

# ВЫДЕЛЕНИЕ ОБРУШЕНИЙ ВЕТРОВЫХ ВОЛН ИЗ ВИДЕОЗАПИСЕЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*В.А. Дулов, А.С. Миронов,  
А.Н. Большаков, В.Е. Смолов*

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
*E-mail: dulov@satg.mhi.iuf.net*

*Рассмотрена проблема оценки характеристик обрушений ветровых волн по видеозаписям морской поверхности. Выполнен анализ натурных видеозаписей для скоростей ветра 6 - 24 м/с. Установлен физически обоснованный критерий выделения областей обрушений. Предложена надежная и полностью автоматизированная методика цифровой обработки, выходом которой являются бинаризованные фильмы, содержащие только области обрушений.*

**Введение.** Регистрация характеристик обрушающихся ветровых волн - одно из наиболее информативных направлений контроля состояния морской окружающей среды. Прежде всего, эти характеристики несут информацию о скорости ветра и потоке импульса от атмосферы к океану [1,2]. Они характеризуют также интенсивность волнения (спектр возвышений морской поверхности), интенсивность газообмена [3], производства капельного аэрозоля [3], генерации турбулентности в приповерхностном слое моря. Рассмотрение временной и пространственной изменчивости этих характеристик дает информацию о мезомасштабных динамических особенностях в водной толще [4]. Хотя этой теме посвящено множество работ (см. напр. обзор [5]), как правило, в каждой из них для целей регистрации применялось свое специально сконструированное устройство, использующее различные физические (оптические, акустические, радиолокационные, тепловые или др.) свойства областей обрушений. Соответственно, на сегодняшний день нет общепринятых методик, а результаты, полученные различными методами, расходятся.

Регистрация обрушений с помощью видеокамеры с последующей цифровой обработкой записей (см. напр. [6-8]) привлекательна с одной стороны простотой прове-

