

# МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРУШЕНИЙ ВЕТРОВЫХ ВОЛН, ОСНОВАННЫЙ НА ОБРАБОТКЕ ВИДЕОЗАПИСЕЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*А.С. Миронов, В.А. Дулов*

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: [wavedissipation@gmail.com](mailto:wavedissipation@gmail.com)

*Предложен метод обработки видеозаписей морской поверхности для исследования пространственно-временной эволюции индивидуальных событий обрушений ветровых волн. Метод основан на учете физических механизмов, связанных с наблюдаемыми явлениями. Описан алгоритм выделения активной фазы обрушений (фазы «А»). Дан краткий обзор возможностей метода. Приведены примеры распределений событий обрушений по их кинематическим параметрам.*

**Введение.** Обрушения ветровых волн - одно из наиболее важных физических явлений на морской поверхности. Активно перемешивая подповерхностный слой, обрушения океанических и морских волн играют главенствующую роль практически во всех вопросах тепло- и газообмена между океаном и атмосферой, процессах перемешивания верхнего океана, генерации аэрозоля лопающимися воздушными пузырьками [1, 2, 3]. Обрушаясь, ветровые волны теряют значительную часть энергии, по некоторым оценкам около 10% на каждое событие [4] и это является основным механизмом потери волновой энергии в условиях открытого океана [5]. Захваченный воздух, активно перемешиваясь с морской водой, образует белую пену, которая хорошо контрастирует с темной морской поверхностью. Таким образом, обрушения визуализируют процессы диссипации волновой энергии. Важное приложение исследований обрушений ветровых волн - радиолокация, поскольку особенности морской поверхности, связанные с обрушениями волн, т.е. заостренные гребни, зеркальные площадки, активная барашковая и растекшаяся пена, брызги и др., вносят существенный вклад в сечение обратного радиолокационного рассеяния [6].

Не смотря на очевидную важность рассматриваемого процесса, обрушения ветровых волн и явления связанные с ними относительно слабо изучены. Часто, изучаемые явления не имеют не только ясного физического, но и надежного эмпирического описания. Интенсивные нестационарные процессы, возникающие при пеногенерации, сложная взаимосвязь метеорологических и волновых характеристик, трудности при проведении измерений в натуральных условиях существенно осложняют накопление и дальнейшую обработку экспериментальных данных пригодных для совместного анализа. В частности, описание связей характеристик обрушений с конкретными параметрами ветровых волн и характеристиками приводной атмосферы и морской среды является предметом поисков и дискуссий [7, 5, 8]. Не смотря на пристальное внимание, по-прежнему уточняется связь доли запененной поверхности с метеорологическими и волновыми параметрами [9, 10]. По-видимому, одним из наиболее важных является вопрос о диапазоне ветровых волн, который дает основной вклад в статистики обрушений, в особенности в долю поверхности, покрытой барашками. Иными словами, вопрос о том, какие волны обрушиваются в характерных условиях океана. Для решения такого рода задач недостаточно традиционной информации о доле запененной поверхности и статистическом распределении барашков по размерам и площадям. Требуется измерение динамических характеристик событий, таких как скорость движения барашка, длина пробега, эволюция площадей и геометрических размеров зон обрушений с течением времени, распределение событий по направлениям движения.

Измерения в натуральных условиях затруднены из-за нестационарности как измеряемых процессов, так и сопутствующих измерению явлений в окружающей среде, таких как яркие солнечные тренды на морской поверхности, изменение освещенности связанное с облачностью, блики, порывы ветра, и т.д. Часть вышеперечисленных проблем можно избежать при измерениях в лабораторных условиях. Однако лабораторная специфика накладывает ряд ограничений на применимость полученных в результате таких исследований данных [11]. Кроме того, в лабораторных условиях можно изучать лишь ветровые волны, которые характеризуются малым разгоном - молодые или развивающиеся волны. Особенность молодого волнения состоит в том, что волны области спектрального пика (их длина для лабораторных лотков имеет порядок 1 м) интенсивно обрушиваются. Характерными условиями откры-

