

## Развитие эмпирико-теоретической модели рассеяния радиолокационных сигналов взволнованной водной поверхностью при скользящих углах наблюдения

А.В. Ермошкин, В.В. Баханов, Н.А. Богатов

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия  
E-mail: al-ermoshkin@yandex.ru*

В работе обсуждается модернизация эмпирико-теоретической модели рассеяния радиолокационных сигналов морской поверхностью применительно к скользящим углам зондирования. На основе двухмасштабной модели рассеяния электромагнитных волн с учетом влияния обрушений ветровых волн проведено численное моделирование удельной эффективной площади рассеяния взволнованной водной поверхности при углах падения  $\theta \geq 80^\circ$ . При моделировании рассеяния радиолокационного излучения морская поверхность описывалась спектром Elfouhaily, который зависел от возраста волнения и скорости ветра. Для описания доли морской поверхности, покрытой обрушениями, было предложено эмпирическое выражение как функция скорости ветра на стандартной высоте. Продемонстрировано хорошее согласие результатов моделирования удельной эффективной площади рассеяния взволнованной поверхности при скользящих углах наблюдения с экспериментальными данными, полученными с помощью некогерентной судовой радиолокационной станции X-диапазона горизонтальной поляризации. Данные радиолокационного зондирования были получены в ходе натурных экспериментов в Черном и Карском морях. Показано, что экспериментальная зависимость мощности отраженного взволнованной поверхностью радиосигнала при скользящих углах зондирования хорошо описывается степенной функцией скорости ветра. Описанная модель может быть использована для решения обратных задач дистанционного зондирования.

**Ключевые слова:** поверхностное волнение, обрушение ветровых волн, ветер, радиолокация

### Введение

К настоящему времени модели, описывающие рассеяния взволнованной водной поверхностью радиоизлучения, достаточно развиты, однако остаются некоторые нерешенные вопросы, связанные в первую очередь с зондированием при скользящих углах, учетом вклада обрушивающихся волн, влиянием пены и брызг. В серии публикаций группы исследователей из ИКИ РАН под руководством Ю.А. Кравцова был рассмотрен вклад в суммарное рассеяние радиолокационного сигнала отражения от крутых обрушивающихся волн (Булатов и др., 2003; Churyumov et al., 2002; Кравцов и др., 1999, 2000). Авторам удалось объяснить многие наблюдаемые закономерности обратного рассеяния на настильных углах, которые не находили своего объяснения в рамках резонансной Брэгговской теории.

Как показано в работе (Valenzuela, 1978), механизмы отражения СВЧ излучения морской поверхностью зависят от углов зондирования. При зондировании в надыр, при котором работают альтиметры, отражение СВЧ радиоволн описывается преимущественно квазизеркальным рассеянием. Зондирование под умеренными углами, при которых работают РСА и скаттерометры, описывается преимущественно Брэгговским рассеянием. При скользящих углах большую роль играют нерезонансные механизмы рассеяния на крутых обрушающихся волнах, но данные углы недостижимы для спутниковой аппаратуры. Однако независимо от углов зондирования, отраженный морской поверхностью радиолокационный сигнал несет информацию о характеристиках волнения (Valenzuela, 1978).

При умеренных углах зондирования от  $20^\circ$  до  $80^\circ$  рассеяние радиосигнала взволнованной водной поверхностью хорошо описывается теорией двухмасштабного рассеяния. В данной теории вклад в величину удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) вносят шероховатости морской поверхности различного масштаба, причем этот вклад зависит от угла зондирования  $\theta$ . При больших углах зондирования становится существенным вклад обрушений ветровых волн. Для этого рассмотрим более общую модель, описанную в работе (Kudryavtsev et al., 2003). УЭПР морской поверхности определяется суммой УЭПР регулярных волн  $\sigma_{0R}$  и обрушивающихся волн  $\sigma_{0b}$ :

$$\sigma_0 = \sigma_{0R}(1-q) + \sigma_{0b}q, \quad (1)$$

где  $q$  – доля морской поверхности, покрытая обрушениями.