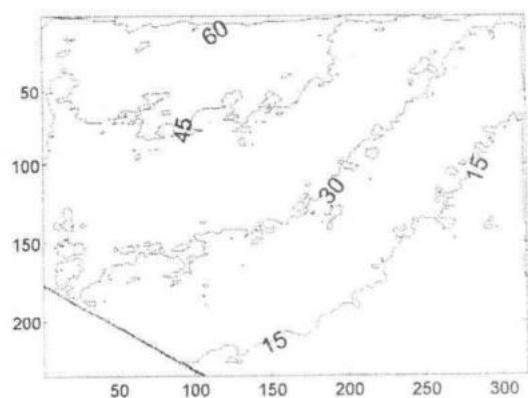
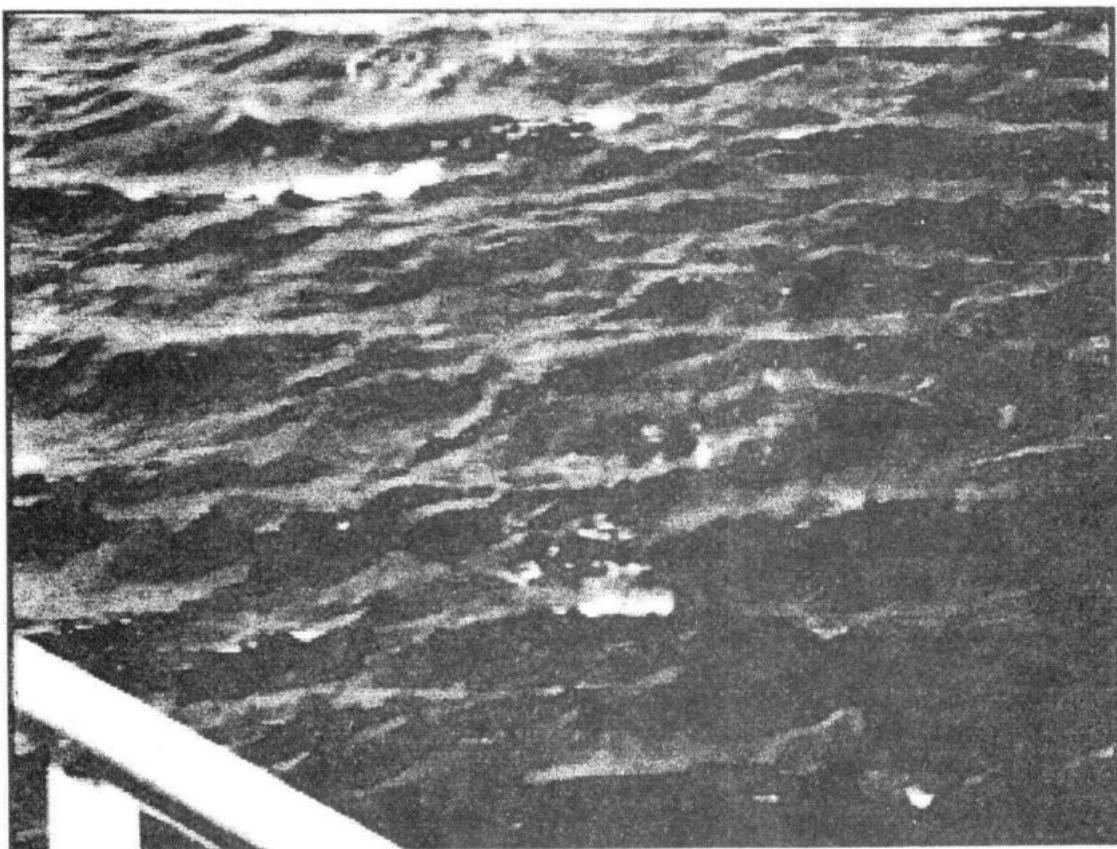
дения измерений, с другой стороны – возможностью визуального контроля правильности обработки путем просмотра фильмов. Идентификация обрушений в видеозаписях основана на том, что они ярче окружающей воды. В цитированных работах выбирался порог яркости, и области поверхности с яркостью, превышающей порог, считались обрушениями. Выбор порога проводился либо интерактивно (подгонка с визуальным контролем), либо порог считался пропорциональным среднеквадратичному отклонению яркости, рассчитанному по каждому кадру, причем коэффициент пропорциональности выбирался для каждого фильма снова интерактивно [8].

По принципу пороговой яркости работала также автоматическая оптическая система регистрации барабашков на гребнях обрушающихся волн «Дидикон» [9]. Полученная этой системой зависимость доли поверхности, покрытой барабашками, от скорости ветра, оказалась в согласии с результатами обработки видеозаписей [6]. Порог яркости при этом выбирался аппаратно с использованием обратной связи его величины и яркости самих барабашков. Настройка обратной связи была осуществлена в результате длительных методических работ в натурных условиях.

Во всех перечисленных методах использовалась «ручная» настройка, которая работала в пределах либо определенного фильма, либо ограниченного набора ситуаций (полей освещенности наблюдаемой поверхности). При этом не учитывалась физика формирования видеоизображения морской поверхности.

Цель данной работы – построить надежный алгоритм автоматического цифрового выделения обрушений в видеоизображениях. Основная идея – привлечь для разработки алгоритма известные физические представления.

**Описание данных.** Видеозаписи выполнялись в осенний сезон 2003 г. со стационарной океанографической платформы ЭО МГИ НАН Украины (пос. Кацивели). Камера располагалась на высоте 14 м над уровнем воды. Направление визирования выбиралось равным примерно 20° к горизонту, обеспечивая обзор площадки на морской поверхности с размерами 25м вдоль направления к горизонту и 10м - поперек.



Геометрия съемки точно фиксировалась для последующей геометрической привязки изображения к плоскости невозмущенного уровня моря. Запись проводилась на видеомагнитофон с одновременным выводом изображения на монитор компьютера для непрерывного контроля. Синхронно стандартными приборами выполнялись записи скорости ветра, температур воды и воздуха. Длительность одного фильма составляла примерно 20 минут. Было записано 43 фильма для диапазона скоростей ветра от 6

Рис. 1 – Кадр исходной видеозаписи с барашками на гребнях обрушающихся волн (фаза А), позади которых видна растекшаяся пена (фаза В). В правом нижнем углу - участок леера, помещенный в кадр для надежности геометрической привязки.

