



УДК 504.064.3:551.466.1

© 2011

Академик НАН Украины В. А. Иванов, Ю. Ю. Юровский,
В. В. Малиновский

Исследование обратного радиолокационного рассеяния на обрушениях морских ветровых волн

Наведено результати експериментальних досліджень зв'язку характеристик радіолокаційного сигналу з геометричними параметрами обвалень вітрових хвиль. Показано, що ефективна площа розсіяння на обваленнях пропорційна його довжині. Розрахунок зміни небреговської компоненти розсіяння в області поверхні, покритої плівкою, дає змогу правильно описати результати спостережень.

Анализ и интерпретация данных радиолокационного (РЛ) зондирования морской поверхности базируется на современных моделях удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) (см., например, [1]). Полная УЭПР моря представляется в виде суммы береговской σ_{0br} (в рамках двухмасштабной модели) и небреговской σ_{0wb} компонент рассеяния [2]. При умеренных и больших углах наблюдения величина σ_{0wb} связывается с рассеянием на обрушивающихся ветровых волнах.

Несмотря на то что обрушения ветровых волн занимают около 1% морской поверхности при скорости ветра 10 м/с [3], небреговская компонента рассеяния крайне важна при описании полной УЭПР. При больших углах падения вклад σ_{0wb} в суммарную УЭПР в С-диапазоне может достигать 60% [4].

В настоящее время открытым остается вопрос о связи небреговской компоненты рассеяния с геометрическими характеристиками обрушений ветровых волн. В современных моделях УЭПР морской поверхности [1] величина σ_{0wb} связывается с геометрической площадью обрушения.

Отметим, что экспериментальных исследований, направленных на изучение связи характеристик рассеянного сигнала в зоне обрушения с геометрическими параметрами обрушения, явно недостаточно. Это затрудняет развитие модели УЭПР небреговской компоненты, чрезвычайно важной как для интерпретации данных РЛ зондирования, так и решения обратных задач восстановления параметров морской поверхности.

Цель настоящей работы — получение в натуральных условиях эмпирических зависимостей σ_{0wb} от геометрических характеристик обрушений ветровых волн.

Эксперимент проводился в октябре-ноябре 2008–2009 гг. в Черном море на стационарной океанографической платформе ЭО Мор. гидрофиз. ин-та НАН Украины, расположенной на расстоянии около 600 м от берега в акватории Голубого Залива (пгт Кацевели). Для исследования рассеивающих свойств морской поверхности использовалась радиолокационная станция (РЛС) восьмимиллиметрового диапазона (частота радиоволны 37,5 ГГц) непрерывного излучения. Передача и прием сигнала в РЛС осуществляется с помощью двух сонаправленных рупорных антенн, разнесенных между собой на 35 см. Ширина диаграммы направленности системы составляет около 10° по уровню -3 дБ. Приемный тракт снабжен двумя поляризаторами, позволяющими выделять из принимаемого сигнала вертикально ВВ и горизонтально ГГ поляризованные компоненты. Принимаемые сигналы оцифровывались с частотой дискретизации 10 кГц на канал с помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП), размещенного на базе персонального компьютера. Высота установки РЛС 6 м и 14 м над уровнем моря, что позволило проводить измерения при углах падения 70° и 45° соответственно. Калибровка РЛС осуществлялась с помощью уголковых и сферических отражателей различного размера.

Для определения геометрии обрушений, возникающих на облучаемой РЛС поверхности, применялась цифровая видеокамера Sony-HDR-НС3, установленная непосредственно на корпусе РЛС. Технические характеристики камеры позволяют получать видеозапись с частотой 25 кадр/с при размерах кадра 1440 на 1080 пикселей. Угол обзора оптической системы составляет 44° в горизонтальной плоскости и 26° — в вертикальной. Синхронизация видеоряда и радиолокационных записей реализовывалась путем дополнительной регистрации аудиосигнала видеокамеры одним из каналов АЦП.