того океана являются устойчивые ветроволновые ситуации. Согласно работе [12], в этих условиях волны спектрального пика (с длиной от десятков до сотен метров) практически не обрушиваются, а обрушения сосредоточены в промежуточном ("равновесном") диапазоне ветровых волн. Степень развития волн традиционно характеризуется "обратным возрастом волн"  $U/C_p$ , где  $U$  - скорость ветра,  $C_p$  - фазовая скорость волн спектрального пика. Для молодых морских и океанических волн этот параметр равен 3-5, для "полностью развитых" волн - 0.83 [13], в то время как для лабораторных условий этот параметр часто достигает величины 6-10. Перечисленные лабораторные особенности, не позволяют полностью полагаться на лабораторные исследования, и обуславливают необходимость развития экспериментальных методологий пригодных для использования в условиях открытого моря или океана.

В настоящее время известен ряд методик дистанционной регистрации величин, которые можно отнести к мерам интенсивности обрушений ветровых волн. Можно выделить два подхода к измерениям: акустический и оптический. Акустические методы восстанавливают характеристики обрушений ветрового волнения, используя собственный шум обрушений или отраженный ими звуковой сигнал измерительного прибора. [15, 16, 17]. Одним из наиболее информативных и распространенных методов изучения распределений обрушений по геометрическим характеристикам и взаимному положению в пространстве, доли запененной поверхности стали фотографический [18, 19, 1, 20, 21] и видео [22, 23, 24, 25, 17, 26, 14]. В большей части этих работ выделение обрушений проведено «пороговым» методом, когда области морской поверхности с яркостью, превышающей заданный порог, рассматривались как зоны обрушений. Если некоторые оптические данные после предварительного анализа и отсева можно сопоставить и использовать для дальнейших исследований [21, 9, 10], то акустические данные сильно отличаются от оптических [15] и, более того, расхождения между оптическими и акустическими данными различными авторами достигают порядка величины. Одной из возможных причин разброса данных, помимо большого количества физических механизмов, влияющих на рассматриваемый

процесс [10], является отсутствие единых подходов и критериев в методиках при обработке и анализе измеряемых данных. Отсутствие эффективных и надежных методов автоматического выделения барашков на морской поверхности и связанная с этим необходимость ручной обработки данных или регулировки параметров измерительной аппаратуры сказывается существенным образом на качестве и полноте характеристик экспериментальных данных.

Бондур и Шарков [18]), а также Монахан [23] предложили называть барашки - активную фазу обрушений, фазой «А», а остаточную пену, которая может длительное время существовать на морской поверхности после исчезновения барашка - фазой «В». Следует отметить, что понятие фаз «А» и «В» у разных авторов немного различаются вследствие различных рассматриваемых задач или используемых подходов к описанию или измерению рассматриваемого явления. Так, например, в теоретических работах фаза «А» определяется как область генерации пены путем перемешивания воздуха и воды на гребне волны [7], в самих же экспериментальных работах Бондура и Шаркова, предложивших понятия фаз «А» и «В» («барашки» и «растекшаяся пена»), классификация каждого наблюдаемого на фотографии события выполнялась чисто визуально.

Целью данной работы является представление автоматической методики обработки видеозаписей морской поверхности для регистрации обрушений с разделением фаз «А» и «В». Методика основана на комплексном использовании яркостных и кинематических характеристик изучаемого явления. В данной работе пороговый метод всего лишь этап обработки данных, и, как будет показано далее, фаза «А» является так же результатом фильтрации на основе физических механизмов формирования яркостного поля морской поверхности и большого количества различных статистических, геометрических и кинематических характеристик измеренных событий обрушений. Выделенная таким образом активная фаза уже не является продуктом чисто порогового выделения, и, на наш взгляд, более приближена к теоретическому определению.

Описание данных Методика была разработана на основе обширного массива натуральных данных, полученных в осенние сезоны 2003 и 2005 гг. в прибрежной зоне Черного моря со стационарной океанологической платформы ЭО МГИ НАН Украины (пос. Кацивели). Платформа расположена в полукилометре от берега, где глубина около 30 м. Расположение

платформы позволяет наблюдать как молодое волнение ( $U_{10}/C_p \sim 4$ ) при ветре, направленном с берега, так и зрелые волны ( $U_{10}/C_p = 1-3$ ), при ветре направленном с моря.