Радиолокационное отражение от морской поверхности описывается композитной моделью, включающей механизмы зеркального отражения и резонансного (Брэгговского) отражения от ветровых волн. Первый механизм (первое слагаемое в формуле (2)) важен при зондировании морской поверхности под углами близкими к надиру  $\theta < 20^\circ$ .

$$\sigma_{0R} = \pi R^2 \sec^4 \theta \cdot P(\eta_i, \eta_n) \left| \begin{array}{l} \eta_i = \tan \theta \\ \eta_n = 0 \end{array} \right. + \int_r \sigma_{0br}(\theta - \eta_i) P(\eta_i) d\eta_i. \quad (2)$$

Здесь  $\theta$  – угол падения, отсчитываемый от надира;  $R^2$  – коэффициент отражения Френеля;  $P(\eta_i)$  и  $P(\eta_i, \eta_n)$  – одномерная и двумерная функции плотности вероятности распределения уклонов морской поверхности в направлении зондирования ( $\eta_i$ ) и в перпендикулярном направлении ( $\eta_n$ );  $\sigma_{0br}$  – УЭПР морской поверхности связана с Брэгговским рассеянием и определяется как:

$$\sigma_{0br}(\theta') = 16\pi k_r^4 |G_p(\theta')|^2 S_r(k_b, \phi), \quad (3)$$

где  $k_r$  – волновое число электромагнитной волны;  $\theta' = \theta - \arctan(\eta_i)$  – локальный угол падения (для малых уклонов можно аппроксимировать формулой  $\theta' = \theta - \eta_i$ );  $\phi$  – угол между направлением визирования радара и направлением скорости ветра;  $|G_p|^2$  – геометрический коэффициент отражения;  $k_b = 2k_r \sin \theta'$  – локальное волновое число Брэгговской волны;  $S_r(k_b, \phi)$  – пространственный спектр возвышений поверхности. Геометрический коэффициент отражения для вертикально поляризованного излучения определяется соотношением:  $|G_v(\theta)|^2 = \frac{\cos^4 \theta (1 + \sin^2 \theta)^2}{(\cos \theta + 0,111)^4}$ , а для горизонтально поляризованного излучения:  $|G_h(\theta)|^2 = \frac{\cos^4 \theta}{(0,111 \cos \theta + 1)^4}$ .

В двухмасштабной модели (второе слагаемое в выражении (2)) спектр ветровых волн делится на два интервала: мелкомасштабные волны с волновыми числами  $k > k_d$  и крупно-

масштабные волны с  $k < k_d$ . Разделительное волновое число  $k_d = d \cdot k_r$ , где  $d$  – постоянная, меньшая единицы. В (Kudryavtsev et al., 2003) выбрано значение  $d = 1/4$ . Мелкомасштабные волны приводят к резонансному рассеянию, а крупномасштабные меняют локальный угол и ориентацию наблюдаемого участка морской поверхности. В случае зондирования радиолокатором X-диапазона (длина волны 3,2 см) разделительное волновое число равно 49 рад/м, что соответствует частоте поверхностной волны 3,5 Гц (с учетом дисперсионного соотношения).

Для расчета УЭПР по формуле необходимо иметь представление о состоянии взволнованной поверхности. Для моделирования УЭПР по формулам (1–3) был выбран спектр Elfouhaily. В (Elfouhaily et al., 1997) спектр возвышений поверхности воды представляется в виде суммы двух составляющих  $S_{elf} = (B_l + B_h) D_{elf}(\varphi) / k^3$ , длинноволновой и коротковолновой, для каждой из которых предлагается параметризация,  $B_l$  и  $B_h$  соответственно. При этом для длинноволновой части спектра в (Elfouhaily et al., 1997), предложено использовать формулу Donelan-Pierson:

$$B_l = \frac{0,006}{2} \Omega^{0,55} \left( \frac{k}{k_p} \right)^{1/2} \exp \left\{ -\frac{5}{4} \left( \frac{k}{k_p} \right)^2 (1,7 + 6 \log(\Omega)) \exp \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\sqrt{k} - \sqrt{k_p}}{0,08(1+4\Omega^3)\sqrt{k_p}} \right)^2 \right] \right\} \exp \left[ -\frac{\Omega}{\sqrt{10}} \left( \sqrt{\frac{k}{k_p}} - 1 \right) \right].$$

Для коротковолновой части спектра в [3] использовалась формула:

$$B_h = \frac{10^{-2}}{2} \left( 1 + 3 \ln \frac{u_*}{c} \right) \frac{u_*}{c} e^{-\frac{1}{4} \left( \frac{k}{k_m} - 1 \right)^2}; k_m = \frac{2g}{(23cm/s)^2}.$$