Рис. 2 – Среднее поле яркости, соответствующее рис. 1. Показаны изолинии 15, 30, 45 и 60 при 256 градациях яркости.

до 24 м/с. Далее фильмы были оцифрованы с разрешением 240x320, с градациями яркости от 0 до 255 и с частотой 15 кадров в секунду

Рис.1, где показан исходный кадр записи, иллюстрирует основные проблемы обработки. Поле яркости имеет явные тренды, вызванные неоднородностью освещенности (см. рис. 2). На эту крупномасштабную изменчивость накладываются флуктуации яркости, связанные с волнением. На их фоне выделяются три вида объектов – актив-

ные баражки на гребнях обрушающихся волн (фаза А по терминологии [10, 6]), рас текшаяся пена (фаза В) и солнечные блики (на рисунке не видны). Мы направляли камеру так, чтобы минимизировать попадание бликов в область обзора. Устранение редких бликов не представляет принципиальной трудности, если имеется временная последовательность кадров. Каждый блик в отличие от баражков и пены встречается только на одном кадре, и по этому признаку может быть идентифицирован. Разделение баражков и пены это самостоятельная (и нетривиальная [7, 8]) задача, решение которой выходит за рамки данного сообщения. Отметим лишь, что рассмотрение временной последовательности кадров в принципе позволяет разделить баражки и пену по скоростям их движения. Задача данной работы – выделить объекты связанные с обрушениями (фазы А и В).

В результате обработки требуется получить бинаризованные фильмы, где единицы отмечают области связанные с обрушениями волн, а нули соответствуют свободной от обрушений морской поверхности. Бинаризованные фильмы после их геометрической привязки позволяют рассчитать геометрические и кинематические характеристики областей обрушений. Выполнение бинаризации имеет принципиальное значение также для сокращения объема рабочих данных, поскольку каждый фильм в исходном оцифрованном виде имеет объем несколько десятков гигабайт.

**Методика обработки.** Обработка выполнялась раздельно для каждой минуты записи. Мы считали, что в течение минуты поле освещенности наблюдаемой площадки оставалось неизменным. Тогда соответствующее этой освещенности поле яркости в области кадра получаем путем осреднения по всем кадрам за минуту. На рис. 2 приведен пример результата осреднения. Далее среднее поле яркости вычиталось из исходных изображений, причем отрицательные вариации яркости сразу заменились нулями.

Если отсутствуют блики, то вариации яркости в фиксированной точке морской поверхности примерно линейно связаны с ее уклонами:

$$I = c_x \xi_x + c_y \xi_y,$$

где  $\xi_x$  и  $\xi_y$  – составляющие градиента возышений поверхности, а величины  $c_x$  и  $c_y$  сложным образом определяются коэффициентами прямого и диффузного отражения воды и распределением светимости по небосводу (см. напр. [11]). Величины  $\xi_x$  и  $\xi_y$  независимы и имеют распределение, близкое к нормальному [12]:

$$p(\xi_x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left(-\frac{\xi_x^2}{2\sigma_x^2}\right),$$

$$p(\xi_y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{\xi_y^2}{2\sigma_y^2}\right),$$

где оси координат выбраны вдоль и попереек скорости ветра,  $\sigma_x^2$  и  $\sigma_y^2$  – дисперсии уклонов в этих направлениях. Тогда плотность распределения вариаций яркости  $I$  оказывается также гауссовой:

$$p(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_I} \exp\left(-\frac{I^2}{2\sigma_I^2}\right),$$

$$\text{где } \sigma_I^2 = c_x^2 \sigma_x^2 + c_y^2 \sigma_y^2.$$

Вариации яркости, вызванные обрушениями, существенно выше, чем  $\sigma_I$ , и очень редки. Поэтому обрушения искажают положительный «хвост» нормального распределения яркости. Уровень яркости, выше которого наступают искажения, и является объективной величиной порога для выделения обрушений.