Массив данных общей длительностью около 40 часов состоит из 90 записей длительностью 20 - 40 минут. Одновременно с выполнением видеозаписей морской поверхности регистрировались скорость и направление ветра (на высоте 23м), температура воздуха (на высоте 11м), температура приповерхностного слоя воды, а также, с помощью решетки из шести струнных резистивных волнографов, проводились волнографические записи. По измеренным метеопараметрам, в соответствие со стандартной методикой [26], была рассчитана динамическая скорость в воздухе, а также скорость ветра на стандартном горизонте 10м, приведенная к условиям нейтральной стратификации атмосферы. По волнографическим записям методом максимальной энтропии [27] были рассчитаны частотно-угловые спектры возвышений морской поверхности. Записи были выполнены, главным образом, в условиях восточного ветра, но включали также ситуации молодого волнения. Практически всегда ветровые волны сопровождалась зыбью. Диапазон скоростей ветра составил 4-24 м/с, температуры воды – 18-25 °С, температуры воздуха – 16-28 °С.

Видеозапись морской поверхности проводилась на видеоманитофон с одновременным выводом изображения на монитор компьютера для непрерывного контроля. Камера располагалась на высоте 13.4м от уровня моря и направлялась так, чтобы минимизировать попадание солнечных бликов в область обзора. Направление оптической оси камеры к горизонту выбиралось равным 15°-20°, обеспечивая обзор площадки на морской поверхности с размерами 30-40 м вдоль направления к горизонту и 10-20м – поперек. Геометрия съемки точно фиксировалась для последующей геометрической привязки изображения к плоскости невозмущенного уровня моря. Далее фильмы были оцифрованы с градациями яркости 0 – 255, разрешением 320x240 и с частотой 25 кадров в секунду. При этом элемент разрешения на морской поверхности, соответствующий одному пикселю, изменялся вдоль направления к горизонту от 2 до 8 см, а в перпендикулярном направлении – от 1 до 6 см.

Методика выделения активной фазы обрушений. Обработка данных включала три этапа: 1 – выделение областей кадра, соответствующих обрушениям; 2 – группировка данных по индивидуальным событиям обрушений; 3 - выделение активной фазы обрушений и расчет кинематических характеристик каждого события.

Описание первого этапа приведено в работе [28]. Выделение областей кадра, соответствующих обрушениям было выполнено пороговым методом, но в отличие от предыдущих работ величина порога выбиралась путем предварительной обработки данных, основанной на физических принципах формирования яркости морской поверхности. В результате были получены бинаризованные фильмы, где области кадра, занятые единицами, соответствовали зонам обрушений. Причем выделенные зоны обрушений включали как барашки, так и частично растекшуюся пену.

Цель второго этапа обработки - выделение индивидуальных событий обрушений. Индивидуальное событие обрушения начинается с образования барашка (фаза «А»), который распространяется вместе с гребнем обрушивающейся волны. Затем у барашка появляется шлейф из нерегулярно возникающих на морской поверхности ярких пятен остаточной пены (фаза «Б»), которые отстают от барашка. При этом барашек по-прежнему остается на гребне обрушивающейся волны. Таким образом, на конкретном кадре фазы «А» и «Б», относящиеся к одному и тому же событию обрушения, могут выглядеть как не связанные яркие образования. Далее, с исчезновением барашка, образования, относящиеся к фазе «Б», продолжают существовать, но, уже не двигаясь поступательно, а повторяя орбитальные движения, связанные с проходящими волнами.

Выделение индивидуальных событий обрушений было осуществлено путем разделения всего объема данных, относящихся к обрушениям, на группы, все точки которых принадлежат областям, связанным в пространстве координаты-времени. В результате для каждого фильма был получен набор таких групп, каждая из которых далее интерпретировалась как индивидуальное событие обрушения. Подчеркнем, что каждая группа содержит информацию об эволюции события обрушения во времени и пространстве.

