

Полуэмпирическая модель рассеяния СВЧ-радиоволн на водной поверхности при ураганных условиях

Г. А. Байдаков, Н. С. Русаков, Ю. И. Троицкая

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия
E-mail: baydakov@ipfran.ru

Представлены результаты лабораторных экспериментов, в ходе которых в условиях регулярных обрушений волн в заданной точке проводились измерения удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) поверхности воды в ортогональном по приёму–излучению режиме в X-диапазоне с длиной волны 3,2 см. В качестве характеристики ветро-волнового режима были выбраны динамическая скорость ветра, спектр поверхностных волн и доля поверхности воды, покрытая обрушениями гребней длинных волн. Было установлено, что в отсутствие ветровой ряби мощность рассеянного сигнала пропорциональна относительному количеству обрушений. Для определения рассеяния открытыми участками поверхности воды была проведена оценка УЭПР ветровой ряби в рамках численной модели SSA-2 (*англ.* Small-Slope Approximation). Предложена композитная геофизическая модельная функция (ГМФ), связывающая УЭПР на ортогональной поляризации и динамическую скорость ветра, определяемая некогерентным сложением сигналов, рассеянных областями обрушения и частью поверхности воды, свободной от обрушений. Показано, что представленная зависимость демонстрирует заметную чувствительность к скорости приводного ветра именно за счёт компоненты, определяемой обрушениями. В качестве проверки предложенной ГМФ было проведено сопоставление предсказываемых ею значений с результатами обработки спутниковых данных, полученных в ураганных условиях, стандартными алгоритмами. Хорошее соответствие демонстрирует возможность применения рассматриваемой ГМФ для разработки алгоритма восстановления скорости ветра по данным рассеяния микроволнового излучения на ортогональной поляризации.

Ключевые слова: рассеяние радиоволн, СВЧ, УЭПР, обрушение волны, ортогональная поляризация, лабораторное моделирование, дистанционное зондирование, геофизическая модельная функция

Одобрена к печати: 08.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-76-86

Введение

В настоящее время основой для мониторинга состояния приповерхностного слоя океана и приводного слоя атмосферы в штормовых и ураганных условиях являются контактные средства измерений и основанные на их данных параметризации зависимостей характеристик рассеянных радиолокационных сигналов от параметров приводного ветра — так называемые геофизические модельные функции (ГМФ). Примером использования таких параметризаций служат популярные модели CMOD5 и XMOD, позволяющие определить скорость ветра на стандартной метеорологической высоте U_{10} по величине удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) водной поверхности в согласованном по приёму–излучению режиме в С- и X-диапазонах соответственно. Однако данные модели имеют ряд недостатков.

Во-первых, применение этих алгоритмов становится проблематичным при ветрах более 20–25 м/с, поскольку на данных скоростях наблюдается эффект насыщения зависимости УЭПР водной поверхности от скорости ветра (Donnelly et al., 1999; Vachon, Wolfe, 2011; Zhang, Perrie, 2012). Решение данной проблемы было найдено в использовании режима ортогонально поляризованного излучения (Hwang et al., 2010, 2015; Vachon, Wolfe, 2011; van Zadelhoff et al., 2013; Zhang, Perrie, 2012; Zhang et al., 2014), однако данных подспутниковых измерений для подобных систем оказывается существенно меньше, во многом в силу меньшего времени их применения. Вторая проблема связана с тем, что взаимодействие океана и атмосферы, в том числе такие эффекты, как генерация волн, ветровые нагоны, цирку-

ляция океана и турбулентное перемешивание его верхнего слоя, определяется не скоростью ветра на некоторой стандартной высоте, например U_{10} , а турбулентным ветровым напряжением, которое напрямую связано с такой характеристикой воздушного потока, как динамическая скорость u_* (Liu, Tang, 2016; Liu, Xie, 2014; Plant, 1982). Соответственно, для калибровки в ходе подспутниковых измерений имеет смысл измерять именно динамическую скорость, однако в натуральных условиях при сильных и ураганных ветрах это представляется отдельной и очень сложной задачей, поэтому на практике u_* обычно вычисляют при помощи балк-формулы через измеряемую на одном горизонте скорость, например $u_*^2 = C_D U_{10}^2$, где C_D — коэффициент аэродинамического сопротивления водной поверхности — эмпирически определяемая величина, зависящая от скорости ветра и параметров волнения. При этом зависимость $C_D(U_{10})$ при ураганных ветрах также имеет тенденцию к насыщению (Donelan et al., 2004; Foreman, Emeis, 2010) или даже немонотонна (Holthuijsen et al., 2012; Powell et al., 2003).

Решением указанных проблем видится лабораторное моделирование, в рамках которого возможно детальное изучение и воздушного потока, и характеристик волнения, а также многократные и длительные радиолокационные измерения в контролируемых и повторяющихся условиях. Однако в этом случае возникает дополнительная задача однозначного переноса результатов лабораторного моделирования на натурные условия. Как было отмечено ранее (Троицкая и др., 2016), существенный вклад в формирование рассеянного сигнала в ортогональном режиме вносят обрушения гребней волн. В настоящей работе для построения ГМФ не рассматривается прямая зависимость УЭПР от динамической скорости, а сопоставляются мощность рассеянного сигнала и интенсивность обрушений ветровых волн. С одной стороны, данный параметр является характеристикой конкретного лабораторного эксперимента, но в то же время его значения хорошо известны в натуральных условиях в зависимости от скорости ветра, возраста волнения и др. (Anguelova, Webster, 2006; Brumer et al., 2017; Salisbury et al., 2013; Scanlon, Ward, 2016). Это позволяет использовать полученную зависимость в условиях открытого океана.