Для углового распределения спектра возвышений поверхности в (Elfouhaily et al., 1997) использована следующая аппроксимация:

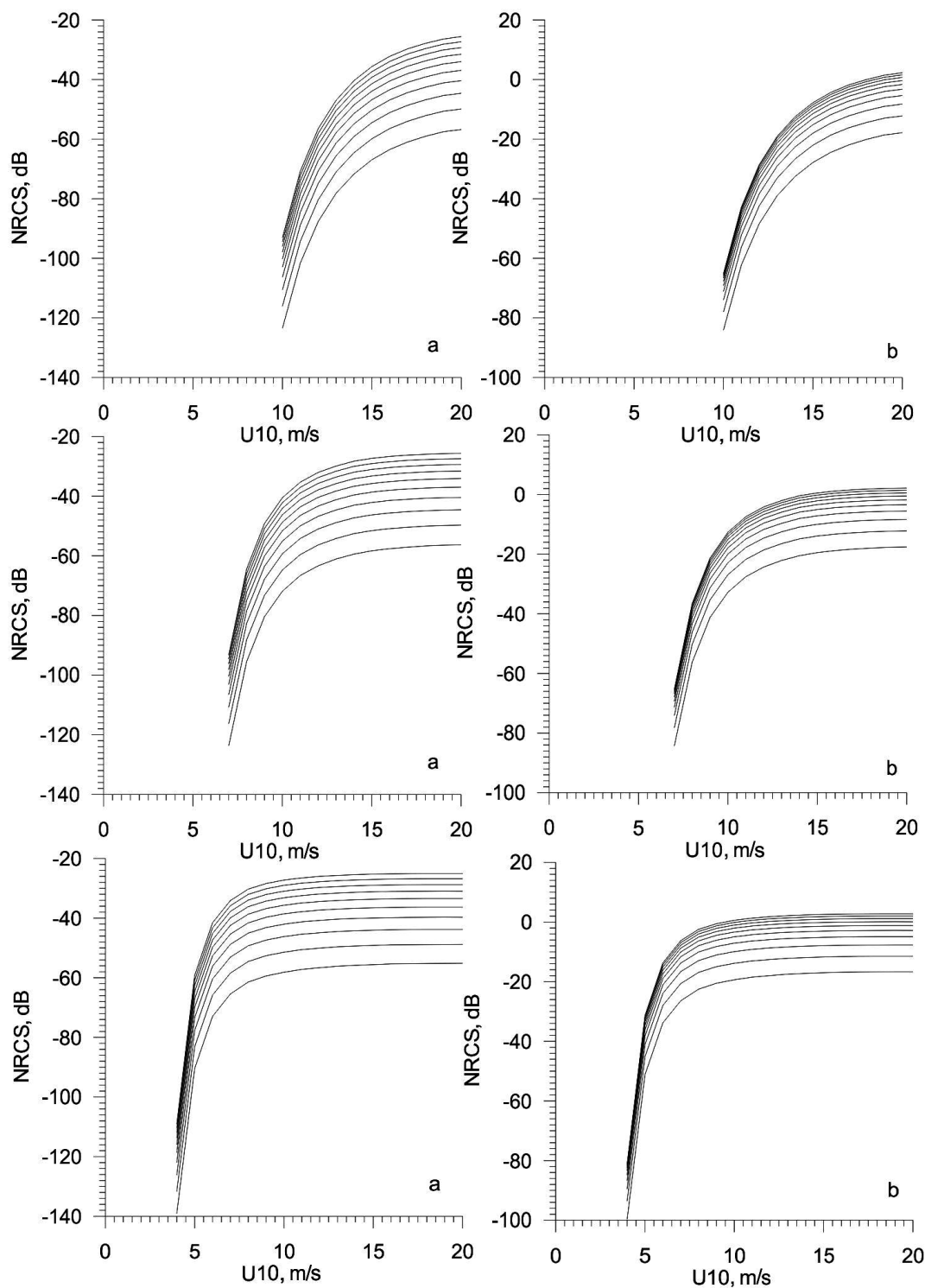
$$D(\varphi) = \frac{1}{\pi} (1 + \delta \cos(2\varphi)), \text{ где } \delta = \text{atan} \left[ \frac{\log(2)}{4} + 4 \left( \frac{c}{c_p} \right)^{2,5} + 0,13 \frac{u_*}{23} \left( \frac{c}{23} \right)^{-2,5} \right].$$