Скорость и направление ветра регистрировались стандартными гидрометеорологическими приборами на высоте 21 м.

За время натуральных экспериментов были проведены серии измерений общей продолжительностью около 20 ч при углах падения 45° и 70° и азимутальном направлении “на волну” (навстречу генеральному направлению распространения ветрового волнения).

Регистрируемый сигнал РЛС усреднялся и пересчитывался в эффективную площадь рассеяния (ЭПР) σ^{pp} облучаемого участка поверхности с учетом калибровочных зависимостей и дальности до морской поверхности. Здесь и далее верхним индексом pp обозначены поляризации излучения / приема сигнала (VV — ВВ и HH — ГГ). Осреднение выполнялось по 1000 отсчетам исходного ряда, что соответствовало частоте дискретизации временной реализации ЭПР 10 Гц.

Для определения геометрических параметров обрушений, проходящих через пятно облучения локатора, использовался алгоритм обработки видеоизображений, предложенный в обзоре [5], который основан на выделении зон обрушений по признаку превышения событием заданного порога яркости и порога скорости. Для каждой выделенной области обрушения с учетом известной геометрии наблюдения определялись ее геометрическая площадь и длина большой оси аппроксимирующего эллипса.

При попадании в кадр нескольких обрушений рассчитывались суммарные длина их гребней (L) и площадь (S) активной фазы (фаза А, “барашек”). В результате были сформированы временные реализации L и S с частотой дискретизации 25 Гц. Для последующего анализа временные ряды характеристик обрушений синхронизировались с записями ЭПР на ГГ и ВВ поляризациях. Фрагмент записи, где показано проявление

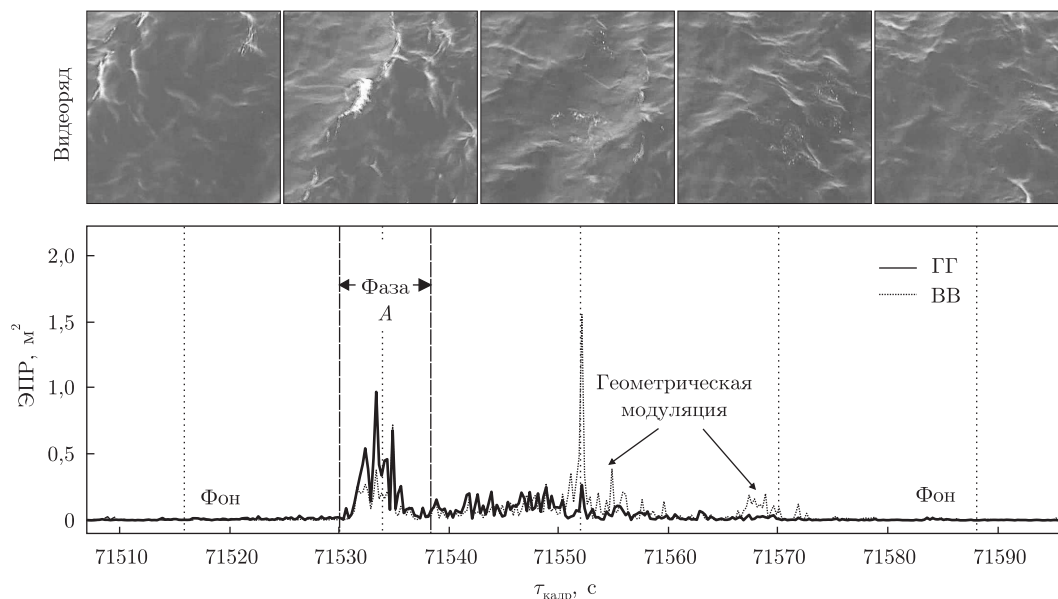


Рис. 1. Фрагмент записи РЛ сигнала, синхронизированный с видеорядом

в РЛ сигнале одного обрушения на различных стадиях его эволюции, иллюстрирует рис. 1.