Лабораторное моделирование

Постановка эксперимента

Экспериментальное исследование динамики обрушающегося гребня волны под действием воздушного потока проводилось на уникальной экспериментальной установке — Высоко-скоростном ветро-волновом термостратифицированном бассейне (ВВТСБ) Института прикладной физики РАН (ИПФ РАН), входящей в реестр уникальных установок Российской Федерации (<https://ckp-uf.ru/catalog/usu/77738/>). Ветро-волновой канал длиной 12 м имеет сечение от $0,7 \times 0,7$ м в начале до $0,7 \times 0,9$ м на выходе. Длина наблюдаемых волн при значениях приведённой к высоте 10 м скорости ветра от 30 до 50 м/с достигает величины от 0,6 до 1 м соответственно. Расположенный в начале канала волнопродуктор в виде подводной качающейся пластины позволяет достичь значения 1,3 м и выше, также увеличивая высоту волн.

Для исследования характеристик обрушающихся волн было необходимо обеспечить повторяемость обрушений в заданной точке. Для этого на расстоянии 10 м от начала канала под поверхностью воды была размещена наклонная пластина, имитирующая выход на мелководье. Длина пластины составляла 120 см, наклон — $12,5^\circ$, заглубление дальнего от начала канала края пластины менялось от 10 до 20 см в зависимости от скорости ветра таким образом, чтобы обеспечить достаточно интенсивное обрушение и при этом не допустить оголения конца пластины при прохождении длинной волны. Поскольку использование волнопродуктора приводит к дополнительному образованию брызг в начале канала, он работал в импульсном режиме: 2,5 с работы с частотой 1,045 Гц из нижнего положения с периодом повторения 18 с. При такой схеме сначала образующиеся брызги пролетают зону измерения, а затем её достигают длинные волны от волнопродуктора. Измерения проводились для пяти значений

скорости ветра U_{10} от 17,6 до 38,4 м/с. В данном случае важно не значение скорости ветра как таковое, а его воздействие на длинную волну, генерируемую волнопродуктором.

Исследование обрушений гребней волн проводилось двумя подходами. Во-первых, оптическими методами, которые позволили количественно определить долю поверхности, покрытую обрушениями. Во-вторых, это непосредственно радиолокационные измерения. Кроме этого, в процессе экспериментов градиентным методом с использованием трубки Пито и дифференциального манометра определялась динамическая скорость ветра, а антенна струнных волнографов позволяла восстановить пространственно-временные спектры волнения.

Доля площади обрушений в лабораторных условиях определялась при помощи видеосъёмки с теневой подсветкой. Для исключения ложного детектирования бликов в качестве областей обрушения применялась съёмка с двух камер, расположенных на высоте 273 см от поверхности воды и разнесённых на 89 см.

СВЧ-измерения

Сверхвысокочастотные (СВЧ) измерения проводились с помощью когерентного доплеровского скаттерометра X-диапазона с длиной волны 3,2 см с синхронным приёмом согласованных и ортогональных поляризаций. Антенна скаттерометра представляет собой пирамидальный рупор с квадратным сечением 224×224 мм и длиной 680 мм, который оснащён разделителем ортогональных поляризаций с разделением более чем 40 дБ (Абрамов и др., 2022). Зондирование проводилось вдоль ветро-волнового канала навстречу волнению. Рабочая область канала была экранирована радиопоглощающим материалом, в котором сделано квадратное окно прозрачности размером 40×40 см. Сторона пятна засветки на поверхности воды для точечного источника излучения при этом изменялась от 58 до 68 см для углов падения от 30 до 50° соответственно. Ширина диаграммы направленности по уровню –3 дБ на поверхности составляла около 33 см и учитывалась при измерении УЭПР.

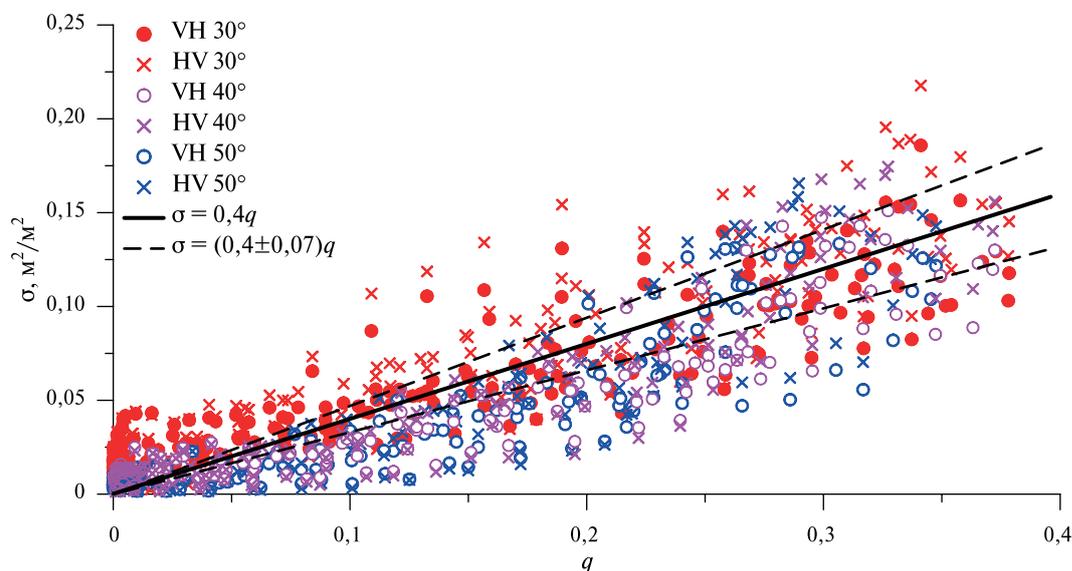


Рис. 1. Зависимости УЭПР водной поверхности σ для ортогональных поляризаций HV и VH от доли обрушений q для всех углов зондирования и скорости ветра, линии — линейная аппроксимация (1) с учётом погрешности определения коэффициента $\sigma_{об}$

