были трансформированы в прямоугольную систему горизонтальных координат, расположенную на среднем уровне моря. В качестве примера на рис. 4, *a* представлен трансформированный фрагмент видеокadra, показанный на рис. 1. Начало системы координат на рис. 4 соответствует точке пересечения нормали, проведенной вниз с БПЛА, с морской поверхности. Площадь рассматриваемого участка составляет  $0.7 \text{ км}^2$ . Карты пространственного разрешения по координатам *x* и *y* представлены на рис. 4, *б*, 4, *в*, соответственно. Как следует из рис. 4, *б* пространственный шаг  $\Delta x$  между пикселями изображений вдоль вертикальной оси меняется незначительно от 0.2 до 0.4 м, в то время как величина  $\Delta y$  на рис. 4, *в* существенно изменяется от 0.3 до 1.4 м.

Выделим на рис. 4, *в* черными горизонтальными линиями, зоны, обозначенные цифрами 1, 2, 3, 4, в которых значения  $\Delta y$  соответственно меняются в пределах 0.3–0.4, 0.3–0.5, 0.5–0.8, 0.8–1.4 м. Здесь мы обозначили эти зоны исключительно

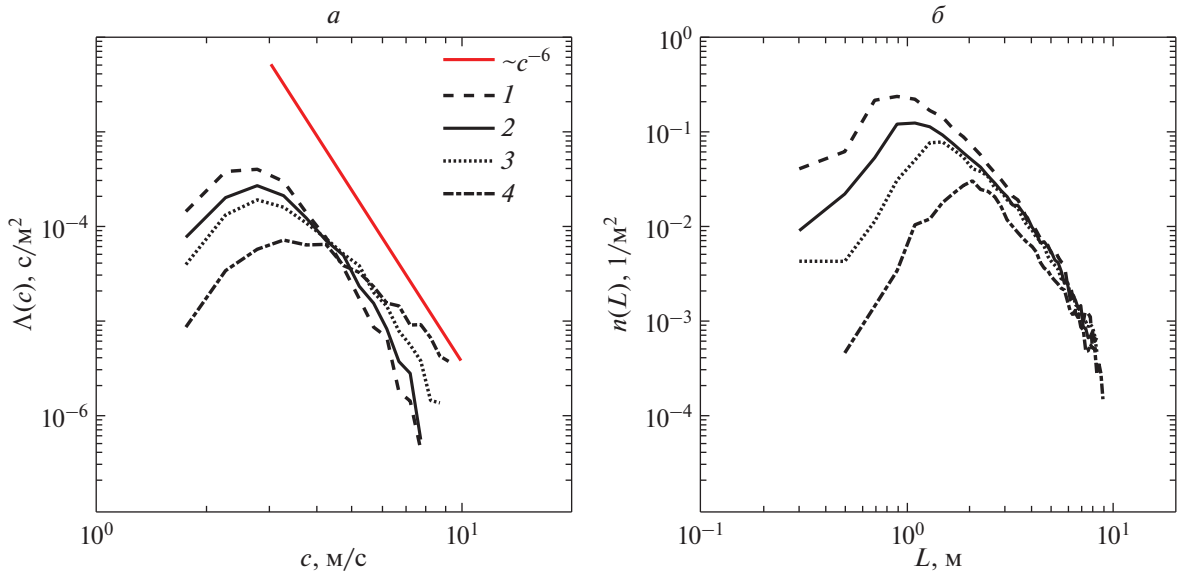
для последующей иллюстрации предварительной оценки влияния  $\Delta$  на результаты определения характеристик обрушений.

Поскольку размеры рассматриваемого участка моря на рис. 4, *a* составляют  $0.7 \text{ км}^2$  будем считать, что в его пределах метеорологические и волновые условия не изменяются. В предположении пространственной статистической однородности случайных значений характеристик обрушений, можно полагать, что возможное изменение измеряемых параметров пенных структур будет связано, в основном, с их положением на видеозображении, то есть, с различием значений в массивах  $\Delta x$  и  $\Delta y$ .

Рассмотрим влияние пространственного разрешения на статистические характеристики обрушений ветровых волн, на примере лямбда распределения  $\Lambda(c)$  и распределения длин гребней обрушений  $n(L)$ . Согласно (Phillips, 1985), 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 и является важным параметром при описании многих динамических процессов верхнего слоя моря. Интеграл  $\int \Lambda(c)dc$  представляет собой полную длину обрушивающихся гребней на единице площади морской поверхности. Моменты более высокого порядка описывают динамические свойства обрушений. К примеру, потери энергии, обусловленные обрушениями, связаны с  $\Lambda(c)$  выражением:

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

Одномерное распределение  $\Lambda(c)$  по данным наших измерений оценивалось следующим обра-



**Рис. 5.** Распределение статистических характеристик обрушений ветровых волн: *a* – лямбда распределение, красной линией показана зависимость  $\Lambda(c) \sim c^{-6}$ ; *б* – гистограмма длин гребней обрушений на единице морской поверхности.

зом:  $\Lambda(c) = \frac{1}{S\Delta cN} \sum_k L_k |c_k \in [c, c + \Delta c]$ , где  $S$  – площадь рассматриваемого участка;  $\Delta c$  – интервал скорости;  $N$  – количество видеок кадров;  $L_k$  – длина  $k$ -го пенного гребня обрушивающейся волны.