В качестве характерных параметров, определяющих геометрические свойства события, были выбраны максимальные значения суммарной длины и площади обрушений. Соответственно для описания РЛ характеристик использовались максимальные значения ЭПР для каждой из поляризаций. Такой подход позволяет минимизировать влияние фоновой компоненты рассеяния от ветровой ряби и уменьшить методические ошибки, связанные с определением характеристик обрушений.

Натурные исследования геометрических свойств обрушений [6] показывают, что при активной фазе обрушения его площадь и длина связаны как $S = \text{const} \cdot L^2$. Исходя из этого, выберем в качестве основного характерного параметра обрушения максимальное значение L — длины обрушивающегося гребня. На рис. 2 представлены зависимости максимальной ЭПР обрушений σ_{wb}^{pp} от L для ВВ и ГГ поляризаций, полученные по всем записям при угле падения 70° и зондировании “на волну” при скорости ветра 7–9 м/с. “Облака” точек усреднены по интервалам, ширина которых меняется по логарифмическому закону. Пунктирными линиями показаны выполненные методом наименьших квадратов аппроксимации наших данных следующей функцией:

$$\sigma_{wb}^{pp}(L) = aL^\gamma + b \quad (1)$$

(здесь b имеет смысл константы, связанной с рассеянием на поверхности, не занятой обрушением).

Анализ полученных данных показывает, что аналогичная зависимость ЭПР обрушений от L характерна и для измерений при угле падения $\theta = 45^\circ$, но при этом разброс точек больше (до 20 дБ). Как видно из рис. 2, при $\theta = 70^\circ$ обрушения одного масштаба могут иметь ЭПР, отличающуюся приблизительно на 10 дБ. Такой значительный разброс точек связан с различным вкладом σ_{br}^{pp} и σ_{wb}^{pp} в суммарную ЭПР. При умеренных углах падения ($\theta = 45^\circ$) основной вклад в ЭПР вносит величина σ_{br}^{pp} , обусловленная рассеянием

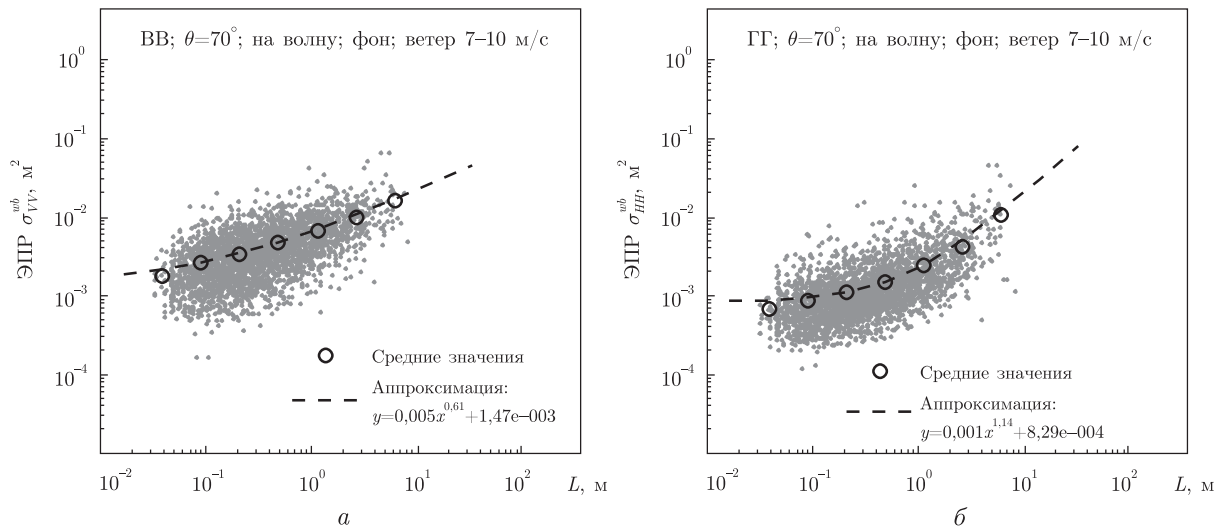


Рис. 2. Зависимости ЭПР обрушений σ_{wb}^{pp} от максимальной длины обрушивающего гребня