Хотя оптические и СВЧ-измерения проводились независимо, синхронизация по запуску волнопродуктора позволяет совместить их временные записи. В процессе прохождения зоны измерения обрушающейся волной доля наблюдаемой поверхности воды, покрытая обруше-

ниями, изменяется от нуля до некоторого значения, определяемого скоростью ветра и заглублением подводной пластины. В результате можно построить зависимость УЭПР σ в ортогональном по приёму – излучению сигналу (поляризация HV и VH (V, *англ.* vertical; H, *англ.* horizontal)) от доли обрушений q , представленную на *рис. 1* (см. с. 78) для углов зондирования 30, 40 и 50° от вертикали при всех скоростях ветра. Видно, что точки группируются около одной кривой не только для различных углов зондирования, но и при разной скорости ветра, поскольку из-за отката перед длинной обрушающейся волной водная поверхность выглаживается и вклад коротковолновой ветровой ряби в рассеянный сигнал почти исчезает.

Поскольку область обрушения была окружена выглаженной поверхностью воды и формирование рассеянного сигнала происходило преимущественно на обрушениях, логично предположить, что УЭПР должна возрастать пропорционально доли, которую составляет площадь обрушения в пятне засветки:

$$\sigma = \sigma_{об}q, \quad (1)$$

где σ — УЭПР водной поверхности; $\sigma_{об}$ — УЭПР единицы площади обрушений; q — доля поверхности, покрытая обрушениями. Дисперсию экспериментальных точек и, в частности, облако в области близких к нулю значений q можно объяснить, в первую очередь, неточностью определения q оптическими методами, а также присутствием ветровой ряби на заднем склоне волны — в момент, когда зона обрушения выходит из области наблюдения. С учётом погрешности аппроксимации был определён коэффициент пропорциональности: $\sigma_{об} = (0,40 \pm 0,07) \text{ м}^2/\text{м}^2$, который не зависит от скорости ветра и угла падения СВЧ-излучения.

Композитная модель рассеяния сигнала

Построение модели

Очевидно, что при зондировании взволнованной водной поверхности в реальных условиях УЭПР водной поверхности определяется не только обрушениями, но и коротковолновой ветровой рябью, модулируемой длинными волнами. В связи с этим можно предложить модель, предполагающую, что общее рассеяние от поверхности определяется некогерентным сложением сигналов, рассеянных областями обрушения и частью поверхности воды, свободной от обрушений:

$$\sigma = \sigma_{об}q + \sigma_{в}(1 - q), \quad (2)$$

где $\sigma_{в}$ определяет рассеяние сигнала на ветровых волнах. Резонансное рассеяние на коротких волнах может быть вычислено в рамках модели «малых уклонов» (SSA-2, *англ.* Small-Slope Approximation) (Воронович, 1985; Voronovich, Zavorotny, 2001, 2014) с применением информации о спектре волнения. Поскольку моделирование рассеяния данным методом представляет собой отдельную сложную задачу, была использована упрощённая модель для сигнала на ортогональной поляризации (Guérin, Johnson, 2015). Упрощение модели основано на полиномиальной аппроксимации матрицы, модифицирующей исходный спектр поверхности. Моделирование рассеяния на водной поверхности в ветро-волновом канале было выполнено по формуле из работы (Guérin, Johnson, 2015), предполагающей ненадирные углы падения и слабое изменение спектра кривизны в области берегового волнового числа:

$$\sigma_{в} = 4\pi |G_{\gamma}|^2 \cotan^2(\theta) \cdot Q_H^4 \Gamma(\bar{Q}_H) mss_y. \quad (3)$$

Здесь $Q_H = 2k_{RI} \sin\theta$ — береговое волновое число, определяемое волновым числом зондирующего излучения k_{RI} и углом зондирования θ ; $\Gamma(\bar{Q}_H)$ — компонента пространственного спектра поверхностного волнения в области берегового волнового числа; $mss_y = \int_{\xi \leq Q_H} d\xi_x d\xi_y \xi_y^2 \Gamma(\xi)$ — среднеквадратичный уклон поверхности в направлении, перпен-

дикулярном проекции волнового вектора зондирующего излучения \vec{k}_{RI} на горизонтальную плоскость. Параметр $\Gamma(\bar{Q}_H)$ описывает брегговское рассеяние, а mss_y обеспечивает учёт модулирования наклона коротковолновой ряби в поперечном направлении, что обуславливает деполаризацию зондирующего излучения. Значения параметров $\Gamma(\bar{Q}_H)$ и mss_y , а также величины q в зависимости от динамической скорости u_* были оценены в рамках лабораторных измерений в режиме спорадических обрушений волн: без подводной пластины перед областью измерений и волнопродуктора. Величина $|G_\gamma|$ определяет коэффициент отражения от поверхности воды и зависит от угла падения, диэлектрической проницаемости воды и характеристик зондирующего излучения.