На рис. 5, *a* линиями показаны  $\Lambda(c)$ , полученные для четырех участков трансформированного изображения. Границы этих областей отмечены горизонтальными линиями на рис. 4, *a*, *б*, а цифрами – номер зоны. Как следует из рис. 5, *a*, распределения  $\Lambda(c)$  для зон 1–3 имеют ряд общих особенностей. Характерной чертой является наличие максимума  $\Lambda(c)$  в окрестности  $c = 3$  м/с. Для скоростей барашков, превышающих скорость, соответствующую максимуму  $\Lambda(c)$ , функциональная зависимость  $\Lambda(c)$  от  $c$  хорошо соответствует закону  $\Lambda(c) \sim c^{-6}$  (Phillips, 1985). Иная ситуация наблюдается для данных, полученных в четвертой области. Максимум функции  $\Lambda(c)$  не так выражен и лежит в окрестности  $c = 3.2$ – $4.5$  м/с, а наклон кривой правее максимума меньше теоретической зависимости  $\Lambda(c) \sim c^{-6}$ . К тому же, для обрушений, движущихся со скоростями в диапазоне  $1.75$ – $3.5$  м/с, значение  $\Lambda(c)$  в зоне 4 на порядок меньше, чем в зоне 1. Отметим, что именно в зоне 4 наблюдается наихудший элемент пространственного разрешения.

Подобный характер наблюдается и для представленных на рис. 5, *б* гистограммах длин гребней обрушений на единице морской поверхности. Если максимумы гистограмм для 1 и 2 зон лежат в

районе  $L \sim 1$  м и минимальные регистрируемые размеры длин обрушений  $L_{\min}$  составляют  $0.3$  м, то для зоны 4 максимум  $n(L)$  лежит в окрестности  $L \sim 2$  м, а  $L_{\min}$  составляют  $\sim 0.6$  м. Количество регистрируемых обрушений на единицу поверхности с размерами  $0.3$ – $0.6$  м в зоне 4 на несколько порядков меньше, чем в зонах 1 и 2.

Отметим, что представленные на рис. 5, *б* результаты в целом объясняют различия  $\Lambda(c)$  в зонах 1–4. Действительно, в зонах 2–4 по отношению к зоне 1 значения максимумов  $n(L)$  уменьшаются, и они смещаются в область больших  $L$ . Как отмечалось выше, яркость пенной структуры с ухудшением разрешения может лежать ниже порогового уровня, что приводит к уменьшению количества идентифицируемых барашков. В этом случае начинают идентифицироваться более длинные обрушения, статистика более мелких барашков становится необеспеченной и максимумы  $n(L)$  сдвигаются вправо тем больше, чем хуже пространственное разрешение.

Поскольку лямбда функция определяется суммарной длиной гребней идентифицированных обрушений в интервале  $(c, c + dc)$ , то с увеличением минимальных значений регистрируемых  $L$ , имеющих большую скорость, максимумы распределений  $\Lambda(c)$  для зон 2–4 также смещаются вправо.

Таким образом, регистрируемые распределения длин обрушений и  $\Lambda(c)$  будут существенно зависеть от пространственного разрешения обрабатываемого видео изображения.



Представляется целесообразным сравнение характеристик обрушений, полученных в нашем эксперименте, с результатами, известными в литературе. Это позволит оценить достоверность измерений пенных структур с БПЛА при различных значениях  $\Delta$ . Анализ полученных данных показал, что максимальное значение пространственного разрешения, при котором результаты наших исследований удовлетворительно согласуются с результатами других авторов, составляет 0.5 м. Ниже рассмотрим статистические характеристики обрушений, полученных для тех видеозаписей или частей кадров, где для элементов массива пространственных разрешений выполнялось условие  $\Delta x \leq 0.5$  м,  $\Delta y \leq 0.5$  м.

### СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРУШЕНИЙ ВЕТРОВЫХ ВОЛН ПО ДАННЫМ БПЛА

В данной главе рассмотрены геометрические характеристики обрушений: доля морской поверхности, покрытая пеной обрушающихся волн  $Q$ , отношение длины гребня обрушения  $L$  к длине обрушающейся волны  $\lambda$  и распределение Филлипса  $\Lambda(c)dc$ . Эти величины были получены при анализе видеозаписей с БПЛА и представлены на рис. 6, на котором также приведены результаты, заимствованные из работы Korinenko et al., 2020). Отметим, что данные в (Korinenko et al., 2020) получены с помощью видеокамеры, расположенной на стационарной океанографической платформе на высоте 11.4 м над уровнем моря и пространственное разрешение составляло 0.03–0.05 м.