В результате выделения обрушений на основе яркостного порога в данные попадает множество элементов, не связанных с интересующими нас явлениями. В кадре часто присутствуют солнечные блики, которые, как пра-



вило, существуют лишь на одном кадре. Так же можно наблюдать мелкие, кратковременные и неярые барашки, связанные с обрушениями капиллярных волн. Их регистрация не входит в задачу данной работы. Кроме того, на записях присутствует большое количество ярких и коротких по времени существования брызг, а также следов пены, которые зашумляют данные и могут вносить ошибку в результаты. Для понижения уровня шума, образованного вышеперечисленными эффектами, из данных были удалены группы длиной меньше трёх кадров и площадью меньше 27 пикселей.

Третий этап обработки был посвящен самой сложной, и, по-видимому, ранее не решенной, задаче - выделению активной фазы «А» обрушений (барашков) из данных, которые содержат смесь фаз «А» и «В». Для выявления критериев, пригодных для такого рода фильтрации, были построены 6 тестовых массивов, относящихся к различным типичным волновым ситуациям. Каждый тестовый массив состоял из 100 первых индивидуальных событий обрушений в выбранных записях. Все наблюдаемые объекты массивов были разделены на 3 типа: 1 - чистая фаза «В» (группы полностью состоят из остаточной пены), 2 - фазы «А» и «В» (группы содержат как барашки, так и остаточную пену - пенные шлейфы, тянущиеся за массивными обрушениями), 3 - чистая фаза «А» (группы полностью состоят из одиночных барашков, которые не оставляют за собой заметной остаточной пены). Классификация каждого события была проведена вручную, путем просмотра соответствующего участка видеозаписи.

Используя организованные тестовые массивы, был рассчитан набор ряда интегральных характеристик групп, характеризующих их форму и кинематику. Далее была рассмотрена связь этих величин с типом пенного образования. Наиболее эффективным параметром для выделения барашковой пены оказалась мера отклонения траектории пенного образования от равномерного прямолинейного движения «идеального барашка». Величина этого параметра  $R$  вычисляется по формуле (1),

$$R = \frac{\sqrt{\langle (\delta V)^2 \rangle}}{V}, \quad (1)$$

где  $V(t)$  - вектор скорости геометрического центра пенного образования,  $\delta V(t) = V - \langle V \rangle$  - его отклонения от вектора средней скорости. В результате были сформулированы два критерия для фильтрации данных: 1. «жесткий» критерий -  $R < 0,2$ , когда группы представляют собой единичные короткие обрушения, а остаточная пена не наблюдается; 2. «мягкий» критерий -  $R > 2$ , когда группа состоит только из остаточной пены.

Данные критерии сформулированы для первой и третьей типов групп, однако, довольно значительная часть данных относится ко второму типу - массивные обрушения, оставляющие за собой пенный шлейф. В связи с этим возникла проблема эффективного удаления шлейфов. Для её решения использовалось изменение площади пенного образования во времени. На тех кадрах, где наблюдался постоянный рост площади или она оставалась неизменной, группа обозначалась как обрушение (фаза «А»), на тех кадрах, начиная с которых фиксировалось падение площади группы, данные помечались как шлейф остаточной пены.



Рисунок 1 - Схема алгоритма выделения фазы «А»

Ещё одним эффективным способом фильтрации данных стала фильтрация по направлению. Как следует из визуальных наблюдений, барашки движутся преимущественно в генеральном направлении волн, не выходя за пределы довольно узкого углового сектора. Определив доминантное направление  $\varphi_0$  по группам, отобраным на основе «жесткой» фильтрации, мы можем удалять объекты движущиеся в противоположном направлении, оставляя группы в интервале направлений движения  $\varphi_0 - 90^\circ < \varphi_0 < \varphi_0 + 90^\circ$ .

На основе полученной информации был разработан алгоритм фильтрации, схема которого приведена на рисунке 1. В первую очередь сгруппированные данные подвергаются «жесткой» фильтрации, чтобы разделить их на два потока: в первом потоке оказываются события третьего типа («чистые барашки»), во втором – других типов. Далее из второго потока удалялись данные, соответствующие шлейфам остаточной пены. Затем из этого потока путем применения мягкого критерия удалялись данные типа 1 (заведомо остаточная пена). Данные в первом потоке служили для определения доминантного направления движения обрушений. Это направление использовалось для фильтрации по направлению данных, оставшихся во втором потоке. Прошедшие этот фильтр данные объединялись с первым потоком и сохранялись, как события фазы «А».