Скорость трения  $u_*$  находится из соотношения  $U_{10}(z) = \frac{u_*}{\kappa_0} \ln \left( \frac{10}{z_0} \right)$ , определяющего логарифмический профиль приводного ветра в условиях нейтральной стратификации. В данной формуле  $\kappa_0 = 0,42$  – постоянная Кармана,  $z_0$  – мера шероховатости, определяемая по формуле Чарнока:  $z_0 = B_0 \frac{u_*^2}{g}$ , где  $B_0 = 3,5 \cdot 10^{-2}$ . Параметр возраста волнения определяется как  $\Omega = \frac{U_{10} \sqrt{k_p}}{\sqrt{g}}$ . Плотность вероятности распределения уклонов морской поверхности  $P(\eta_i)$  в направлении зондирования ( $\eta_i$ ) описывается Гауссовой функцией, в которую входит дисперсия уклонов ветровых волн, определяемая через спектр крупномасштабных волн.

### Результаты моделирования УЭПР при скользящих углах зондирования

Скользящими углами зондирования будем называть углы  $\theta > 80^\circ$ . Как видно из предыдущего раздела, характеристики взволнованной поверхности определяются двумя величинами: скоростью ветра на высоте 10 м ( $U_{10}$ ) и возрастом волнения ( $\Omega$ ).

На основе двухмасштабной модели было проведено численное моделирование УЭПР взволнованной поверхности при скользких углах зондирования в зависимости от скорости ветра, угла зондирования и возраста волнения. Результаты расчетов приведены на *рис. 1*.



*Рис. 1. УЭПР морского волнения в зависимости от скорости ветра для возрастов волнения  $\Omega = 0,84$ ;  $\Omega = 1,2$ ;  $\Omega = 2$  сверху вниз, соответственно. Графики соответствуют углам зондирования от 80 до 89 градусов с шагом 1 градус. а – горизонтальная поляризация, б – вертикальная поляризация*

Данные графики демонстрируют выраженный пороговый характер зависимости УЭПР от скорости ветра. При достижении определенной скорости ветра УЭПР взволнованной поверхности резко возрастает и быстро выходит на насыщение. Пороговое значение скорости ветра зависит от возраста волнения, чем волнение моложе, тем меньше это значение (4–5 м/с для  $\Omega = 2$ , 7–8 м/с для  $\Omega = 1,2$ , 10–12 м/с для развитого волнения  $\Omega = 0,84$ ). Такая особенность объясняется характером зависимости дисперсии наклонов морского волнения от скорости ветра (рис. 2). Развитое волнение более пологое, чем молодое. Настоящие расчеты приведены без учета вклада обрушивающихся волн, который можно учесть только эмпирически. Для этого необходимо привлечь экспериментальные данные о радиолокационном зондировании при скользящих углах.

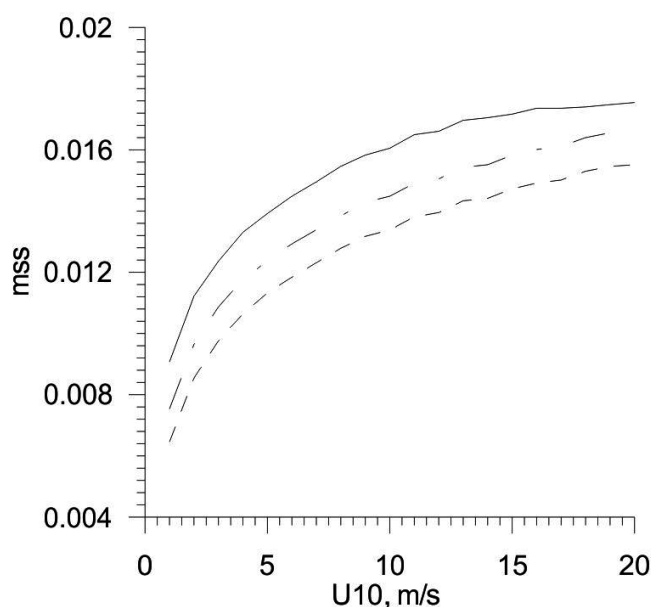


Рис. 2. Дисперсия наклонов морского волнения в зависимости от скорости ветра для возраста волнения  $\Omega = 2$  – сплошная линия,  $\Omega = 0,84$  – пунктирная линия,  $\Omega = 1,2$  – штрихпунктирная линия