Доля морской поверхности, покрытая пеной обрушающихся волн, один из основных индикаторов динамических процессов взаимодействия атмосферы и океана. Традиционно изменение  $Q$  в зависимости от скорости ветра описывается степенным законом, где показатель степени принимает значения  $\sim 2.5$ – $5$  (см., например, обзор в (Brumer et al., 2017; Kleiss, Melville, 2010)). На рис. 6, а представлена зависимость  $Q$  от  $U$ , где данные БПЛА представлены красными символами (○), а черные символы (●) демонстрируют результаты, заимствованные из работы (Korinenko et al., 2020). Вся группа данных на рис. 6, а хорошо аппроксимируется зависимостью  $Q = 3.5 \times 10^{-4} U^{2.3}$ , показанной сплошной линией (Korinenko et al., 2020), которая в свою очередь согласуется с результатами более ранних исследований (см., например, (Mironov, Dulov, 2008; Kleiss, Melville, 2010; Brumer et al., 2017)). Отметим, что данные БПЛА получены при более слабых ветрах.

Согласно идеям О. М. Филлипса (Phillips, 1989) геометрические размеры обрушений подобны и длина гребня обрушения пропорциональна длине обрушающейся волны. В работе (Korinenko

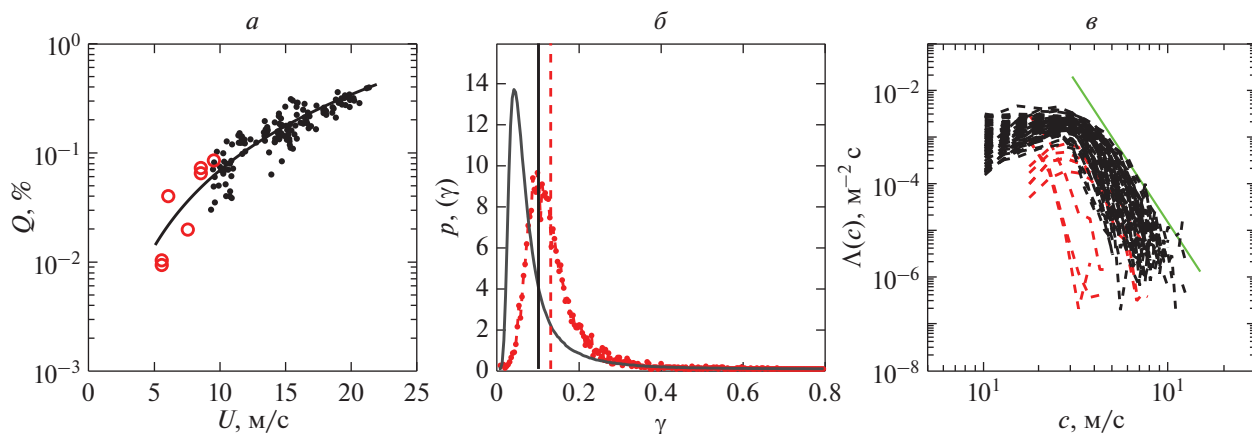
et al., 2020) показано, что плотности вероятности величин  $L/\lambda$ , рассчитанные для различных ветровых и волновых условий, подобны и имеют небольшой разброс. Среднее значение отношений  $L/\lambda$ , полученных для всех измерений, составляет 0.1.

Рассмотрим отношения длины гребня обрушения к длине обрушающейся волны  $\gamma = L/\lambda$ . В предположении, что скорость обрушения равна фазовой скорости обрушающейся волны,  $\lambda$  связана с фазовой скоростью  $c$  дисперсионным соотношением  $\lambda = 2\pi g^{-1} c^2$ . Для всех полученных данных рассчитывалась гистограмма  $H(\gamma)$  и строилось распределение  $p(\gamma) = \sum_{i=1}^m H(\gamma)/(m\Delta\gamma)$ , где  $m$  и  $\Delta\gamma$  – число отсчетов и интервал гистограммы соответственно. На рис. 6, б красными символами (●) показаны  $p(\gamma)$  для данных настоящей работы, черная линия соответствует распределению  $p(\gamma)$ , заимствованному из работы (Korinenko et al., 2020). Как видно, форма распределения  $p(\gamma)$  для наших измерений близка к полученной ранее в (Korinenko et al., 2020). Так же близки средние значения  $\bar{\gamma} = \int \gamma p(\gamma) d\gamma$ ,  $\bar{\gamma} = 0.1$  для данных (Korinenko et al., 2020) и  $\bar{\gamma} = 0.13$  для данных настоящей работы.

На рис. 6, в красными линиями представлены  $\Lambda(c)$  рассчитанные по данным БПЛА. Черные линии показывают результаты (Korinenko et al., 2020), полученные на основе видеоизмерений на океанографической платформе. Как видно из рис. 6, в, для скоростей барашков, превышающих скорость, соответствующую максимуму  $\Lambda(c)$ , функциональная зависимость  $\Lambda(c)$  от  $c$  близка к закону  $\Lambda(c) \sim c^{-6}$ . Данные настоящей работы лежат ниже, представленных в (Korinenko et al., 2020). В первую очередь это связано с тем, что измерения с БПЛА проводились при более слабых ветрах, а в соответствии с (Phillips, 1989) одномерное распределение  $\Lambda(c)$  имеет вид  $\Lambda(c) \sim u_*^3 c^{-6}$ , где  $u_*$  – скорость трения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты использования БПЛА для исследования процессов обрушения гравитационных волн. Эксперименты проводились в прибрежной зоне западного Крыма (район г. Севастополь) в диапазоне скоростей ветра от 5.5 до 9.5 м/с. Определение геометрических размеров обрушений в активной фазе, скоростей их движения осуществлялось по видеозаписям морской поверхности, полученных с беспилотного летательного аппарата. Такие измерения



**Рис. 6.** Геометрические характеристики обрушений: *a* – зависимость доли морской поверхности, покрытой обрушениями, от скорости ветра; *b* – распределение отношения длины гребня обрушения к длине обрушивающейся волны, вертикальная красная штриховая линия – среднее значение  $\gamma = 0.13$ , черная сплошная – среднее значение, равное 0.1, полученное в работе (Кориненко и др. Korinenko et al., 2020); *c* – лямбда распределение. Зеленой линией показана зависимость  $\Lambda(c) \sim c^{-6}$ .