В соответствии с этой физической предпосылкой дальнейшая обработка изображений в положительных вариациях яркости проводилась так:

1. Рассчитывался участок функции распределения вариаций яркости  $p(I)$  для положительных значений  $I$ . Строго говоря, для различных точек наблюдаемой поверхности эта функция должна различаться изза зависимости коэффициентов  $c_x$  и  $c_y$  от пространственных координат. Однако в нашем случае величины  $\sigma_I^2$ , вычисленные по положительным вариациям путем осреднения за минуту, изменялись в области

кадра в пределах лишь нескольких процентов. Поэтому для нахождения функции  $p(I)$  использовалась вся площадь кадров участка записи длительностью в минуту.

2. Рассчитывалась вероятность превышения яркостью заданного порога  $I$ :

$$F(I) = \int_I^{\infty} p(I') dI'.$$

В верхнем ряду на рис.3 приведены примеры экспериментально определенных функций  $p(I)$  и  $F(I)$ . Переход от нормально распределенных яркостей к яркостям, связанным с обрушениями наиболее явно виден для функции  $F(I)$ .

3. Для нормального распределения должно выполняться соотношение

$$F(I) = (1 - erf(Y))/2, \quad (1)$$

где  $erf(Y)$  – интеграл вероятности,

$$Y = (I - I_m)/(\sqrt{2}\sigma_I), \quad (2)$$

$I_m$  – возможная ошибка определения среднего. Поэтому далее вычислялась функция

$$Y(I) = erf^{-1}(1 - 2F(I)),$$

где  $erf^{-1}$  – обратная функция от  $erf$ . Примеры  $Y(I)$  приведены в нижнем ряду на рис. 3. При малых значениях яркости эта функция действительно линейна, что доказывает правильность подхода к обработке. Более того, неизвестные параметры нормального распределения  $I_m$  и  $\sigma_I^2$  теперь легко определяются из формулы (2).

4. На рис. 3 прерывистыми линиями показаны кривые  $F_0(I)$  и  $Y_0(I)$ , построенные по найденным значениям  $I_m$  и  $\sigma_I^2$  и формулам (1,2). Рисунки подчеркивают различие между реальным распределением яркости и распределением, связанным только лишь с уклонами морской поверхности. Далее выбирался порог яркости  $I_T$  по критерию

$$F_0(I_T) = F(I_T)/10. \quad (3)$$

Величина  $Q = F(I_T)$  – это доля поверхности, занятой обрушениями. Т.е. в определенную с помощью критерия (3) долю поверхности  $Q$  помехи от уклонов волн вносят не более 10% ошибки.

Все элементы изображений (пиксели), для которых положительные вариации яркости превышали  $I_T$ , заменялись единицами, оставшиеся элементы – нулями. В результате были получены бинаризованные изображения.

5. Одновременно формировался фильм, в котором одну половину кадра занимало исходное изображение морской поверхности, другую – бинаризованное с выделенными обрушениями. Просмотр таких фильмов с реальной скоростью позволяет получить полную уверенность в том, что наш алгоритм действительно выделяет из видеозаписей объекты, связанные с обрушениями волн, с сохранением их детальной структуры.

**Обсуждение.** В предыдущих работах предполагалось, что порог  $I_T$  должен быть жестко связан с дисперсией яркости. Наш анализ показывает, что порог зависит также и от доли поверхности  $Q$ , покрытой пеной. Механизм зависимости иллюстрируется последовательностью рисунков 3б, За и 3в, для которой величина  $Q$  монотонно уменьшается. Это приводит к расширению диапазона вариаций яркостей, обусловленных уклонами волн. Поэтому порог сдвигается в сторону увеличения яркости: величина  $I_T$  для рис. 3б, За и 3в соответственно равна  $2.6\sigma_I$ ,  $3.5\sigma_I$  и  $4.6\sigma_I$ .