### Анализ экспериментальных данных

К настоящему времени проведены многочисленные натурные эксперименты по исследованию взаимосвязи рассеивающих свойств взволнованной водной поверхности в радиоволновом диапазоне со статистическими параметрами волнения и приводного ветра. Радиолокационное зондирование взволнованной водной поверхности осуществлялось с помощью макета радиолокационной станции с цифровой регистрацией данных на базе морского навигационного радиолокатора Furuno-1942МК2. Данные в широком диапазоне скоростей ветра, длин и высот ветровых волн были получены в морских условиях в экспедициях в Черном и Карском морях.

Результаты обработки данных радиолокационного зондирования в Карском и Черном морях приведены на рис. 3а.

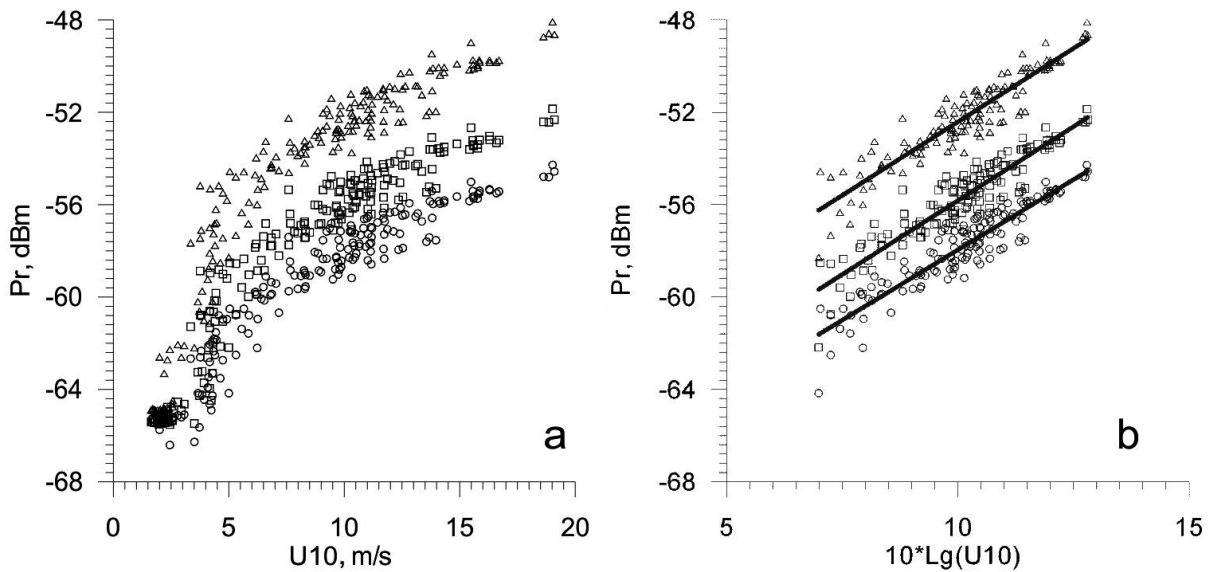


Рис. 3. Зависимость мощности принятого радиолокационного сигнала от скорости ветра (а). Линейная аппроксимация по методу наименьших квадратов зависимости мощности принятого радиолокационного сигнала от скорости ветра (б). Угол зондирования 85 градусов – треугольники, 87,5 градуса – квадраты, 88,4 градуса – круги

Приведенные зависимости имеют пороговый характер, как и предсказывает композитная модель рассеяния. На рис. 3а пороговое значение скорости ветра, при котором начинается резкий рост уровня отражения, составляет 4–5 м/с. Для прибрежных зон морей, в которых проводилось радиолокационное зондирование, характерно наличие молодого волнения, возраст которого трудно оценить. Однако, как показывают результаты моделирования для возраста  $\Omega = 2$ , пороговая величина скорости ветра оказывается близкой к наблюдаемому значению в эксперименте.