На рис. 2 приводятся зависимость УЭПР от динамической скорости ветра $\sigma_B(1 - q)$, рассчитанная в рамках модели SSA-2 по формуле (3) с учётом измеренной зависимости $\Gamma(\bar{Q}_H, u_*)$, а также определяющая УЭПР обрушений функция (1) с учётом $q(u_*)$. Сплошной линией на графике показана сумма этих зависимостей, согласно уравнению (2) описывающая суммарное рассеяние от водной поверхности. Видно, что итоговый вклад обоих слагаемых одного порядка, а их соотношение зависит от скорости ветра. Необходимо отметить, что сигнал резонансного рассеяния, описываемый моделью SSA-2, имеет тенденцию к насыщению аналогично сигналу на согласованной по излучению – приёму поляризации. При этом монотонный рост УЭПР при высокой скорости ветра, наблюдаемый в экспериментах, обеспечивается за счёт рассеяния на обрушивающихся гребнях волн.

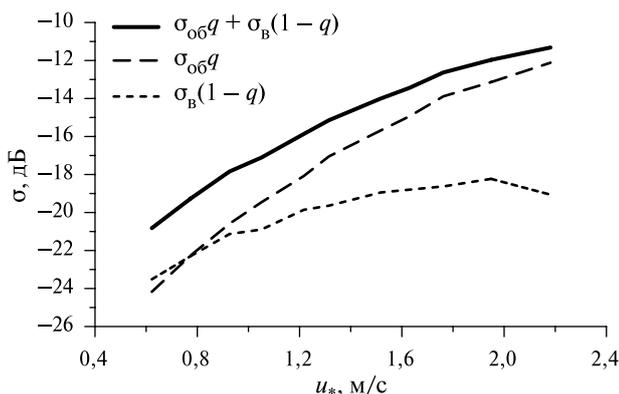


Рис. 2. Зависимость УЭПР σ от динамической скорости u_* при угле зондирования 30° : пунктирная линия — резонансное рассеяние (уравнение (3)), штриховая — рассеяние на обрушивающихся гребнях (уравнение (1)), сплошная — сумма двух функций (уравнение (2))

Таким образом, если в предложенной композитной модели использовать известные зависимости доли обрушений на водной поверхности от скорости ветра в натуральных условиях, а также включить в расчёт данные о коротковолновой части соответствующего спектра волн, то можно построить ГМФ для условий открытого океана.

Применение к данным дистанционного зондирования Земли

В работе (Foiss et al., 2015a) приведены расчёты вклада в рассеяние шероховатой поверхности воды на ортогональной поляризации методом малых уклонов (SSA-2), которые учитывают характерный спектр волнения в условиях открытого океана. Расчёты показывают, что вклад поверхности воды, свободной от обрушений, практически не зависит от скорости ветра и сравнительно слабо зависит от угла визирования. Полученная угловая зависимость была аппроксимирована выражением:

$$\sigma_{SSA} = 10^{-2,65+0,02(30^\circ-\theta)}. \quad (4)$$

Отметим, что в работе (Foiss et al., 2015a) расчёты проводились для С-диапазона, однако для нескольких значений скорости ветра в публикации (Foiss et al., 2015b) продемонстри-

ровано, что УЭПР поверхности воды на ортогональной поляризации слабо чувствительна к длине волны излучения, поэтому возможно использование результатов и для X-диапазона.

Доля поверхности воды, покрытой обрушениями, зависит от скорости ветра и параметров волнения. Эта характеристика в природных условиях экспериментально исследовалась многими авторами (Anguelova, Webster, 2006; Brumer et al., 2017; Salisbury et al., 2013), но необходимо различать область обрушения волны (*англ.* active whitecap) и пенный след, остающийся после обрушения волны (*англ.* maturing whitecap). В описываемом лабораторном эксперименте измеряются характеристики обрушающегося гребня волны, и именно они соотносятся с рассеянием на ортогональной поляризации. В работе (Scanlon, Ward, 2016) было проведено такое разделение и построена зависимость (*рис. 3*) доли площади поверхности воды q , покрытой обрушениями волн, от безразмерного параметра, называемого ветро-волновым числом Рейнольдса: $Re_{bw} = u_*^2 / \omega_p \nu_w$, где u_* — динамическая скорость в приводном пограничном слое атмосферы; ω_p — круговая частота спектрального пика ветровых волн; ν_w — кинематическая вязкость воды. Для применения в условиях более привычного набора данных о ветро-волновой обстановке Re_{bw} можно выразить также через скорость ветра на высоте 10 м, коэффициент аэродинамического сопротивления $C_D = u_*^2 / U_{10}^2$, ускорение свободного падения g и параметр возраста волнения $\Omega = U_{10} / c_p$, где c_p — фазовая скорость соответствующей пику спектра волны:

$$Re_{bw} = U_{10}^3 C_D / g \nu_w \Omega. \quad (5)$$

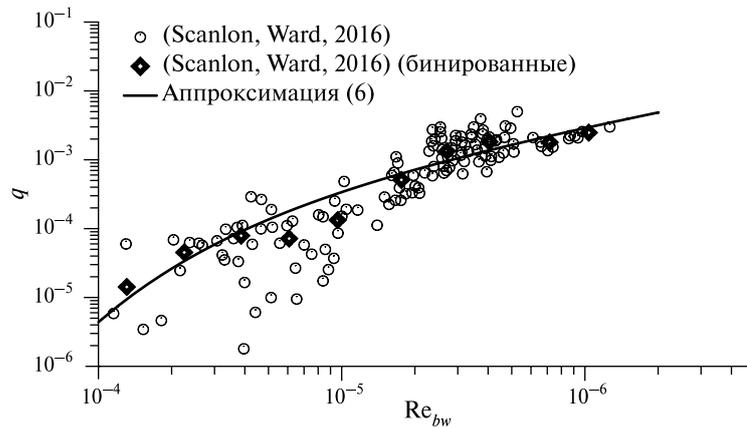


Рис. 3. Зависимость доли площади поверхности воды, покрытой обрушениями волн, q от ветро-волнового числа Рейнольдса Re_{bw} . Символы — данные из работы (Scanlon, Ward, 2016), линия — функция (6)