Предложенный алгоритм выделения обрушений опирается на физические представления о формировании поля яркости морской поверхности. Поэтому он применим для широкого диапазона ситуаций освещенности и состояний поверхности моря. Рис. За соответствует «идеальным» условиям безоблачного неба, когда обрушения четко видны на фоне темно-синей воды. Рис. 3б соответствует сильному шторму (скорость ветра выше 20м/с) с моросящим дождем, когда обильные пенные пятна трудно различить на фоне воды, «желто-коричневой» из-за перемешивания. Рис. 3в

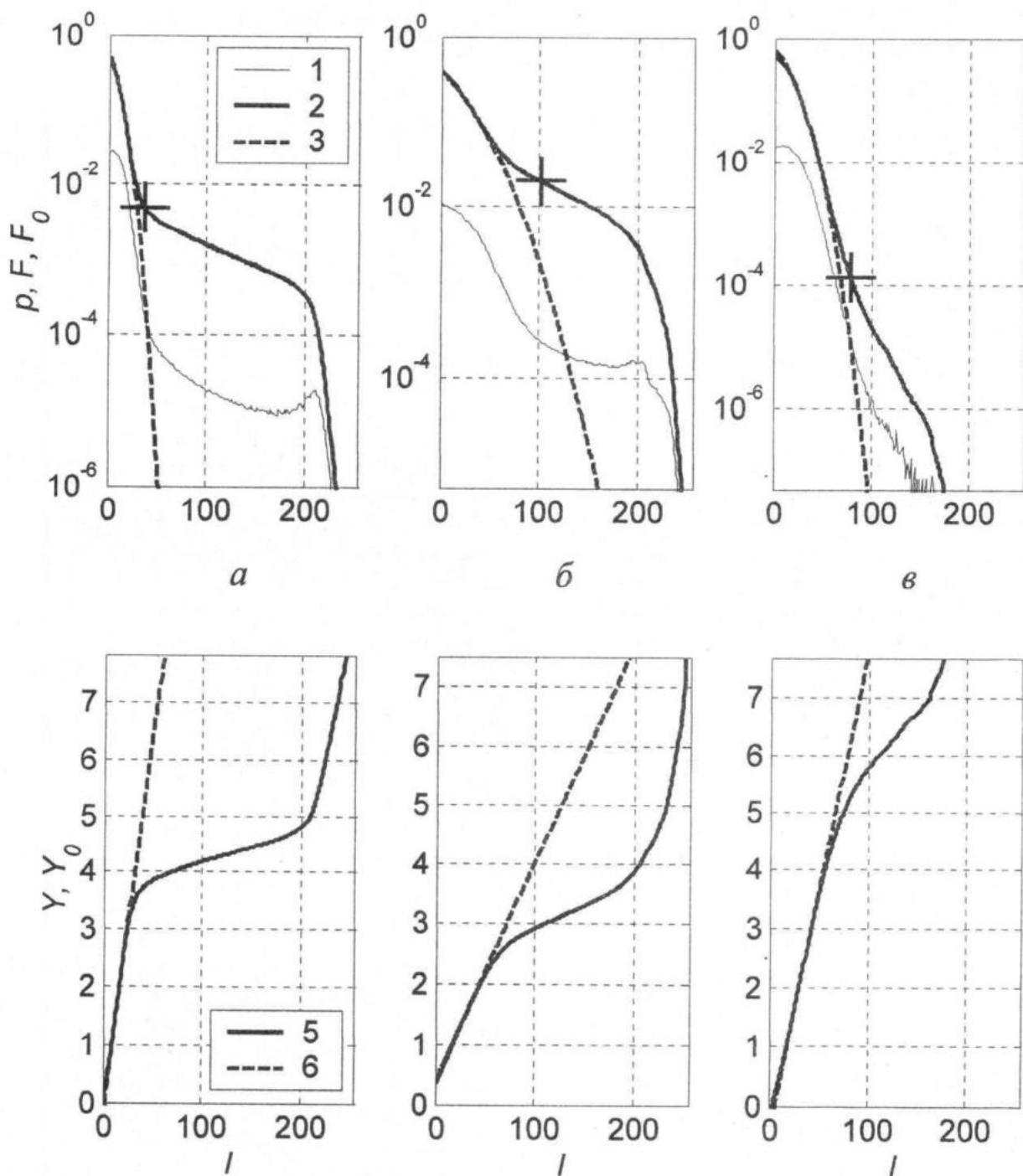


Рис. 3 – Распределение вариаций яркости и процедура выделения порога.  
 Верхний ряд: функции  $p(I)$  - 1,  $F(I)$  - 2,  $F_0(I)$  - 3. Крестик дает значение пороговой яркости  $I_T$  по оси  $I$  (в градациях яркости) и значение доли поверхности  $Q$ , покрытой пеной, по оси ординат. Нижний ряд: функции  $Y(I)$  - 5,  $Y_0(I)$  - 6. Колонки соответствуют различным записям: «идеальные» условия – *а*, штормовые условия (много пены и ухудшенная контрастность) – *б*, редкие обрушения (два события в минуту) – *в*.

соответствует очень спокойному морю – за этот минутный промежуток времени зарегистрировано всего 2 события обрушений. Во всех этих ситуациях порог яркости для выделения обрушений легко определяется с помощью построений, показанных на рисунках нижнего ряда.

Проведенная работа позволяет перейти к анализу кинематики связанных с обрушениями образований. Это в свою очередь даст возможность выполнить в будущем разделение фаз обрушений А и В и удалить редкие солнечные блики. Данные о зависимости  $Q$  от скорости ветра, полученные в процессе работы, согласуются с формулой для растекшейся пены (фазы В) из статьи [6].