на ветровой ряби. Флуктуации спектральной плотности волнения на береговом волновом числе вдоль профиля длинных волн и геометрическая модуляция σ_{br}^{pp} уклонами более крупных волн вызывают большой разброс измеряемых значений σ_{wb}^{pp} . С ростом масштаба “барашка” уменьшается вклад фонового рассеяния в величину σ_{wb}^{pp} и уменьшается разброс значений σ_{wb}^{pp} . При больших углах падения $\theta = 70^\circ$ значения σ_{br}^{pp} существенно ниже (примерно в 100 раз) по отношению к измерениям при $\theta = 45^\circ$, что приводит к существенному снижению разброса величин σ_{wb}^{pp} . Отметим, что поскольку $\sigma_{br}^{VV} > \sigma_{br}^{HH}$, “облака” точек, соответствующие ГГ поляризации, являются более кучными, а наклоны аппроксимирующих их функций имеют большие значения по сравнению с ВВ поляризацией.

Более детальный анализ наклонов аппроксимирующих кривых представлен на рис. 3, где показаны гистограммы величин γ , рассчитанные по каждой из 28 имеющихся записей. Как видно из рисунка, на обеих поляризациях показатель степени γ близок к 1,0 и 0,5 соответственно для зависимостей ЭПР обрушений от L (см. а, б на рис. 3) и S (см. в, г). Таким образом, можно считать, что компонента рассеяния, связанная с обрушением, пропорциональна его длине.

Корректное описание связи σ_{wb} с характеристиками обрушений важно не только с физической точки зрения, но и имеет прикладное значение, в частности, при анализе РЛ данных, полученных в районах загрязнений морской поверхности. В настоящее время в радиофизических моделях предполагается, что вызванный пленкой РЛ контраст $K_m^{pp} = \sigma_0^{pp} / \sigma_{0f}^{pp}$, где σ_0^{pp} — УЭПР чистой поверхности; σ_{0f}^{pp} — УЭПР зоны загрязнения, определяется только за счет уменьшения величины σ_{br}^{pp} , в то время как величина σ_{wb} не меняется. Однако, как показано в публикации [7], в области моря, покрытой тонкой пленкой, уменьшается количество обрушений с длинами, меньшими 10–15 см, что должно приводить к уменьшению небреговой компоненты рассеяния.

Сопоставление наблюдавшихся в эксперименте РЛ контрастов K_m^{pp} , вызванных пленкой растительного масла (VO) и олеиновой кислоты (OLA), и величин K_m^{pp} , рассчитанных по модели [1] для соответствующих условий наблюдений иллюстрирует рис. 4. Теоретические значения $K_m^{pp}(a)$ рассчитаны при условии, что величина σ_{0wb} на чистой воде и пленке оста-