Представленная на *рис. 3* зависимость $q(Re_{bw})$ аппроксимирована формулой, которая следует из общих принципов статистической физики (Troitskaya et al., 2018): для построения параметризации зависимости площади поверхности воды, покрытой обрушениями, от u_* были использованы концепция универсального метода Гиббса и аналогия Буссинеска между турбулентными пульсациями скорости и тепловыми движениями молекул в газе.

$$q = 3,4 \cdot 10^{-7} \cdot Re_{bw}^{2/3} \exp \left\{ -\frac{1662,6}{Re_{bw}^{2/3}} \right\}. \quad (6)$$

Подставив (4), (5) и (6) в выражение (2), можно получить зависимость УЭПР на ортогональной поляризации от скорости ветра и параметров волнения:

$$\sigma = (0,40 \pm 0,07) 3,4 \cdot 10^{-7} \cdot U_{10}^2 \left(\frac{C_D}{g \nu_w \Omega} \right)^{2/3} \exp \left\{ -\frac{1662,6}{U_{10}^2} \left(\frac{g \nu_w \Omega}{C_D} \right)^{2/3} \right\} + 10^{-2,65+0,02(30^\circ-\theta)} \left(1 - 3,4 \cdot 10^{-7} \cdot U_{10}^2 \left(\frac{C_D}{g \nu_w \Omega} \right)^{2/3} \exp \left\{ -\frac{1662,6}{U_{10}^2} \left(\frac{g \nu_w \Omega}{C_D} \right)^{2/3} \right\} \right). \quad (7)$$

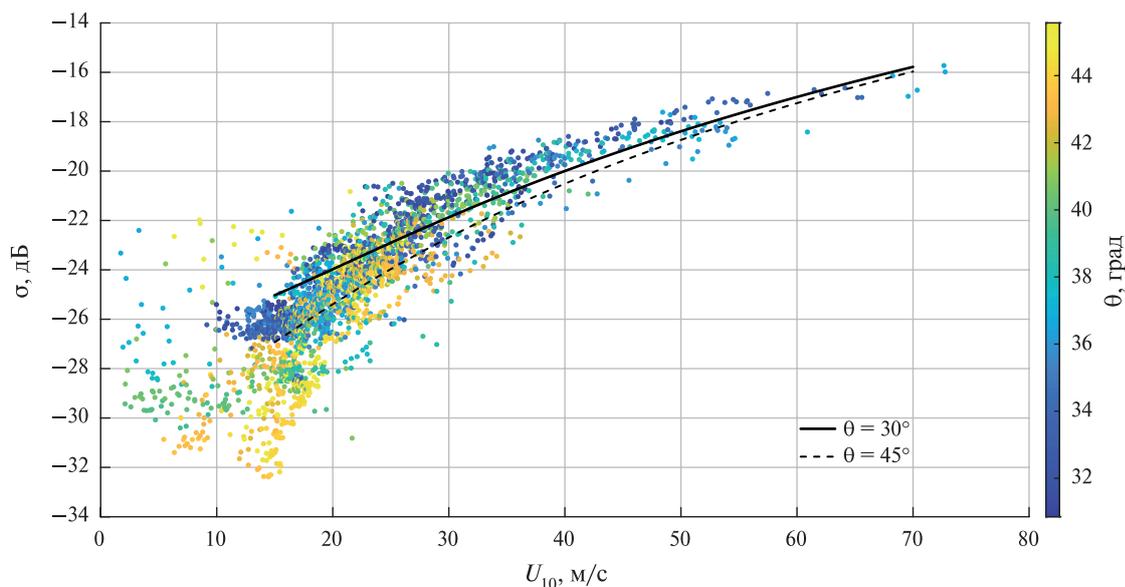


Рис. 4. Зависимость УЭПР от скорости ветра. Точки — результат из работы (Ermakova et al., 2023), чёрные линии — расчёт по формуле (7) для углов 30° (сплошная) и 45° (пунктирная)

На рис. 4 приведены значения УЭПР, полученные по РСА-изображениям (РСА — радиолокатор с синтезированной апертурой) ураганов со спутника Sentinel-1 (Ermakova et al., 2023). Линиями показаны расчёты по формуле (7) для угла падения $\theta = 30^\circ$ и 45° , где в качестве зависимости $u_*(U_{10})$ взято соотношение для тропических циклонов из работы (Kuznetsova et al., 2023). Видно, что кривые демонстрируют хорошее согласие с натурными данными в области высокой скорости ветра, показывая заметную чувствительность к скорости приводного ветра даже в условиях урагана. При этом необходимо понимать, что расхождение с экспериментальными данными в том числе может быть вызвано как существенным влиянием на результат выбираемой параметризации $u_*(U_{10})$, так и различиями УЭПР обрушений в С- и Х-диапазонах, которые могут наблюдаться, в отличие от случая резонансного рассеяния.

Заключение

Были проведены лабораторные эксперименты, в которых в условиях регулярных обрушений волн в заданной точке последовательно проводились измерения УЭПР поверхности воды в ортогональном по приёму — излучению режиме в Х-диапазоне с длиной волны 3,2 см; доли поверхности воды, покрытой обрушениями длинных волн, а также параметров турбулентного воздушного пограничного слоя и характеристик поверхностного волнения. На основании данных экспериментов определена зависимость УЭПР водной поверхности от относительной площади обрушений гребней волн, а также зависимость доли обрушений на поверхности воды от динамической скорости ветра. Поскольку СВЧ-сигнал рассеивается не только на обрушениях, была проведена оценка УЭПР ветровой ряби в рамках численной модели SSA-2, где основными входными параметрами являются характеристики ветровых волн, измеренных в рамках эксперимента, — пространственный спектр и среднеквадратичный уклон в поперечном направлении. В результате как сумма мощности сигналов, рассеянных ветровой рябью и обрушениями волн, была предложена композитная геофизическая модельная функция (ГМФ), связывающая УЭПР на ортогональной поляризации и динамическую скорость ветра — важнейшую характеристику, определяющую многие геофизические процессы.