**Выводы.** В данной работе в результате анализа функции распределения вариаций яркости в натурных видеозаписях получен алгоритм определения порога яркости для выделения объектов, связанных с обрушениями ветровых волн – барабашков (фазы А) и пены (фазы В). Алгоритм не требует «ручной» подстройки и работает в широком диапазоне ситуаций освещенности и состояний поверхности моря.

*Работа выполнена при финансовой поддержке ЕС, грант INTAS-01-234.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Wu J. Oceanic whitecaps and sea state. Journal of physical oceanography, vol. 9, 1979, - P. 1064-1068.
2. Monahan E.C., O'Muircheartaigh I.G. Whitecaps and passive remote sensing of the ocean surface. International journal of remote sensing, vol.7, No.5, 1986, - P. 627 - 642.
3. Бортковский Р.С. Тепло- и влагообмен атмосферы и океана при шторме. - Л.: Гидрометеоиздат, 1983, - 160 с.

4. Дулов В.А., Запевалов А.С., Большаков А.Н., Смолов В.Е. Проявление динамики воды в прибрежной зоне в поле обрушений ветровых волн. Морской гидрофизический журнал, N4, 1999, - С.3-17.

5. Gemmrich J.R, Farmer D.M. Observations of the scale and occurrence of breaking surface waves. Journal of physical oceanography, vol. 29, 1999, - P. 2595-2606.

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

7. Kraan C., Oost W.A., Jansen P.A.E.M. Wave energy dissipation by whitecaps. Journal of Atmosphere and oceanic technology, vol. 13, 1996, - P. 262-267.

8. Stevens C.L., Smith M.J., McGregor J.A. Estimation of whitecap coverage percentage using shallow grazing-angle video and FMICW radar. Gas transfer at water surfaces symposium, Program and Abstracts. RSMAS, Miami Beach, USA, 2000, - P. 85.

9. 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, 2001, - P. 187-192

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

11. Мурынин А.Б. Восстановление пространственных спектров морской поверхности по оптическим изображениям в нелинейной модели поля яркости. Исследование Земли из космоса, N6, 1990, - С. 80-89.

12. Cox C.S., Munk W.H. Statistics of the sea surface derived from Sun glitter, Journal of Marine Research, vol.13, 1954, - P. 198-227.