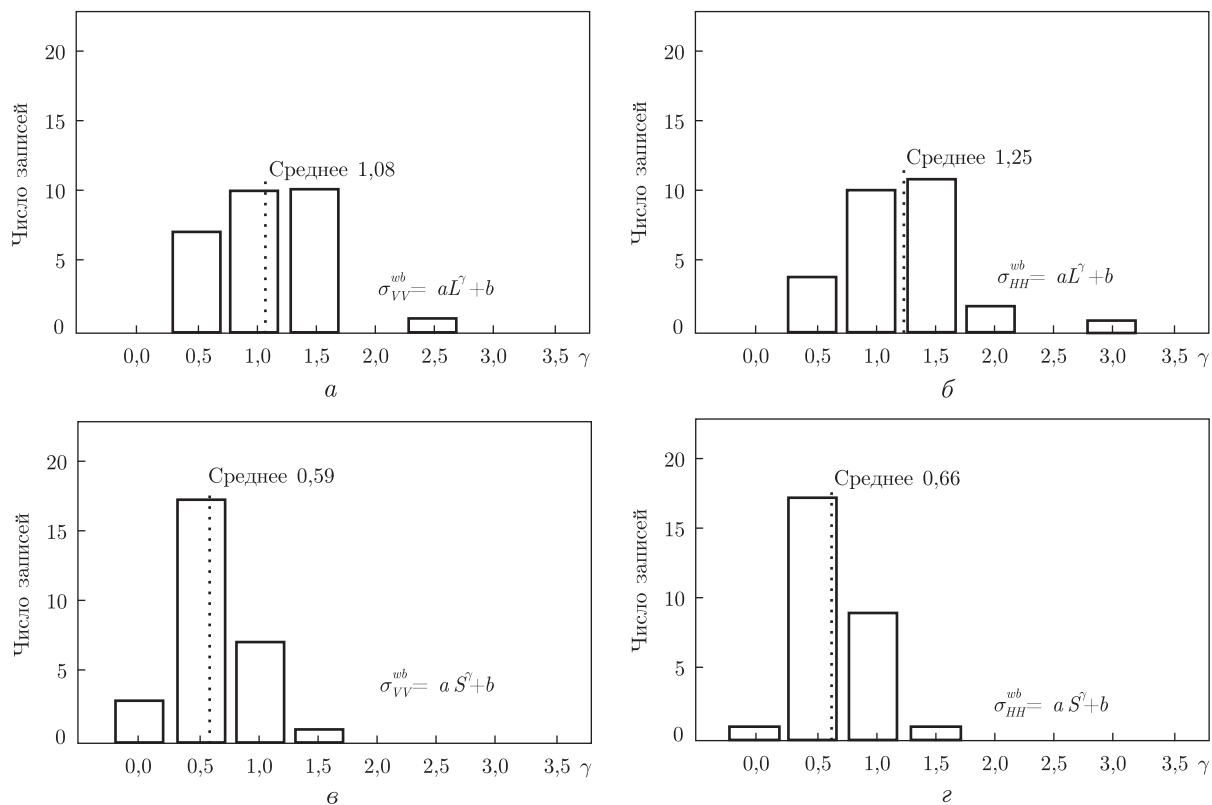


Рис. 3. Распределения наклонов аппроксимирующих функций γ для всех записей

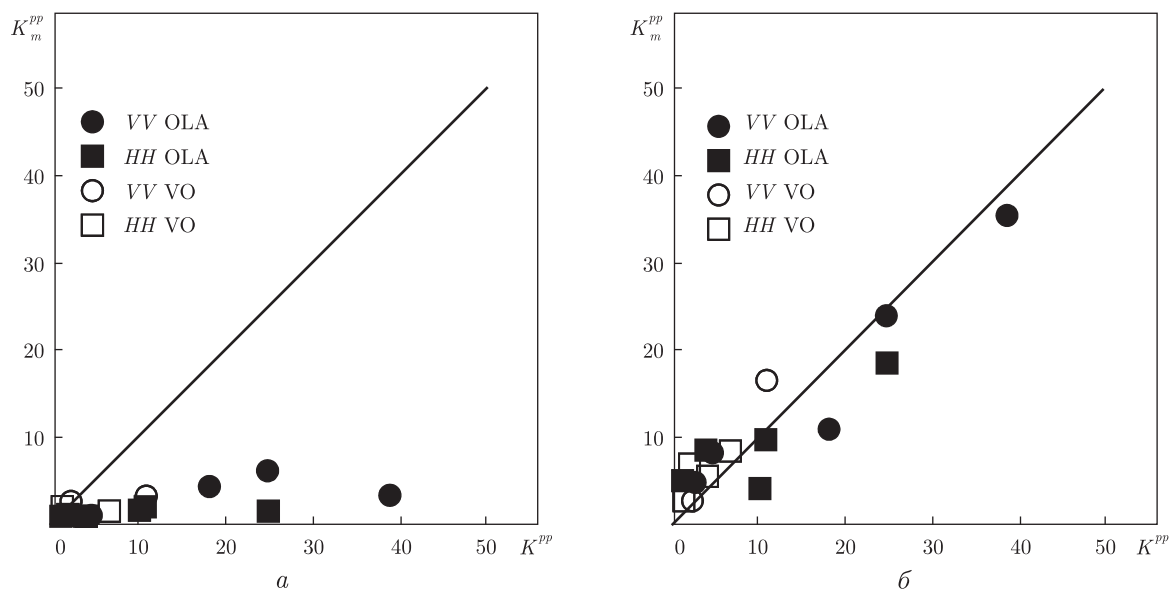


Рис. 4. РЛ контраст, измеренный в натурном эксперименте и вычисленный по модели [1]

ется неизменной. В этом случае пределы изменения модельных контрастов незначительны и они существенно ниже измеренных. Величины K_m^{pp} , приведенные на рис. 4, б, получены с учетом изменения небрегговской компоненты рассеяния в слике. Как следует из рису-

ка, в данном случае наблюдается хорошее соответствие между результатами эксперимента и теорией.

Таким образом, рассмотренные нами вопросы касаются только установлению связи характеристик РЛ сигнала с параметрами обрушений ветровых волн. В настоящее время предполагается, что ЭПР обрушения пропорциональна его площади и формируется за счет механизма зеркального отражения. Поскольку полученные нами результаты указывают на линейную связь σ_{wb} с длиной обрушения, механизмы рассеяния в области “барашков” требуют дополнительного исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке НАН Украины (договор № 12/09 от 01.07.2009) и Государственного фонда фундаментальных исследований Украины (договор Ф28/435-2009).

1. Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G., Chapron B. A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface 1. Background model // J. Geophys. Res. – 2003. – **108C**. – P. 8054.
2. Kudryavtsev V., Akimov D., Johannessen J., Chapron B. On radar imaging of current features: 1. Model and comparison with observations // Ibid. – 2005. – **110C**. – P. 7016.