позволяют осуществлять обзор большой акватории моря, повышая статистическую обеспеченность характеристик барашков. В то же время, в зависимости от геометрии съемки (например, высоты полета, угла визирования камеры, параметров объектива), пространственное разрешение трансформированных изображений морской поверхности может существенно ухудшаться.

Как показал анализ временной эволюции единичных пенных образования, при разделении активной фазы и остаточной пены ключевую роль играет пространственное разрешение  $\Delta$  видеозаписей.

Показано, что при разрешении несколько дециметров – метр, характерном при панорамных съемках моря с БПЛА, яркость обрушений с длиной гребня, занимающей часть пикселя видеокadra, может оказаться ниже порога, необходимого для идентификации барашка. В результате данное обрушение не будет идентифицировано. Активная фаза барашка и разрозненные пятна остаточной пены выглядят как единая сплошная белая область. Соответственно большую часть времени жизни регистрируемой пенной структуры может представлять ее смешанный вид, являющийся заканчивающейся активной фазой обрушения и формирующейся остаточной пеной. При недостаточном пространственном разрешении близко расположенные пятна пены будут формировать на изображении единую область, что затрудняет выделение только активной фазы обрушения. Данные эффекты приведут к искажению определяемых характеристик отдельного обрушения, например, времени жизни, длины гребня и площади барашка.

В результате обработки полученных в эксперименте данных показано, что зависимости  $\Lambda(c)$ , рассчитанные по участкам видеоизображений, где  $\Delta \leq 0.8$  м, правее максимума удовлетворительно описываются степенным законом  $\Lambda(c) \sim c^{-6}$ , совпадающим с предложенным в (Phillips, 1985). При  $\Delta > 0.8$  м наклон лямбда функции существенно уменьшается до  $\Lambda(c) \sim c^{-4.5}$ . Аналогичный характер имеют гистограммы длин гребней обрушений на единице поверхности. Если при  $\Delta \leq 0.8$  м уровни гистограмм правее их максимумов практически совпадают, то для областей видеокadров с  $\Delta > 0.8$  м значения  $n(L)$  приблизительно в 1.5 раза меньше.

Анализ полученных данных показал, что при используемой в эксперименте видеоаппаратуре удовлетворительное соответствие наших результатов, с представленными другими авторами, достигается при пространственном разрешении лучше 0.5 м. Показано, что рассчитанная доля морской поверхности, покрытая пеной обрушающихся волн, дополняет данные (Korinenko et al., 2020) и хорошо согласуется с зависимостью  $Q = 3.5 \times 10^{-4} U^{2.3}$ . Полученная нами плотность вероятности отношения длины гребня барашка к длине обрушивающейся волны и среднее значение  $\bar{\gamma} = 0.13$  близки к  $p(\gamma)$ , и величине  $\bar{\gamma} = 0.1$ , представленным в (Korinenko et al., 2020). Сопоставление зависимостей с результатами (Korinenko et al., 2020) показало, что, наши данные, как и у других авторов близки к закону

Полученные результаты показывают, что использование беспилотных летательных аппаратов позволяет исследовать статистические характе-

ристики и кинематику обрушений ветровых волн. В то же время, необходимо учитывать влияние пространственного разрешения в видеокадре, которое при значениях, сопоставимых или превышающих масштаб обрушения может приводить к искажению или пропуску данных измерений.