Зависимость мощности отраженного радиолокационного сигнала, которая пропорциональна УЭПР морской поверхности, хорошо описывается степенной функцией скорости ветра:  $\sigma_0 = A(\theta) \cdot U_{10}^{\delta(\theta)}$ . Как показывает рис. 3б, показатель степени для диапазона углов 85–89 градусов лежит в районе  $\delta(\theta) \approx 1,2$ . Аппроксимация проведена для данных, соответствующих скоростям ветра, превышающих пороговое значение 5 м/с.

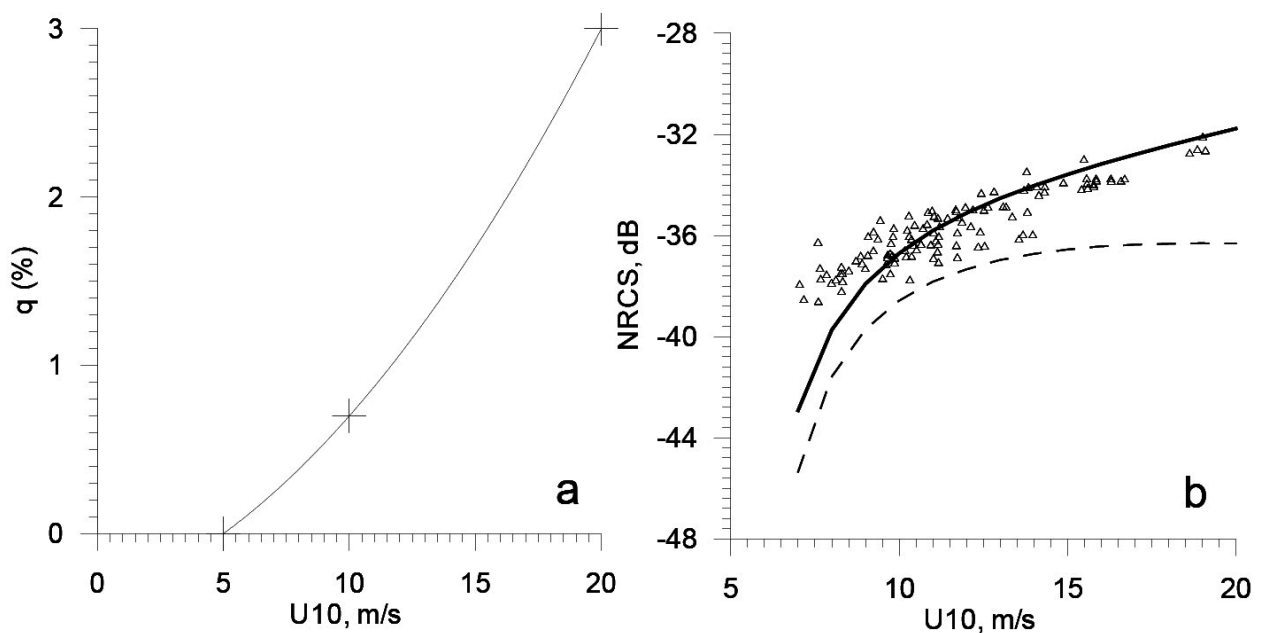
### Модернизация модели рассеяния радиолокационного излучения под скользящими углами

При сопоставлении результатов моделирования УЭПР морской поверхности с экспериментальными данными в целом обнаруживается неплохое совпадение, однако скорость роста УЭПР с ростом скорости ветра несколько выше в эксперименте, чем в теории двухмасштабного рассеяния. Это связано с неучтенным вкладом обрушивающихся волн. В настоящий момент времени величина отражения от обрушивающихся волн  $\sigma_{ob}$  и величина  $q$  являются



предметом исследований (см. формулу (1)). В работе (Kudryavtsev et al., 2003) рассматриваются эмпирические выражения для  $\sigma_{ob}$  и  $q$  применительно к умеренным углам зондирования. Для решения данной задачи при скользких углах необходимо привлечение экспериментальных данных. Вид зависимости УЭПР от скорости ветра в данном случае будет определяться параметром  $q$  – долей морской поверхности, покрытой обрушениями.

Используя данные работы (Angelova et al., 2006) была получена зависимость доли морской поверхности покрытой обрушениями от скорости ветра. На *рис. 4a* проведена полиномиальная аппроксимация следующей формулой:  $q(\%) = -0,4 + 0,05U_{10} + 0,006U_{10}^2$ . Такая аппроксимация дает значения, согласующиеся с результатами лабораторных измерений доли обрушающегося волнения с помощью скаттерометра X-диапазона (Bakhanov et al., 2013).



