

УДК 528.8

КОМПОЗИТНАЯ МОДЕЛЬ РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН СВЧ-ДИАПАЗОНА НА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СКОРОСТЯХ ВЕТРА

© 2023 г. Н. С. Русаков^{1,*}, Г. А. Байдаков¹, Ю. И. Троицкая¹

Представлено академиком РАН Г.С. Голицыным 01.08.2023 г.

Поступило 01.08.2023 г.

После доработки 03.08.2023 г.

Принято к публикации 04.08.2023 г.

На Ветро-волновом канале Большого термостратифицированного бассейна ИПФ РАН проведены эксперименты, направленные на изучение механизмов рассеяния СВЧ-излучения водной поверхностью на ортогональной поляризации в условиях экстремально высоких скоростей ветра. Показано, что удельную эффективную площадь рассеяния (УЭПР) можно представить как результат некогерентного сложения вкладов от обрушающихся гребней волн и от необрушающихся ветровых волн. Эффект выглаживания поверхности воды после прохождения обрушающегося гребня позволил измерить УЭПР области обрушения на ортогональной поляризации, при этом не было выявлено зависимости УЭПР от скорости ветра и угла зондирования. УЭПР на необрушающихся ветровых волнах рассчитана в рамках модели малых уклонов с использованием экспериментально измеренных спектров ветрового волнения. Показано, что УЭПР на ортогональной поляризации монотонно нарастает с ростом скорости ветра, в том числе, и при ураганных условиях. При этом вклад в УЭПР необрушающихся ветровых волн испытывает насыщение при скорости ветра выше 25 м/с. Монотонный рост УЭПР при более высоких скоростях ветра связан с увеличением площади поверхности, занятой обрушениями. Построена композитная модель рассеяния СВЧ-излучения на взволнованной водной поверхности, которая верифицирована на основе сопоставления с данными измерений. Показана возможность построения геофизической модельной функции для условий океана на базе предложенной композитной модели, которая может быть использована при дистанционном измерении скорости ветра в условиях морского шторма и урагана, в том числе, с помощью инструментов космического базирования.

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

DOI: 10.31857/S2686739723601710, EDN: LNJBDH

ВВЕДЕНИЕ

Морские штормы и ураганы, сопровождающиеся экстремальными ветрами и волнением, штормовыми нагонами, ливневыми осадками и катастрофическими наводнениями, представляют большую угрозу для жителей прибрежных районов и морской деятельности. Для снижения вреда и ущерба, приносимого этими погодными явлениями, требуется улучшить заблаговременность и уменьшить погрешность прогноза параметров морских погодных систем (траектории, интенсивности и т.п.). С учетом редкой сети традиционных гидрометеорологических наблюдений в

открытом океане особенно актуально использование дистанционных спутниковых методов, обеспечивающих высокую производительность гидрометеорологического мониторинга на больших акваториях и расширение списка оцениваемых параметров. Приоритетное значение имеет использование радиолокационных приборов микроволнового диапазона, позволяющее получать информацию об океане и атмосфере независимо от времени суток и облачности с высоким пространственным разрешением, которое может быть достигнуто за счет синтеза апертуры.

Несмотря на то что измерение скорости ветра с помощью спутниковых радиолокационных методов является в настоящее время развитой технологией, внедренной в практику оперативного прогноза погоды, ее применение при ураганных условиях является нерешенной проблемой. Это принципиальное ограничение обусловлено эф-

¹Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

*E-mail: nikitarusakov@ipfran.ru

фектом насыщения зависимости сечения рассеяния поверхности моря при скорости ветра, превышающей 30 м/с, что приводит к быстрому нарастанию погрешностей в определении скорости ветра больше 25–30 м/с (см. [1]). В ряде работ последних лет [1, 2] было показано, что сечение обратного рассеяния поверхности моря на ортогональной поляризации характеризуется сильной (кубической) зависимостью от скорости ветра, не испытывающей насыщения при скоростях ветра выше 25 м/с [1–3]. Восстановление скорости приводного ветра основано на применении эмпирической зависимости, связывающей ее значения с сечением рассеяния поверхности океана — так называемой геофизической модельной функции (ГМФ). Основная проблема в определении ГМФ состоит в получении данных наземных наблюдений в условиях урагана, в связи с чем неопределенность ГМФ и связанные с ней ошибки в определении скорости ветра остаются высокими. В таких условиях возрастает роль теоретической или полуэмпирической модели, которая позволяет учесть и описать факторы, определяющие ГМФ, и ее верификация в контролируемых условиях.

ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРУШЕНИЙ ВОЛН

Настоящая работа посвящена построению ГМФ для ортогонально поляризованного сигнала на базе результатов лабораторного моделирования. В работе [4] было показано, что при высоких скоростях ветра рассеянный микроволновый сигнал формируется в основном на обрушениях волн. Поэтому особое внимание в постановке эксперимента было уделено измерениям на ветро-волновом канале ИПФ РАН [5] удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) обрушивающихся гребней волн. В качестве источника регулярного контролируемого обрушения были использованы генерируемые волнопродуктором длинные волны, проходящие над наклонной подводной пластиной, имитирующей выход на мелководье и обеспечивающей регулярное обрушение волн в заданной точке. Размещенный в начале канала волнопродуктор генерировал цуг из трех волн частотой 1.04 Гц и длиной около 1 м каждые 18 с. Поверхность воды находилась под действием ветра, скорость которого, приведенная к высоте 10 м, изменялась в интервале от 17 до 38 м/с для разных серий экспериментов. Для дальнейшей обработки была выбрана вторая волна цуга, поскольку ее обрушение проходило на выглаженной откатом предыдущей волны водной поверхности, и таким образом практически исключалось влияние коротковолновой ряби на формирование рассеянного сигнала. Высокая повторяемость наблюдаемой картины обрушений

обеспечила возможность многократных измерений УЭПР в одинаковых условиях, а также позволила независимо исследовать область обрушений оптическими методами.

Радиолокационные измерения проводились с использованием когерентного доплеровского скаттерометра X-диапазона с длиной волны 3.2 см с синхронным приемом согласованных и ортогональных поляризаций. Антенна скаттерометра представляет собой пирамидальный рупор длиной 680 мм с квадратным сечением со стороной 224 мм, который был оснащен разделителем ортогональных поляризаций (ОМП) с разделением поляризаций более чем 40 дБ. Рабочая область ветро-волнового канала была предварительно экранирована радиопоглощающим материалом. В качестве радиопрозрачного материала крышки рабочей секции был использован полистирол, толщина которого (11.4 мм) была подобрана таким образом, чтобы минимизировать коэффициент отражения при используемых углах зондирования. В поглощающем покрытии было сделано окно прозрачности размером 40 × 40 см, сторона квадратного пятна засветки на поверхности воды при этом для трех углов изменялась от 58 до 68 см, что меньше общей ширины канала. Угол наклона оси диаграммы направленности к вертикали принимал значения 30, 40 и 50 градусов в направлении навстречу ветру, расстояние до середины области измерения составляло 3.15 м. Были проведены измерения для 5 значений скорости ветра от 17.6 до 38.4 м/с.

Для определения доли обрушений на поверхности воды, попадающей в область диаграммы направленности антенны скаттерометра, использовались видеосъемка водной поверхности и последующая пороговая обработка полученных изображений с наложением маски. Всего было получено по 26 реализаций для каждого из условий экспериментов, синхронизация оптических и радиолокационных измерений проводилась по запуску волнопродуктора и по измерениям возвышения поверхности воды волнографом резистивного типа, расположенным непосредственно перед подводной наклонной пластиной. Полученные данные осреднялись по ансамблю реализаций. Сопоставление радиолокационных и оптических измерений позволило получить зависимость УЭПР на ортогональной поляризации от доли поверхности, занимаемой областью обрушившегося гребня волны q , которые показаны на рис. 1.

Из рис. 1 а—в видно, что зависимость УЭПР от доли обрушений не зависит от скорости ветра, а значит, и от параметров волнения, которое определяется скоростью ветра. Это связано с тем, что в данном эксперименте из-за ограниченности области засветки радиолокатора в нее попадает