Обработка пробных тестовых массивов по предложенной схеме, а также просмотр обработанных фильмов, где различные фазы обрушений были раскрашены в разные цвета, показали высокую надежность метода при широком диапазоне метеорологических и волновых ситуаций.

**Возможности метода.** При исследованиях обрушений ветровых волн наиболее часто измеряется зависимость доли запененной поверхности от скорости ветра. При этом, одним из наиболее надежных результатов считается эмпирическая зависимость Монахана [23] для фазы «А»:

$$Q = 2.92 \times 10^{-5} U^{3.204} \exp[0.198 \cdot (T_w - T_a)], \quad (2)$$

где  $Q$  - доля поверхности, покрытой барашками, измеряемая в процентах,  $U$  - скорость ветра в м/с,  $T_w$  и  $T_a$  - температуры воды и воздуха в  $^\circ\text{C}$ .

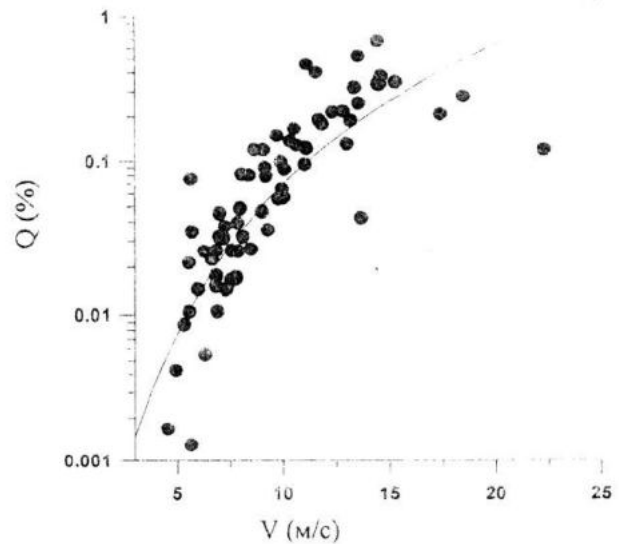


Рисунок 2 – Доля запененной поверхности в зависимости от скорости ветра. Точки соответствуют экспериментальным данным, сплошная кривая – результаты расчета согласно эмпирической зависимости Монахана

Рисунок 2 показывает, что наши результаты по выделению фазы «А» из видеозаписей морской поверхности соответствуют этой зависимости. Таким образом, предложенный метод действительно дает правильные средние оценки фазы «А» для широкого диапазона скоростей ветра.

Однако наши результаты содержат информацию о пространственно-временной эволюции каждого обрушения. В первую очередь, это позволяет получить информацию о скорости движения регистрируемых объектов. Согласно теории Филлипса [7] скорость движения обрушений равны фазовой скорости обрушающихся волн. Если взять за основу это предположение то, говоря о скорости обрушений, мы так же можем судить о фазовой скорости обрушающихся волн.

На рисунке 3 показан пример распределения обрушений по модулям скоростей их движения для одной из полученных реализаций. Распределения рассчитаны по формулам (3), где  $n(v)dv$  - число событий в интервале скоростей  $v, v + dv$ ,  $N$  - полное число событий,  $q(v)dv$  - вклад событий из того же интервала скоростей в полную долю запененности  $Q$

$$\rho(v) = \frac{n(v)}{N} dv, \quad \rho_1(v) = \frac{q(v)}{Q} dv. \quad (3)$$

Хорошо заметно, что кривая распределения  $\rho_1$  смещена в сторону больших скоростей, это говорит о том, что более быстрые обрушения соответствующие более быстрым волнам и, не