*Рис. 4. Зависимость доли морской поверхности покрытой обрушениями от скорости ветра (а). Сопоставление экспериментальных данных с результатами эмпирико-теоретической модели (б). Угол зондирования 85 градусов. Пунктирная линия – композитная модель, сплошная линия – модель с учетом обрушений, символы – экспериментальные данные*

В работе (Kudryavtsev et al., 2003) дается выражение для УЭПР обрушающейся волны в зависимости от угла зондирования. Для скользких углов оно принимает вид:  $\sigma_{ob} \approx a(\theta) \frac{\varepsilon_{wb}}{s_{wb}^2}$ , где  $\varepsilon_{wb} = 0,005$  – определяет отношение ширины обрушения к длине обрушивающегося фронта,  $s_{wb}^2 = 0,19$  – среднеквадратичный уклон шероховатостей в зоне обрушения,  $a(\theta)$  – коэффициент, зависящий от угла зондирования. Опираясь на описанные выше эмпирические соотношения, была промоделирована зависимость УЭПР от скорости ветра для горизонтально поляризованного излучения при скользких углах зондирования. При очень малых углах зондирования на величину УЭПР может оказывать влияние эффект затенения некоторых участков водной поверхности гребнями волн, который учитывается при численном моделировании. На *рис. 4b* проводится сопостав-

ление некоторых результатов зондирования с предложенной эмпирической моделью. Наблюдается хорошее согласие модели с экспериментальными данными.

### Заключение

В проведенной работе была развита эмпирико-теоретическая модель рассеяния радиолокационных сигналов взволнованной водной поверхностью при скользких углах наблюдения. Данная модель отличается от двухмасштабной модели дополнительным слагаемым, полученным эмпирически, которое учитывает вклад обрушивающихся волн при скользких углах наблюдения. Проверка на основе большого экспериментального материала показала хорошее совпадение результатов моделирования с экспериментальными данными. В частности, модель хорошо работает при описании зондирования при скользких углах, что иллюстрируют рисунки в статье. По сравнению с аналогичными моделями данная модель может использоваться вплоть до скользких углов зондирования  $\theta > 80^\circ$ . В перспективе развития модели представляется возможным введение коэффициента анизотропии рассеяния, полученного эмпирическим путем на основе дополнительного анализа и обработки экспериментальных данных.

Работа выполнена при поддержке стипендии ИКИ РАН и грантов РФФИ № 14-05-31355 и № 15-05-07726.

### Литература

1. Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Лаврова О.Ю., Литовченко К.Ц., Митягина М.И., Раев М.Д., Сабинин К.Д., Трохимовский Ю.Г., Чурюмов А.Н., Шуган И.В. Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // Успехи Физических Наук. 2003. 173 (1). С. 69–87.
2. Кравцов Ю.А., Литовченко К.Ц., Митягина М.И., Чурюмов А.Н. Резонансные и нерезонансные явления при микроволновом дистанционном зондировании поверхности океана // Радиотехника. 2000. № 1. С. 61–73.
3. Кравцов Ю.А., Митягина М.И., Чурюмов А.Н. Нерезонансный механизм рассеяния электромагнитных волн на морской поверхности: рассеяние на крутых заостренных волнах // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 3. С. 240–254.
4. Anguelova M., Webster F. Whitecap coverage from satellite measurements: A first step toward modeling the variability of oceanic whitecaps // J. Geophys. Res. 2006. Vol. 111C. P. 3017.
5. Bakhanov V.V., Bogatov N.A., Ermoshkin A.V., Kandaurov A.A., Kemarskaya O.N., Sergeev D.A., Troitskaya Yu.I. Laboratory investigation of short wind wave breaking modulation in the long surface wave field // Proceedings SPIE 8888, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2013. P. 888809.
6. Churyumov A.N., Kravtsov Yu.A., Lavrova O.Yu., Litovchenko K.Ts., Mityagina M.I., Sabinin K.D. Signatures of resonant and non-resonant scattering mechanisms on radar images of internal waves // International Journal of Remote Sensing. 2002. Vol. 23. № 20. P. 4341 – 4355.
7. Elfouhaily T.B., Chapron B., Katsaros K.B., Vandemark D.J. A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 107. P. 15781–15796.
8. Kudryavtsev V., Hauser D., Gaudal G., Charpon B. A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface, 1, Background model // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108(C3). P. 8054.
9. Valenzuela G.R. Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves – a review // Boundary-Layer Meteorology. 1978. Vol. 13. P. 61–85.