В качестве проверки предложенной ГМФ проведено сопоставление предсказываемых ей значений и результатов обработки стандартными алгоритмами спутниковых данных, полу-

ченных в ураганных условиях. Для этого были использованы результаты расчёта в рамках SSA-2 для условий открытого океана, а также данные о характерной для этих условий зависимости количества обрушений от параметров ветро-волнового режима. Показанное хорошее соответствие, а также заметная чувствительность модели к скорости приводного ветра демонстрируют возможность применения предложенной ГМФ для разработки алгоритма восстановления скорости ветра по данным рассеяния микроволнового излучения на ортогональной поляризации.

Измерения проведены на уникальной научной установке «Комплекс крупномасштабных геофизических установок» ИПФ РАН (<http://www.ckp-rf.ru/usu/77738/>). Лабораторное моделирование выполнено в рамках проекта Российского научного фонда (РНФ) № 23-77-10060. Анализ и обработка данных, связанных с дистанционным зондированием Земли, реализованы в рамках проекта РНФ № 25-77-20016.

Литература

1. *Абрамов В. И., Байдаков Г. А., Зуйкова Э. М., Тутченко Ю. А., Троицкая Ю. И.* Способ одновременных полнополяризационных доплеровских измерений в СВЧ-диапазоне. Патент РФ 2771834. Рег. 12.05.2022.
2. *Воронович А. Г.* Приближение малых наклонов в теории рассеяния волн на неровных поверхностях // *ЖЭТФ*. 1985. Т. 89. № 1(7). С. 116–125.
3. *Троицкая Ю. И., Абрамов В. И., Ермошкин А. В. и др.* Лабораторное моделирование рассеяния СВЧ радиоволн поверхностью моря в условиях сильных и ураганных ветров // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 4. С. 45–59. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-45-59.
4. *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. No. C3. Article C03017. DOI: 10.1029/2005JC003158.
5. *Brumer S. E., Zappa C. J., Brooks I. M. et al.* Whitecap coverage dependence on wind and wave statistics as observed during SO GasEx and HiWinGS // *J. Physical Oceanography*. 2017. V. 47. No. 9. P. 2211–2235. DOI: 10.1175/JPO-D-17-0005.1.
6. *Donelan M. A., Haus B. K., Reul N. et al.* On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds // *Geophysical Research Letters*. 2004. V. 31. No. 18. Article L18306. DOI: 10.1029/2004GL019460.
7. *Donnelly W. J., Carswell J. R., McIntosh R. E. et al.* Revised ocean backscatter models at C and Ku band under high-wind conditions // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1999. V. 104. No. C5. P. 11485–11497. DOI: 10.1029/1998JC900030.
8. *Ermakova O., Rusakov N., Poplavsky E. et al.* Friction velocity and aerodynamic drag coefficient retrieval from Sentinel-1 IW cross-polarization C-SAR images under hurricane conditions // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. No. 8. Article 1985. DOI: 10.3390/rs15081985.
9. *Fois F., Hoogeboom P., Le Chevalier F., Stoffelen A.* (2015a) An analytical model for the description of the full-polarimetric sea surface Doppler signature // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2015. V. 120. P. 988–1015. DOI: 10.1002/2014JC010589.
10. *Fois F., Hoogeboom P., Le Chevalier F., Stoffelen A.* (2015b) Future ocean scatterometry: On the use of cross-polar scattering to observe very high winds // *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*. 2015. V. 53. No. 9. P. 5009–5020. DOI: 10.1109/TGRS.2015.2416203.
11. *Foreman R. J., Emeis S.* Revisiting the definition of the drag coefficient in the marine atmospheric boundary layer // *J. Physical Oceanography*. 2010. V. 40. No. 10. P. 2325–2332. DOI: 10.1175/2010JPO4420.1.
12. *Guérin C.-A., Johnson J. T.* A simplified formulation for rough surface cross-polarized backscattering under the second-order small-slope approximation // *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*. 2015. V. 53. No. 11. P. 6308–6314. DOI: 10.1109/TGRS.2015.2440443.
13. *Holthuijsen L. H., Powell M. D., Pietrzak J. D.* Wind and waves in extreme hurricanes // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2012. V. 117. No. C9. Article C09003. DOI: 10.1029/2012JC007983.
14. *Hwang P. A., Zhang B., Perrie W.* Depolarized radar return for breaking wave measurement and hurricane wind retrieval // *Geophysical Research Letters*. 2010. V. 37. No. 1. Article L01604. DOI: 10.1029/2009GL041780.