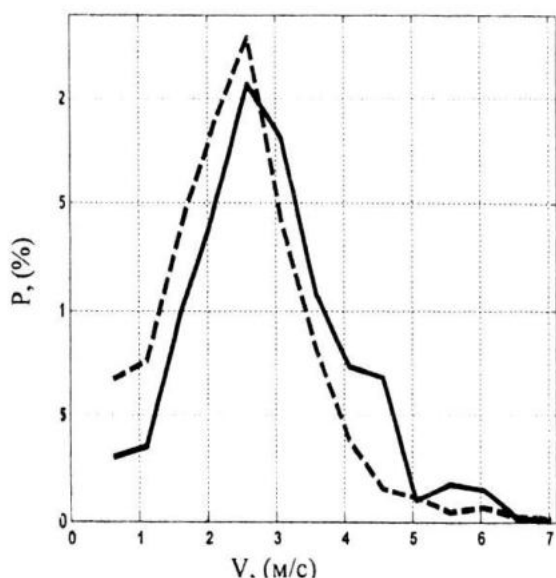


Рисунок 3 – Распределение обрушений по скоростям при скорости ветра около 7 м/с. Пунктирная кривая соответствует распределению по обрушениям - событиям, сплошная по вкладам в суммарную долю запененности

смотря на их меньшее количество, дают больший вклад в суммарное пенообразование, соответственно, и в долю запененной поверхности.

На рисунке 4 приведён пример распределения обрушений по направлениям движения (показана только  $\rho_1(\varphi)$ , кривая  $\rho(\varphi)$  с ней практически совпадает). Сплошной линией показано угловой спектр ветровых волн рассчитанный по волнографическим измерениям. Для удобства сравнения распределения нормированы так, чтоб их максимумы равнялись единице. Эти результаты соответствуют визуальным наблюдениям – барашки движутся главным образом в генеральном направлении распространения волн. Причём тот факт, что угловое распределение обрушений уже чем угловое распределение волн, соответствует теоретическим представлениям о нелинейной связи обрушений с энергией волн. Например, согласно Филипсу [7], спектр скорости диссипации из-за обрушений пропорционален кубу спектральной плотности энергии волн. Отметим, что полученный результат находится в явном противоречии с данными акустических измерений [15], где диапазон направлений движения барашков, в противоречии с визуальными наблюдениями, достигает  $180^\circ$ .

Согласно существующим теориям, обрушения волн происходят, главным обра-

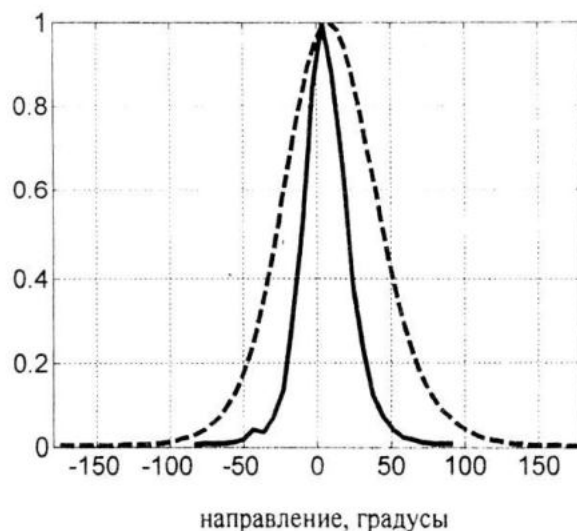


Рисунок 4 – Распределение обрушений по направлениям. Сплошной линии соответствует распределение – сплошная; распределению энергии волн – пунктир

зом, в окрестности спектрального пика [5]. Однако недавние натурные исследования [15] показали, что такая ситуация наблюдается только при молодом волнении. Для развитых волн в окрестности спектрального пика обрушений нет или очень мало, а обрушиваются более короткие волны. Эти результаты подтверждаются в данной работе на основе гораздо более хорошо статистически обеспеченного массива данных.

В качестве примера на рисунке 5 приведен измеренный частотный спектр возвышений волн, на который наложено распределение обрушений по частотам. Это распределение рассчитано по формуле

$$\rho(v)dv = \rho(f)df,$$

в предположении, что  $v = c(f)$ , где  $f$  и  $c$  частота и фазовая скорость обрушающейся волны,  $\rho(v)$  - плотность распределения по скоростям, а  $\rho(f)$  - плотность распределения по частотам.