3. Anguelova M., Webster F. Whitecap coverage from satellite measurements: A first step toward modeling the variability of oceanic whitecaps // Ibid. – 2006. – **111C**. – P. 3017.
4. Mouche A. A., Hauser D., Kudryavtsev V. Radar scattering of the ocean surface and sea-roughness properties: A combined analysis from dual-polarizations airborne radar observations and models in C band // Ibid. – 2006. – **111C**. – P. 9004.
5. Mironov A. S., Dulov V. A. Detection of wave breaking using sea surface video records // Meas. Sci. Technol. – 2008. – **19**, No 1. – P. 015405.
6. Миронов А. С., Дулов В. А. Статистические характеристики событий и диссипация энергии при обрушении ветровых волн // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: Сб. науч. тр. – Севастополь: Мор. гидрофиз. ин-т, 2008. – Т. 16. – С. 97–115.
7. Malinovsky V., Sandven S., Mironov A., Korinenko A. Identification of oil spills based on ratio of alternating polarization images from ENVISAT // Proc. Geosci. and Remote Sens. Symp. IGARSS'2007. – IEEE Int. – 2007. – **2**. – P. 1326–1329.

*Морской гидрофизический институт
НАН Украины, Севастополь*

Поступило в редакцию 09.06.2010

Academician of NAS of Ukraine **V. A. Ivanov, Yu. Yu. Yurovsky, V. V. Malinovsky**

A study of the radar backscattering from the breaking of wind waves on the sea

The results of a field study of the relationship between radar backscattering parameters and geometrical characteristics of the wind wave breaking are presented. The radar cross-section of a whitecap is found to be proportional to the breaking crest length. It is shown that the accounting for a change of the non-Bragg scattering in the presence of an oil slick on the sea surface allows one to interpret experimental data correctly.