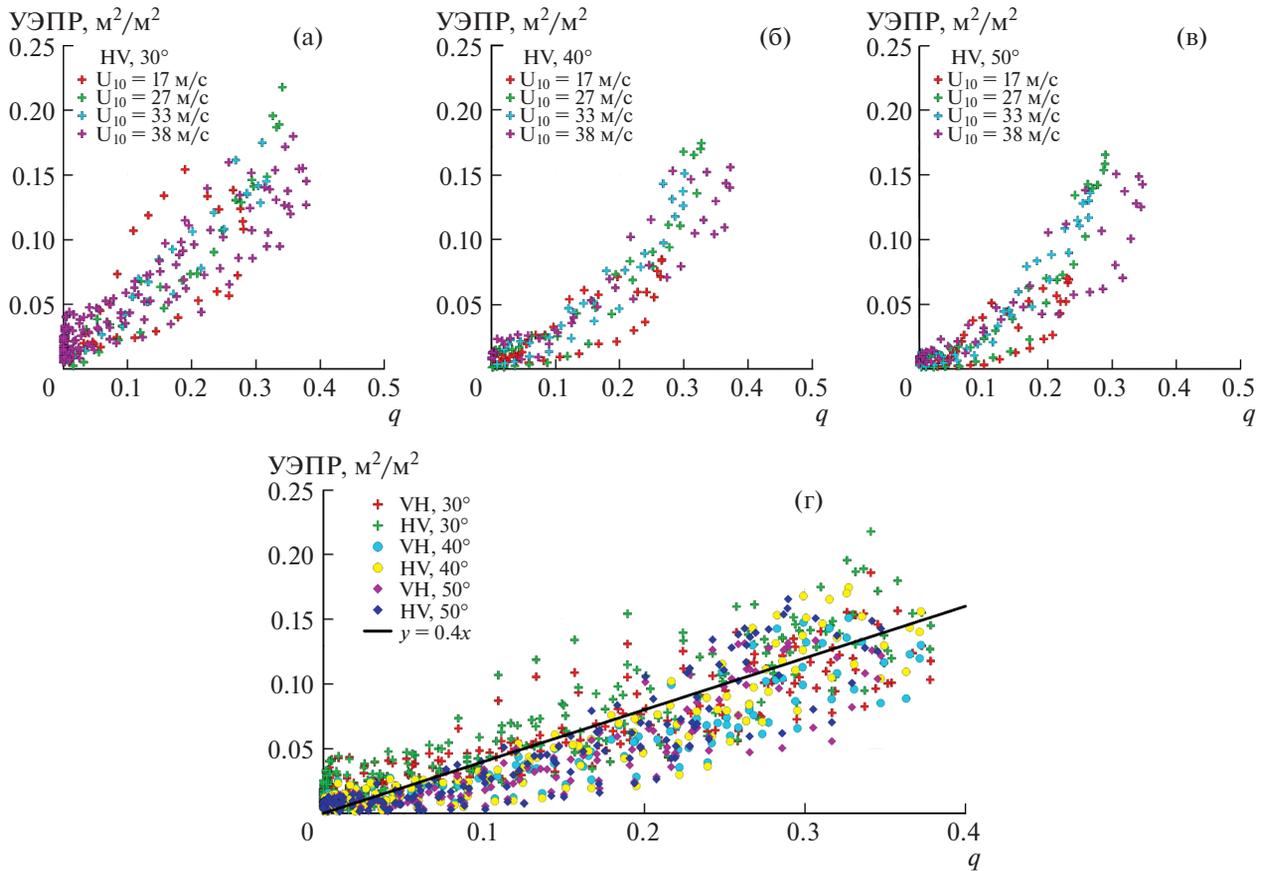


Рис. 1. Зависимости УЭПР водной поверхности для ортогональной поляризации HV от доли пенного покрытия для трех углов падения: 30 (а), 40 (б) и 50 (в) градусов; г) обе ортогональные поляризации (HV, VH) на одном графике для всех углов зондирования и скоростей ветра, сплошная линия – линейная аппроксимация данных.

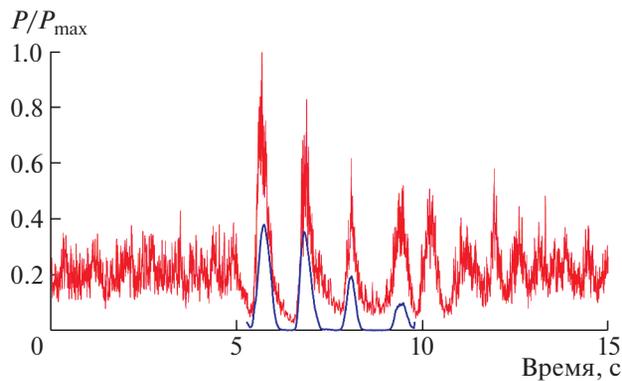


Рис. 2. Сопоставление временных зависимостей мощности рассеянного сигнала (красная линия) и доли поверхности, занимаемой областью обрушившегося гребня волны q (синяя линия) для ортогональной поляризации.