На рисунке 5 хорошо различаются два максимума спектра, первый (слева) соответствует зыби, приходящей с моря, второй (справа) - молодым ветровым волнам, распространяющимся от берега. Направления распространения волн получены из двумерного спектра рассчитанного по волнографическим записям. Как очевидно из рисунка волны зыби не обрушиваются, а обрушения сосредоточены вблизи спектрального пика молодых ветровых волн. Данный пример, соответствующий общепринятым представлениям подтверждает, что пред-

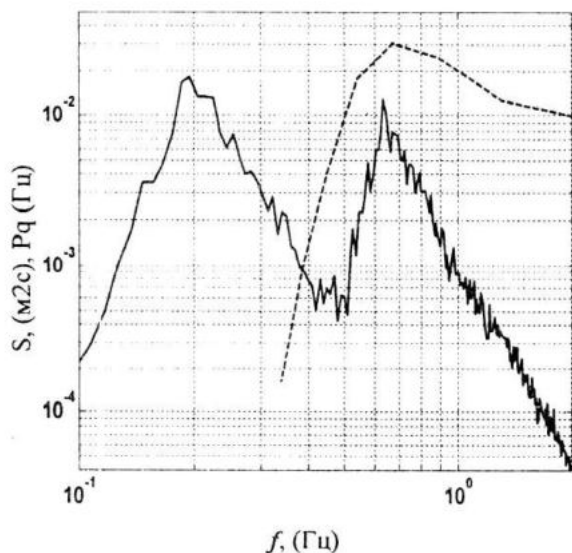


Рисунок 5 – Спектр волнового волнения и распределение событий-обрушений по частотам соответствующих скоростям их движения. Частотный спектр возвышений показан сплошной линией, распределение обрушений по частотам – пунктиром

ложенный метод может служить средством корректного измерения скоростей барашков.

**Заключение.** Предложенный метод выделения обрушений основан на учёте физических механизмов, связанных с наблюдаемыми явлениями. Подавляющее количество современных методов регистрации и анализа обрушений и обрушающихся волн, как правило, несут в себе большую субъективную составляющую и, часто, критерии и параметры регистрации трудно поддаются физико-математическому описанию. Отсутствие единых подходов в учёте сопутствующих характеристик окружающей среды, так же осложняет сравнительный анализ результатов полученных различными авторами. В результате данной работы сформулированы и реализованы автоматические алгоритмы анализа и обработки видеоизображений, которые сводят к минимуму участие в обработке человека, повышая тем самым объективность полученных данных. Кроме того, автоматизация обработки позволяет получать результаты с уникальной статистической обеспеченностью. Например, данные на рисунке 5 основаны на обработке более 5000 событий обрушений.

Метод может быть применен для получения надежных оценок статистик обрушений и последующего их использования в радиолокационных приложениях, для ис-

следования связей характеристик обрушений со спектрами ветровых волн, для изучения деталей процессов обмена между океаном и атмосферой.

Работа выполнена при финансовой поддержке ЕС (грант INTAS №05-1000008-8014).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бортковский Р.С. Тепло- и влаго обмен атмосферы и океана при шторме. - Л.: Гидрометеопиздат, 1983, – 160 с.
2. Bortkovskii R.S., Novak V.A. Statistical dependence of sea state characteristics on water temperature and wind-wave age // *J. Mar. System*, – 1993, – V.4 – P.161–169.
3. Agrawal Y.C., Terray E.A., Donelan M.A., Hwang P.A., Williams III A.J., Drennan W.M. et al. Enhanced dissipation of kinetic energy beneath surface waves // *Nature*, – 1992, – V.359, – P.219–220.
4. W. K. Melville & Roland J. Rapp Momentum flux in breaking waves // *Nature*, – 1985, – V.317, – P.514–516.
5. Donelan M. Yuan Y. Wave Dissipation by Surface processes / In "Dynamics and Modelling of Ocean Waves", G.J. Komen, L. Cavaleri, M. Donelan, K.Hasselmann, S.Hasselmann, P.A.E.M.Janssen eds. :Cambridge University Press, – 1994, – P.143–155.
6. Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G., Chapron B. A semi-empirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface. 1. Background model // *J. Geophys.Res.*, 108 (C3), 8054, doi:10.1029/2001JC001003, 2003
7. 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.
8. Hanson J.L., Phillips O.M. Wind sea growth and dissipation in the open ocean // *J. Phys. Oceanogr.*, – 1999, – V.29, – P. 1633–1648.
9. Zhao, D., and Y. Toba, Dependence of whitecap coverage on wind and wind-wave properties, *J. Oceanogr.*, – 2001, – V.57, – P. 603–616.
10. Anguelova, M. D., and F. Webster, Whitecap coverage from satellite measurements: A first step toward modeling the variability of oceanic whitecaps, *J. Geophys. Res.*, – 2006, – 111, C03017, doi:10.1029/2005JC003158.
11. Donelan, M., F. Dobson, S. Smith, and R. Anderson, On the dependence of sea surface roughness on wave development, *J. Phys. Oceanogr.*, – 1993, – V.23, – P. 2143–2149.
12. Dulov V.A., Kudryavtsev V.N., Bol'shakov A.N. A field study of whitecap coverage and