Работа выполнена в рамках государственных заданий FNNN-2021-0004 и 0763-2020-0005, натурные данные получены по проекту Российского научного фонда № 21-17-00236, <https://rscf.ru/project/21-17-00236/>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г., Шарков Е.А.* Статистические характеристики пенных образований на взволнованной морской поверхности // *Океанология*. 1982. Т. 22. № 3. С. 372–379.
- Бондур В.Г., Шарков Е.А.* Статистические характеристики элементов линейной геометрии пенных структур на поверхности моря по данным оптического зондирования // *Исслед. Земли из космоса*. 1986. № 4. С. 21–31.
- Бортковский Р.С.* К оценке среднего обмена кислородом и CO<sub>2</sub> между океаном и атмосферой в ключевых районах океана // *Изв. РАН. ФАО*. 2006. Т. 42. № 2. С. 250–257.
- Шарков Е.А.* Обрушающиеся морские волны: структура, геометрия, электродинамика. М.: Научный мир, 2009. 304 с.
- Anguelova M.D., Bettenhausen M.H.* Whitecap fraction from satellite measurements: Algorithm description // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2019 V. 124. Iss. 3. P. 1827–1857. <https://doi.org/10.1029/2018JC014630>
- Anguelova M.D., Webster F.* Whitecap coverage from satellite measurements: A first step toward modeling the variability of oceanic whitecaps // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2006. V. 111 Iss. C03017. P. 1–23. <https://doi.org/10.1029/2005JC003158>
- Babanin A.V.* Breaking of ocean surface waves // *Acta Phys. Slovaca*. 2009. V. 59. № 4. P. 305–535. <https://doi.org/10.2478/v10155-010-0097-5>
- Bouguet J.Y.* Camera calibration toolbox for MATLAB, Computational Vision Group, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA, 2001.
- Brouwer R.L., de Schipper M.A., Rynne P.F., Graham F.J., Reniers A.J. H.M., MacMahan J.H.* Surfzone Monitoring Using Rotary Wing Unmanned Aerial Vehicles // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2015. V. 32. Iss. 4. P. 855–863. <https://doi.org/10.1175/jtech-d-14-00122.1>
- Brumer S.E., Zappa C.J., Brooks I.M., Tamura H., Brown S.M., Blomquist B.W.* Cifuentes-Lorenzen, A. Whitecap coverage dependence on wind and wave statistics as observed during SO GasEx and HiWinGS // *J. Physical Oceanography*. 2017. V. 47. Iss. 9. P. 2211–2235. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0005.1>
- Callaghan A.H., Deane G.B., Stokes M.D., Ward B.* Observed variation in the decay time of oceanic whitecap foam // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2012. V. 117. Iss. C9. <https://doi.org/10.1029/2012JC008147>
- Dulov V.A., Korinenko A.E., Kudryavtsev V.N., Malinovsky V.V.* Modulation of Wind-Wave Breaking by Long Surface Waves // *Remote Sens*. 2021. V. 13. № 14. 2825. P. 1–15. <https://doi.org/10.3390/rs13142825>
- Dulov V.A., Kudryavtsev V.N., Bol'shakov A.N.* A field study of white caps coverage and its modulations by energy containing waves // *In Gas Transfer at Water Surface. Geophys. Monogr. / Ed. Donelan M.A., Drennan W.M., Saltzman E.S., Wanninkhof R.* AGU: Washington DC. USA, 2002. P. 187–192.
- Dulov V.A., Kudryavtsev V.N., Sherbak O.G., Grodsky S.A.* Observations of Wind Wave Breaking in the Gulf Stream Frontal Zone // *Glob. Atmos. Ocean. Syst.* 1998. V. 6. № 3. P. 209–242.
- Gemmrich J.R., Banner M.L., Garrett C.* Spectrally resolved energy dissipation rate and momentum flux of breaking waves // *J. Physical Oceanography*. 2008. V. 8. Iss. 6. P. 1296–1312. <https://doi.org/10.1175/2007JPO3762.1>
- Holman R.A., Brodie K.L., Spore N.J.* Surf Zone Characterization Using a Small Quadcopter: Technical Issues and Procedures // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2017. V. 55. Iss. 4. P. 2017–2027. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2016.2635120>
- Kleiss J.M., Melville W.K.* Observations of wave breaking kinematics in fetch-limited seas // *J. Physical Oceanography*. 2010. V. 40. Iss. 12. P. 2575–2604. <https://doi.org/10.1175/2010JPO4383.1>
- Kleiss J.M., Melville W.K.* The analysis of sea surface imagery for whitecap kinematics // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2011. V. 28. Iss. 2. P. 219–243. <https://doi.org/10.1175/2010JTECHO744.1>
- Klemas V.V.* Coastal and environmental remote sensing from unmanned aerial vehicles: An overview. // *J. Coastal Research*. 2015. V. 31. № 5. P. 1260–1267. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00005.1>
- Korinenko A.E., Malinovsky V.V., Kudryavtsev V.N.* Experimental Research of Statistical Characteristics of Wind Wave Breaking // *Physical Oceanography*. 2018. V. 25. Iss. 6. P. 489–500. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2018-6-489-50>
- 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. V. 27. Iss. 5. P. 472–488. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2020-5-472-488>
- 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. V. 15. № 1. P. 61–72. <https://doi.org/10.48612/fpg/5g5t-4mzd-94ab>
- Kubryakov A.A., Kudryavtsev V.N., Stanichny S.V.* Application of Landsat imagery for the investigation of wave breaking // *Remote Sens. Environ*. 2021. V. 253. P. 112144. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112144>
- Kubryakov A.A., Lishaev P.N., Chepyzhenko A.I., Aleskerova A.A., Kubryakova E.A., Medvedeva A.V., Stanichny S.V.* Impact of Submesoscale Eddies on the Transport of Suspended Matter in the Coastal Zone of Crimea Based on Drone, Satellite, and In Situ Measurement Data // *Ocean-*