15. Hwang P.A., Stoffelen A., van Zadelhoff G.-J. et al. Cross-polarization geophysical model function for C-band radar backscattering from the ocean surface and wind speed retrieval // J. Geophysical Research: Oceans. 2015. V. 120. No. 2. P. 893–909. DOI: 10.1029/2014JC010439.
16. Kuznetsova A., Baydakov G., Dosaev A., Troitskaya Yu. Drag coefficient parameterization under hurricane wind conditions // Water. 2023. V. 15. No. 10. Article 1830. DOI: 10.3390/w15101830.
17. Liu W.T., Tang W. Relating wind and stress under tropical cyclones with scatterometer // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2016. V. 33. No. 6. P. 1151–1158. DOI: 10.1175/JTECH-D-16-0047.1.
18. Liu W.T., Xie X. Sea surface wind/stress vector // Encyclopedia of Remote Sensing. N. Y.: Springer, 2014. P. 759–767. DOI: 10.1007/978-0-387-36699-9_168.
19. Plant W.J. A relationship between wind stress and wave slope // J. Geophysical Research: Oceans. 1982. V. 87. No. C3. P. 1961–1967. DOI: 10.1029/JC087iC03p01961.
20. Powell M.D., Vickery P.J., Reinhold T.A. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones // Nature. 2003. V. 422. P. 279–283. DOI: 10.1038/nature01481.
21. Salisbury D.J., Anguelova M.D., Brooks I.M. On the variability of whitecap fraction using satellite-based observations // J. Geophysical Research: Oceans. 2013. V. 118. No. 11. P. 6201–6222. DOI: 10.1002/2013JC008797.
22. Scanlon B., Ward B. The influence of environmental parameters on active and maturing oceanic whitecaps // J. Geophysical Research: Oceans. 2016. V. 121. No. 5. P. 3325–3336. DOI: 10.1002/2015JC011230.
23. Troitskaya Yu., Abramov V., Baidakov G. et al. Cross-polarization GMF for high wind speed and surface stress retrieval // J. Geophysical Research: Oceans. 2018. V. 123. No. 8. P. 5842–5855. DOI: 10.1029/2018JC014090.
24. Vachon P.W., Wolfe J. C-band cross-polarization wind speed retrieval // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2011. V. 8. No. 3. P. 456–459. DOI: 10.1109/LGRS.2010.2085417.
25. van Zadelhoff G.-J., Stoffelen A., Vachon P.W. et al. Scatterometer hurricane wind speed retrievals using cross polarization // Atmospheric Measurement Techniques Discussions. 2013. V. 6. P. 7945–7984. DOI: 10.5194/amtd-6-7945-2013.
26. Voronovich A.G., Zavorotny V.U. Theoretical model for scattering of radar signals in K_u - and C-bands from a rough sea surface with breaking waves // Waves in Random Media. 2001. V. 11. No. 3. P. 247–269. DOI: 10.1080/13616670109409784.
27. Voronovich A.G., Zavorotny V.U. Full-polarization modeling of monostatic and bistatic radar scattering from a rough sea surface // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2014. V. 62. No. 3. P. 1362–1371. DOI: 10.1109/TAP.2013.2295235.
28. Zhang B., Perrie W. Cross-polarized synthetic aperture radar: A new potential measurement technique for hurricanes // Bull. American Meteorological Soc. 2012. V. 93. No. 4. P. 531–541. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00001.1.
29. Zhang B., Perrie W., Zhang J.A. et al. High-resolution hurricane vector winds from C-band dual-polarization SAR observations // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2014. V. 31. No. 2. P. 272–286. DOI: 10.1175/JTECH-D-13-00006.1.

A semi-empirical model of microwave scattering by water surface under hurricane conditions

G. A. Baydakov, N. S. Rusakov, Yu. I. Troitskaya

*Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia
E-mail: baydakov@ipfran.ru*

The paper presents the results of laboratory experiments in which the water surface normalized radar cross section (NRCS) was measured in a cross-pol X-band mode with a wavelength of 3.2 cm under conditions of regular wave breaking. The dynamic wind speed, the spectrum of surface waves, and the fraction of the water surface covered by long-wave crest breaking were selected as characteristics of the wind-wave regime. It was found that in the absence of wind ripples, the power of scattered signal is proportional to the normalized number of breaking events. To determine scattering by open water surface areas, the ripple NRCS was estimated using the SSA-2 numerical model. A composite

geophysical model function (GMF) was proposed that relates the cross-pol NRCS to dynamic wind speed, determined by the incoherent summation of signals scattered by breaking areas and the portion of the water surface free of breaking. It was shown that the proposed dependence exhibits significant sensitivity to surface wind speed, specifically due to the component determined by breaking events. To validate the proposed GMF, its predicted values were compared with the results of processing satellite data obtained under hurricane conditions using standard algorithms. Good agreement demonstrates the possibility of using the proposed GMF to develop an algorithm for estimating wind speed from microwave scattering data at cross-polarization.

Keywords: microwave scattering, NRCS, wave breaking, cross-pol, laboratory modeling, remote sensing, geophysical model function