its modulations by energy containing surface waves. Geophysical Monograph N127 "Gas Transfer at Water Surface", American Geophysical Union, USA, – 2002, – P.187–192

13. Филлипс О.М. Динамика верхнего слоя океана.-Ленинград: Гидрометеиздат, – 1980, – 319с.

14. Melville, W., and P. Matusov, Distribution of breaking waves at the ocean surface, *Nature.*, – vol.417, – 2002, – P.58–63.

15. Ding L., Farmer D.M. Observations of breaking surface wave statistics // *J. Phys. Oceanogr.*, – 1994, – V.24, – P.1368–1387.

16. Kolaini A.R., Crum L.A., Observations of underwater sound from laboratory breaking waves and implications concerning ambient noise in the ocean, *J. Acoust. Soc. Am.*, – 1994, – V.13, – P.1755–1765

17. Tegowski J, A laboratory study of breaking waves // *Oceanologia.*, – 2004, – V.3, – P.365–382

18. Бондур В.Г., Шарков Е.А. Статистические характеристики пенных образований на взволнованной поверхности. *Океанология.*, – т. 22, – N3, – 1982, – С. 372–379.

19. Stramska, M., and T. Petelski, Observations of oceanic whitecaps in the north polar waters of the Atlantic, *J. Geophys. Res.*, 108(C3), 086, doi:10.1029/2002JC001321.

20. Lafon, C., J. Piazzola, P. Forget, O. le Calve, and S. Despiau, Analysis of the variations of the whitecap fraction as measured in a coastal zone, *Boundary Layer Meteorol.*, – 2004, – V.111, – P.339–360

21. Xu, D., X. Liu, and D. Yu, Probability of wave breaking and whitecap coverage in a fetch-limited sea, *J. Geophys. Res.*, – 2000, – V.105, – P.14,253–14,259.

22. Snyder R.L., Linda Smith, Kennedy R.M. On the formation of whitecaps by a threshold mechanism. Part III: Field experiment and comparison with theory // *J. Phys. Oceanogr.*, – 1983, – V.13, – P.1505–1518.

23. Monahan E.C. Woolf D.K. Comments on "Variations of whitecap coverage with wind stress and water temperature". *Journal of physical oceanography.*, – 1989, – V.19, – P.706–709.

24. Kraan C., Oost W.A., Jansen P.A.E.M. Wave energy dissipation by whitecaps. *Journal of Atmosphere and oceanic technology.*, – 1996, – V.13, – P.262–267

25. Haller, M.C.; Lyzenga, D.R. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, - 2003, - V.4, -P. 832– 844

26. Large, W.G., and S. Pond Sensible and latent heat flux measurements over the ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, – 1982, – V.12, – P.464–482.

27. Lygre, A. & Krogstad, H.E. Maximum entropy estimation of the directional distribution in ocean wave spectra. *J. Phys. Oceanogr.*, – 1986, – V.16, – P.2052–2060

28. Дулов В.А., Миронов А.С., Большаков А.Н. и др. Выделение обрушений ветровых волн из видеозаписей морской поверхности // *Системы контроля окружающей среды: Сб. науч. тр. / НАН Украины: МГИ, – Севастополь, – 2004, – С.119–124.*