- ology. 2021. V. 61. № 2. P. 159–172.  
<https://doi.org/10.1134/S0001437021020107>
- Kudryavtsev V.N., Dulov V.A., Shrira V., Malinovsky V.V.* On vertical structure of wind-driven sea surface currents. // *J. Phys. Oceanogr.* 2008. V. 38. Iss. 10. P. 2121–2144.  
<https://doi.org/10.1175/2008JPO3883.1>
- Melville W.K., Matusov P.* Distribution of breaking waves at the ocean surface // *Nature.* 2002. V. 417. Iss. 6884. P. 58–63.  
<https://doi.org/10.1038/417058a>
- Mironov A.S., Dulov V.A.* Detection of wave breaking using sea surface video records // *Measurement Science and Technology.* 2008. V. 19. № 1. 015405.  
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/1/015405>
- Monahan E.C., O’Muircheartaigh I.G.* Whitecaps and the passive remote sensing of the ocean surface. // *Int. J. Remote Sens.* 1986. V. 7. Iss. 5. P. 627–642.  
<https://doi.org/10.1080/01431168608954716>
- Osadchiv A., Barytova A., Sedakov R., Zhiba R., Dbar, R.* Spatial structure, short-temporal variability, and dynamical features of small river plumes as observed by aerial drones: Case study of the Kodor and Bzyp river plumes // *Remote Sensing.* 2020. V. 12. № 18. 3079. P. 1–30  
<https://doi.org/10.3390/rs12183079>
- Phillips O.M.* Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves // *J. Fluid Mech.* 1985. V. 156. P. 505–531.  
<https://doi.org/10.1017/S0022112085002221>
- 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 // *J. Physical Oceanography.* 2001. V. 31. Iss. 2. P. 450–460.  
[https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<0450:HRR-RMO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<0450:HRR-RMO>2.0.CO;2)
- Pivaev P.D., Kudryavtsev V.N., Korinenko A.E., Malinovsky V.V.* Field Observations of Breaking of Dominant Surface Waves // *Remote Sens.* 2021. V. 13. № 16. 3321.  
<https://doi.org/10.3390/rs13163321>
- Schwendeman M., Thomson J., Gemmrich J.R.* Wave breaking dissipation in a young wind sea // *J. Physical Oceanography.* 2014. V. 44. Iss. 1. P. 104–127.  
<https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-0237.1>
- Sutherland P., Melville W.K.* Field measurements and scaling of ocean surface wave-breaking statistics // *Geophysical Research Letters.* 2013. V. 40. Iss. 12. P. 3074–3079.  
<https://doi.org/10.1002/grl.50584>
- Sutherland P., Melville W.K.* Field Measurements of Surface and Near-Surface Turbulence in the Presence of Breaking Waves // *J. Physical Oceanography.* 2015. V. 45. Iss. 4. P. 943–965.  
<https://doi.org/10.1175/jpo-d-14-0133.1>
- Thorpe S.A., Belloul M.B., Hall A.J.* Internal waves and whitecaps // *Nature.* 1987. V. 330. P. 740–742.  
<https://doi.org/10.1038/330740a0>
- 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. V. 1. № 4. P. 353–384.  
[https://doi.org/10.1016/0278-4343\(83\)90003-1](https://doi.org/10.1016/0278-4343(83)90003-1)
- Wu L., Rutgersson A., Sahl’ee E.* Upper-ocean mixing due to surface gravity waves // *J. Geophysical Research: Oceans.* 2015. V. 120. Iss. 12. P. 8210–8228.  
<https://doi.org/10.1002/2015JC011329>
- Yurovskaya M., Rascle N., Kudryavtsev V., Chapron B., Marié L., Molemaker J.* Wave spectrum retrieval from airborne sunglitter images // *Remote sensing of Environment.* 2018. V. 217 P. 61–71.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.026>
- Yurovsky Y.Y., Kubryakov A.A., Plotnikov E.V., Lishaev P.N.* Submesoscale Currents from UAV: An Experiment over Small-Scale Eddies in the Coastal Black Sea // *Remote Sensing.* 2022. V. 14. № 14. 3364. P. 1–18.  
<https://doi.org/10.3390/rs14143364>

## Registration Peculiarities of Wind Waves Breaking From Unmanned Aerial Vehicles

A. E. Korinenko<sup>1,2</sup>, V. V. Malinovsky<sup>1,2</sup>, and A. A. Kubryakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Marine Hydrophysical Institute of Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

<sup>2</sup>*Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia*

The results of using an unmanned aerial vehicle (UAV) to study the processes of gravitational wave breaking are presented. The experiments were carried out in the coastal zone of the western Crimea (the area of Sevastopol) in the range of wind speeds from 5.5 to 9.5 m/s. The determination of the geometric dimensions of breaking and their speeds was carried out according to video recordings of sea surface obtained from the UAV. It is shown that the spatial resolution of the transformed image plays a key role in separating the active phase of breaking and residual foam. Errors occur in determining the kinematic properties of the breaking with a rough spatial resolution. The proportion of the sea surface covered with foam of breaking waves, the ratio of the maximum length of the spume to the length of the breaking wave, the distribution of the total breaking length in the intervals of movement speeds per surface unit (obtained from UAVs with a spatial resolution better than 0.5 m) are in agreement with results of other authors. Data analysis shows that the use of unmanned aerial vehicles makes it possible to study the statistical characteristics and kinematics of wind wave breaking. At the same time, it is necessary to take into account the effect of spatial resolution in the video frame, which can lead to distortion or omission of measurement data at values comparable to or exceeding the breaking scale.