Accepted: 08.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-76-86

References

1. Abramov V. I., Baydakov G. A., Zuikova E. M., Titchenko Yu. A., Troitskaya Yu. I., *Sposob odnoveremennykh polnopolyarizatsionnykh doplerovskikh izmerenii v SVCH-diapazone* (Method of simultaneous full-polarization Doppler measurements in the microwave range), Patent RU 2771834, Reg. 12.05.2022 (in Russian).
2. Voronovich A. G., Small-slope approximation in wave scattering by rough surfaces, *Soviet Physics JETP*, 1985, V. 62, No. 1, pp. 65–70.
3. Troitskaya Yu. I., Abramov V. I., Ermoshkin A. V. et al., Laboratory simulation of back-scattering of microwaves at the sea surface at strong and hurricane winds, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, V. 13, No. 4, pp. 45–59 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-45-59.
4. 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, No. C3, Article C03017, DOI: 10.1029/2005JC003158.
5. Brumer S. E., Zappa C. J., Brooks I. M. et al., whitecap coverage dependence on wind and wave statistics as observed during SO GasEx and HiWinGS, *J. Physical Oceanography*, 2017, V. 47, No. 9, pp. 2211–2235, DOI: 10.1175/JPO-D-17-0005.1.
6. Donelan M. A., Haus B. K., Reul N. et al., On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds, *Geophysical Research Letters*, 2004, V. 31, No. 18, Article L18306, DOI: 10.1029/2004GL019460.
7. Donnelly W. J., Carswell J. R., McIntosh R. E. et al., Revised ocean backscatter models at C and Ku band under high-wind conditions, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1999, V. 104, No. C5, pp. 11485–11497, DOI: 10.1029/1998JC900030.
8. Ermakova O., Rusakov N., Poplavsky E. et al., Friction velocity and aerodynamic drag coefficient retrieval from Sentinel-1 IW cross-polarization C-SAR images under hurricane conditions, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, No. 8, Article 1985, DOI: 10.3390/rs15081985.
9. Fois F., Hoogeboom P., Le Chevalier F., Stoffelen A. (2015a), An analytical model for the description of the full-polarimetric sea surface Doppler signature, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2015, V. 120, pp. 988–1015, DOI: 10.1002/2014JC010589.
10. Fois F., Hoogeboom P., Le Chevalier F., Stoffelen A. (2015b), Future ocean scatterometry: On the use of cross-polar scattering to observe very high winds, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, V. 53, No. 9, pp. 5009–5020, DOI: 10.1109/TGRS.2015.2416203.
11. Foreman R. J., Emeis S., Revisiting the definition of the drag coefficient in the marine atmospheric boundary layer, *J. Physical Oceanography*, 2010, V. 40, No. 10, pp. 2325–2332, DOI: 10.1175/2010JPO4420.1.
12. Guérin C.-A., Johnson J. T., A simplified formulation for rough surface cross-polarized backscattering under the second-order small-slope approximation, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, V. 53, No. 11, pp. 6308–6314, DOI: 10.1109/TGRS.2015.2440443.
13. Holthuijsen L. H., Powell M. D., Pietrzak J. D., Wind and waves in extreme hurricanes, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2012, V. 117, No. C9, Article C09003, DOI: 10.1029/2012JC007983.
14. Hwang P. A., Zhang B., Perrie W., Depolarized radar return for breaking wave measurement and hurricane wind retrieval, *Geophysical Research Letters*, 2010, V. 37, No. 1, Article L01604, DOI: 10.1029/2009GL041780.
15. Hwang P. A., Stoffelen A., van Zadelhoff G.-J. et al., Cross-polarization geophysical model function for C-band radar backscattering from the ocean surface and wind speed retrieval, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2015, V. 120, No. 2, pp. 893–909, DOI: 10.1029/2014JC010439.

16. Kuznetsova A., Baydakov G., Dosaev A., Troitskaya Yu., Drag coefficient parameterization under hurricane wind conditions, *Water*, 2023, V. 15, No. 10, Article 1830, DOI: 10.3390/w15101830.
17. Liu W. T., Tang W., Relating wind and stress under tropical cyclones with scatterometer, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2016, V. 33, No. 6, pp. 1151–1158, DOI: 10.1175/JTECH-D-16-0047.1.
18. Liu W. T., Xie X., Sea surface wind/stress vector, In: *Encyclopedia of Remote Sensing*, New York: Springer, 2014, pp. 759–767, DOI: 10.1007/978-0-387-36699-9_168.
19. Plant W. J., A relationship between wind stress and wave slope, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1982, V. 87, No. C3, pp. 1961–1967, DOI: 10.1029/JC087iC03p01961.
20. Powell M. D., Vickery P. J., Reinhold T. A., Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones, *Nature*, 2003, V. 422, pp. 279–283, DOI: 10.1038/nature01481.
21. Salisbury D. J., Anguelova M. D., Brooks I. M., On the variability of whitecap fraction using satellite-based observations, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2013, V. 118, No. 11, pp. 6201–6222, DOI: 10.1002/2013JC008797.
22. Scanlon B., Ward B., The influence of environmental parameters on active and maturing oceanic whitecaps, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2016, V. 121, No. 5, pp. 3325–3336, DOI: 10.1002/2015JC011230.
23. Troitskaya Yu., Abramov V., Baidakov G. et al., Cross-polarization GMF for high wind speed and surface stress retrieval, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2018, V. 123, No. 8, pp. 5842–5855, DOI: 10.1029/2018JC014090.
24. Vachon P. W., Wolfe J., C-band cross-polarization wind speed retrieval, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, V. 8, No. 3, pp. 456–459, DOI: 10.1109/LGRS.2010.2085417.
25. van Zadelhoff G. J., Stoffelen A., Vachon P. W. et al., Scatterometer hurricane wind speed retrievals using cross polarization, *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2013, V. 6, pp. 7945–7984, DOI: 10.5194/amtd-6-7945-2013.
26. Voronovich A. G., Zavorotny V. U., Theoretical model for scattering of radar signals in K_u - and C-bands from a rough sea surface with breaking waves, *Waves in Random Media*, 2001, V. 11, No. 3, pp. 247–269, DOI: 10.1080/13616670109409784.
27. Voronovich A. G., Zavorotny V. U., Full-polarization modeling of monostatic and bistatic radar scattering from a rough sea surface, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2014, V. 62, No. 3, pp. 1362–1371, DOI: 10.1109/TAP.2013.2295235.
28. Zhang B., Perrie W., Cross-polarized synthetic aperture radar: A new potential measurement technique for hurricanes, *Bull. American Meteorological Soc.*, 2012, V. 93, No. 4, pp. 531–541, DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00001.1.
29. Zhang B., Perrie W., Zhang J. A. et al., High-resolution hurricane vector winds from C-band dual-polarization SAR observations, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, V. 31, No. 2, pp. 272–286, DOI: 10.1175/JTECH-D-13-00006.1.