# Development of an empirical model for radar backscattering cross section of the ocean surface at grazing angles

A.V. Ermoshkin, V.V. Bakhanov, N.A. Bogatov

*Institute of Applied Physics RAS, Nizhniy Novgorod, 603950, Russia*  
*E-mail: al-ermoshkin@yandex.ru*

The work is devoted to the development of an empirical model of radar backscattering cross section of the ocean surface at grazing angles. Simulation results based on the composite scattering model taking into account the effect of breaking waves demonstrated a good agreement with experimental data obtained using non-coherent marine X-band radar on horizontal polarization. Radar data were obtained during field experiments in the Black and Kara Seas. It is shown that the experimental dependence of backscattering microwave power is well described by an exponential function of wind speed. For purposes of radar scattering modeling, the sea surface was described by Elfouhaily spectrum depending on wave age and wind speed. To describe the fraction of sea surface covered by breaking waves an empirical expression was proposed as a function of wind speed at the standard height. The described model can be used to solve the inverse problem of remote sensing.

**Keywords:** radar, composite model, breaking wave, surface waves

## References

1. Bulatov M.G., Kravtsov Yu.A., Lavrova O.Yu., Litovchenko K.Ts., Mityagina M.I., Raev M.D., Sabinin K.D., Trohimovskiy Yu.G., Churyumov A.N., Shugan I.V., Fizicheskie mekhanizmy formirovaniya aerokosmicheskikh radiolokatsionnykh izobrazheniy okeana (The physical formation mechanisms of aerospace radar images of the ocean), *Uspehi fizicheskikh nauk*, 2003, Vol. 173 (1), pp. 69–87.
2. Kravtsov Yu.A., Litovchenko K.Ts., Mityagina M.I., Churyumov A.N., Rezonansnye i nerezonansnye yavleniya pri mikrovolnovom distantsionnom zondirovanii poverhnosti okeana (Resonant and non-resonant phenomena in microwave remote sensing of the ocean surface), *Radiotekhnika*, 2000, No. 1, pp. 61–73.
3. Kravtsov Yu.A., Mityagina M.I., Churyumov A.N., Nerezonansnyi mekhanizm rasseyaniya elektromagnitnykh voln na morskoi poverhnosti: rasseyanie na krutykh zaostrennykh volnah (Non-resonant mechanism of scattering of electromagnetic waves on the sea surface: scattering on a steep sharp waves), *Izvesiya vysshikh ychebnykh zavedenii. Radiofizika*, 1999, Vol. 42, No. 3, pp. 240–254.
4. Anguelova M., Webster F., Whitecap coverage from satellite measurements: A first step toward modeling the variability of oceanic whitecaps, *J. Geophys. Res.* 2006, Vol. 111C, pp. 3017.
5. Bakhanov V.V., Bogatov N.A., Ermoshkin A.V., Kandaurov A.A., Kemarskaya O.N., Sergeev D.A., Troitskaya Yu.I., Laboratory investigation of short wind wave breaking modulation in the long surface wave field, *Proceedings SPIE 8888, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*. 2013, pp. 888809.
6. Churyumov A.N., Kravtsov Yu.A., Lavrova O.Yu., Litovchenko K.Ts., Mityagina M.I., Sabinin K.D., Signatures of resonant and non-resonant scattering mechanisms on radar images of internal waves, *International Journal of Remote Sensing*. 2002, Vol. 23, No. 20, pp. 4341–4355.
7. Elfouhaily T.B., Chapron B., Katsaros K.B., Vandemark D.J., A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves, *J. Geophys. Res.* 1997, Vol.107, pp. 15781–15796.
8. Kudryavtsev V., Hauser D., Gaudal G., Charpon B., A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface, 1, Background model, *J. Geophys. Res.* 2003, Vol. 108(C3), pp. 8054.
9. Valenzuela G.R., Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves – a review, *Boundary-Layer Meteorology*. 1978, Vol. 13, pp. 61–85.