**Keywords:** unmanned aerial vehicles (UAVs), remote sensing of the ocean, gravitational wave breaking, kinematic properties of breaking waves, portion of the sea surface covered with breaking foam

## REFERENCES

- Anguelova M.D., Bettenhausen M.H.* Whitecap fraction from satellite measurements: Algorithm description // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2019. V. 124. Iss. 3. P. 1827–1857.  
<https://doi.org/10.1029/2018JC014630>
- Anguelova M.D., Webster F.* Whitecap coverage from satellite measurements: A first step toward modeling the variability of oceanic whitecaps // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2006. V. 111. Iss. C03017. P. 1–23.  
<https://doi.org/10.1029/2005JC003158>
- Babanin A.V.* Breaking of ocean surface waves // *Acta Phys. Slovaca*. 2009. V. 59. № 4. P. 305–535.  
<https://doi.org/10.2478/v10155-010-0097-5>
- Bondur V.G., Sharkov E.A.* Statisticheskie karakteristiki elementov linejnoy geometrii pennyh struktur na poverhnosti morya po dannym opticheskogo zondirovaniya [Statistical characteristics of linear elements of foam formations on the sea-surface as derived from optical sounding data] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 1986. № 4. P. 21–31. (In Russian).
- Bondur V.G., Sharkov E.A.* Statistical properties of whitecaps on a rough sea // *Oceanology*. 1982. V. 22. № 3. P. 274–279.
- Bortkovskii R.S.* K ocenke srednego obmena kislorodom i SO<sub>2</sub> mezhdru okeanom i atmosferoj v klyuchevyh rajonah okeana [To estimate the average exchange of oxygen and CO<sub>2</sub> between the ocean and the atmosphere in key areas of the ocean] // *Izvestiya RAS. FAO*. 2006. V. 42. № 2. P. 250–257. (In Russian).
- Bouguet J.Y.* Camera calibration toolbox for MATLAB, Computational Vision Group, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA, 2001.
- Brouwer R.L., de Schipper M.A., Rynne P.F., Graham F.J., Reniers A.J. H.M., MacMahan J.H.* Surfzone Monitoring Using Rotary Wing Unmanned Aerial Vehicles // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2015. V. 32. Iss. 4. P. 855–863.  
<https://doi.org/10.1175/jtech-d-14-00122.1>
- Brumer S.E., Zappa C.J., Brooks I.M., Tamura H., Brown S.M., Blomquist B.W.* Cifuentes-Lorenzen, A. Whitecap coverage dependence on wind and wave statistics as observed during SO GasEx and HiWinGS // *J. Physical Oceanography*. 2017. V. 47. Iss. 9. P. 2211–2235.  
<https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0005.1>
- Callaghan A.H., Deane G.B., Stokes M.D., Ward B.* Observed variation in the decay time of oceanic whitecap foam // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2012. V. 117. Iss. C9.  
<https://doi.org/10.1029/2012JC008147>
- Dulov V.A., Korinenko A.E., Kudryavtsev V.N., Malinovsky V.V.* Modulation of Wind-Wave Breaking by Long Surface Waves // *Remote Sens*. 2021. V. 13. № 14. 2825. P. 1–15.  
<https://doi.org/10.3390/rs13142825>
- Dulov V.A., Kudryavtsev V.N., Bol'shakov A.N.* A field study of white caps coverage and its modulations by energy containing waves // *In Gas Transfer at Water Surface*. Geophys. Monogr. / Ed. Donelan M.A., Drennan W.M., Saltzman E.S., Wanninkhof R. AGU: Washington DC. USA, 2002. P. 187–192.
- Dulov V.A., Kudryavtsev V.N., Sherbak O.G., Grodsky S.A.* Observations of Wind Wave Breaking in the Gulf Stream Frontal Zone // *Glob. Atmos. Ocean. Syst.* 1998. V. 6. № 3. P. 209–242.
- Gemrich J.R., Banner M.L., Garrett C.* Spectrally resolved energy dissipation rate and momentum flux of breaking waves // *J. Physical Oceanography*. 2008. V. 8. Iss. 6. P. 1296–1312.  
<https://doi.org/10.1175/2007JPO3762.1>
- Holman R.A., Brodie K.L., Spore N.J.* Surf Zone Characterization Using a Small Quadcopter: Technical Issues and Procedures // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2017. V. 55. Iss. 4. P. 2017–2027.  
<https://doi.org/10.1109/tgrs.2016.2635120>
- Kleiss J.M., Melville W.K.* Observations of wave breaking kinematics in fetch-limited seas // *J. Physical Oceanography*. 2010. V. 40. Iss. 12. P. 2575–2604.  
<https://doi.org/10.1175/2010JPO4383.1>
- Kleiss J.M., Melville W.K.* The analysis of sea surface imagery for whitecap kinematics // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2011. V. 28. Iss. 2. P. 219–243.  
<https://doi.org/10.1175/2010JTECHO744.1>
- Klemas V.V.* Coastal and environmental remote sensing from unmanned aerial vehicles: An overview. // *J. Coastal Research*. 2015. V. 31. № 5. P. 1260–1267.  
<https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00005.1>
- 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. V. 15. № 1. P. 61–72.  
<https://doi.org/10.48612/fpg/5g5t-4mzd-94ab>
- Korinenko A.E., Malinovsky V.V., Kudryavtsev V.N.* Experimental Research of Statistical Characteristics of Wind Wave Breaking // *Physical Oceanography*. 2018. V. 25. Iss. 6. P. 489–500.  
<https://doi.org/10.22449/1573-160X-2018-6-489-50>
- 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. V. 27. Iss. 5. P. 472–488.  
<https://doi.org/10.22449/1573-160X-2020-5-472-488>
- Kubryakov A.A., Kudryavtsev V.N., Stanichny S.V.* Application of Landsat imagery for the investigation of wave breaking // *Remote Sens. Environ.* 2021. V. 253. P. 112144.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112144>
- Kubryakov A.A., Lishaev P.N., Chepyzhenko A.I., Aleskerova A.A., Kubryakova E.A., Medvedeva A.V., Stanichny S.V.* Impact of Submesoscale Eddies on the Transport of Suspended Matter in the Coastal Zone of Crimea Based on Drone, Satellite, and In Situ Measurement Data // *Oceanology*. 2021. V. 61. № 2. P. 159–172.  
<https://doi.org/10.1134/S0001437021020107>
- Kudryavtsev V.N., Dulov V.A., Shkira V., Malinovsky V.V.* On vertical structure of wind-driven sea surface currents. // *J. Phys. Oceanogr.* 2008. V. 38. Iss. 10. P. 2121–2144.  
<https://doi.org/10.1175/2008JPO3883.1>
- Melville W.K., Matusov P.* Distribution of breaking waves at the ocean surface // *Nature*. 2002. V. 417. Iss. 6884. P. 58–63.  
<https://doi.org/10.1038/417058a>
- Mironov A.S., Dulov V.A.* Detection of wave breaking using sea surface video records // *Measurement Science and Technology*. 2008. V. 19. № 1. 015405.  
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/1/015405>

- Monahan E.C., O'Muircheartaigh I.G.* Whitecaps and the passive remote sensing of the ocean surface // *Int. J. Remote Sens.* 1986. V. 7. Iss. 5. P. 627–642.  
<https://doi.org/10.1080/01431168608954716>
- Osadchiev A., Barymova A., Sedakov R., Zhiba R., Dbar R.* Spatial structure, short-temporal variability, and dynamical features of small river plumes as observed by aerial drones: Case study of the Kodor and Bzyp river plumes // *Remote Sensing.* 2020. V. 12. № 18. 3079. P. 1–30.  
<https://doi.org/10.3390/rs12183079>
- Phillips O.M.* Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves // *J. Fluid Mech.* 1985. V. 156. P. 505–531.  
<https://doi.org/10.1017/S0022112085002221>
- 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 // *J. Physical Oceanography.* 2001. V. 31. Iss. 2. P. 450–460.  
[https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<0450:HRR-RMO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<0450:HRR-RMO>2.0.CO;2)
- Pivaev P.D., Kudryavtsev V.N., Korinenko A.E., Malinovsky V.V.* Field Observations of Breaking of Dominant Surface Waves // *Remote Sens.* 2021. V. 13. № 16. 3321.  
<https://doi.org/10.3390/rs13163321>
- Schwendeman M., Thomson J., Gemmrich J.R.* Wave breaking dissipation in a young wind sea // *J. Physical Oceanography.* 2014. V. 44. Iss. 1. P. 104–127.  
<https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-0237.1>
- Sharkov E.A.* Obrushayushchiesya morskije volny: struktura, geometriya, elektrodinamika [Breaking seawaves: structure, geometry, electrodynamics] M.: Scientific World, 2009. 304 p. (In Russian).
- Sutherland P., Melville W.K.* Field measurements and scaling of ocean surface wave-breaking statistics // *Geophysical Research Letters.* 2013. V. 40. Iss. 12. P. 3074–3079.  
<https://doi.org/10.1002/grl.50584>
- Sutherland P., Melville W.K.* Field Measurements of Surface and Near-Surface Turbulence in the Presence of Breaking Waves // *J. Physical Oceanography.* 2015. V. 45. Iss. 4. P. 943–965.  
<https://doi.org/10.1175/jpo-d-14-0133.1>
- Thorpe S.A., Belloul M.B., Hall A.J.* Internal waves and whitecaps // *Nature.* 1987. V. 330. P. 740–742.  
<https://doi.org/10.1038/330740a0>
- 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. V. 1. № 4. P. 353–384.  
[https://doi.org/10.1016/0278-4343\(83\)90003-1](https://doi.org/10.1016/0278-4343(83)90003-1)
- Wu L., Rutgersson A., Sahl'ee E.* Upper-ocean mixing due to surface gravity waves // *J. Geophysical Research: Oceans.* 2015. V. 120. Iss. 12. P. 8210–8228.  
<https://doi.org/10.1002/2015JC011329>
- Yurovskaya M., Rasle N., Kudryavtsev V., Chapron B., Marié L., Molemaker J.* Wave spectrum retrieval from airborne sunglitter images // *Remote sensing of Environment.* 2018. V. 217 P. 61–71.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.026>
- Yurovsky Y.Y., Kubryakov A.A., Plotnikov E.V., Lishaev P.N.* Submesoscale Currents from UAV: An Experiment over Small-Scale Eddies in the Coastal Black Sea // *Remote Sensing.* 2022. V. 14. № 14. 3364. P. 1–18.  
<https://doi.org/10.3390/rs14143364>