лишь часть гребня обрушивающейся волны, которая окружена выглаженной поверхностью воды. На это указывает вид зависимости сигнала, принимаемого радиолокатором от времени (рис. 2), синхронизированный с зависимостью от времени

доли обрушения в пятне засветки радиолокатора, на котором видно, что при появлении в пятне засветки обрушивающегося гребня наблюдается резкий рост интенсивности рассеянного сигнала, который падает практически до нуля после про-

хождения обрушающегося гребня. Аналогичный эффект отмечался в [6].

Эта особенность эксперимента позволяет измерить интенсивность рассеяния от области обрушений в “чистом виде”. В этом случае УЭПР водной поверхности σ_{HV} тождественно равна ЭПР обрушений, нормированной на их площадь. В математическом выражении это значит, что эффективная площадь рассеяния должна возрастать пропорционально доли поверхности q , которую составляет площадь обрушения в пятне засветки, т.е.:

$$\sigma_{HV} = \sigma_{BR} \cdot q. \quad (1)$$

Из рис. 1 г видно, что УЭПР на ортогональной поляризации не зависит от угла наклона диаграммы направленности. Следствием этого является то, что коэффициент пропорциональности σ_{BR} при этом слабо зависит от угла визирования (рис. 1 г):

$$\sigma_{BR} = 0.40 \pm 0.07 \left(\text{м}^2 / \text{м}^2 \right). \quad (2)$$

СОЗДАНИЕ КОМПОЗИТНОЙ МОДЕЛИ РАССЕЯНИЯ

При зондировании взволнованной водной поверхности в нормальных условиях интенсивность рассеянного сигнала определяется не только обрушениями волн, но и коротковолновой ветровой рябью, модулируемой длинными волнами. В связи с этим можно предложить модель, предполагающую, что общее рассеяние от поверхности σ_{HV} определяется некогерентным сложением сигналов, рассеянных областями обрушения и частью поверхности воды, свободной от обрушений:

$$\sigma_{HV} = \sigma_{BR} \cdot q + \sigma_W (1 - q), \quad (3)$$

где первое слагаемое определено выше и отвечает за вклад в рассеяние от обрушений, а второе определяет рассеяние сигнала на ветровых волнах. Доля водной поверхности, покрытой обрушениями, q зависит от скорости ветра и может быть определена с помощью обработки оптических изображений водной поверхности, покрытой ветровыми волнами, с использованием алгоритма, аналогичного примененному ранее для обработки искусственных обрушений. Рассеяние от необрушивающихся ветровых волн может быть вычислено в рамках модели “малых уклонов” (SSA-2), предложенной А.Г. Вороновичем [7–9], с использованием информации о спектре волнения. Отметим, что, как было показано в оригинальной работе [7] и методами численного моделирования [10], условие применимости модели довольно мягкое, оно фактически является требованием отсутствия затенений, и таким образом, для уме-

ренных углов визирования, использованных в настоящем эксперименте, применима к описанию рассеяния на крутых волнах, типичных для сильных ветров. Однако поскольку моделирование рассеяния этим методом представляет собой отдельную сложную задачу, развиваются модели, упрощающие численный счет в рамках SSA-2, в частности, такая модель для сигнала на ортогональной поляризации была предложена в работе [11]. Упрощение модели в данной работе основано на полиномиальной аппроксимации матрицы, модифицирующей исходный спектр поверхности. Для моделирования рассеяния на водной поверхности в ветро-волновом канале была использована формула из указанной работы, предполагающая отличные от надирных углы зондирования и слабое изменение спектра волнения в области брегговского волнового числа.

$$\sigma_{12} = 4\pi |G_{\gamma}|^2 \cotan^2(\theta_i) Q_H^4 \Gamma(\bar{Q}_H) mss_y, \quad (4)$$

где Q_H – брегговское волновое число, $\Gamma(\bar{Q}_H)$ – компонента пространственного спектра в области брегговского волнового числа, mss_y – средне-квадратичный уклон поверхности в направлении, перпендикулярном падающей волне, а величина $|G_{\gamma}|$ определяется геометрией установки и диэлектрической проницаемостью сред, которые остались постоянными в ходе эксперимента. Наличие в формуле поперечного уклона в явном виде демонстрирует важность наклона плоскости падения при рассеянии сигнала на ортогональной поляризации. Вся формула может быть интерпретирована как комбинация брегговского рассеяния (из-за наличия $\Gamma(\bar{Q}_H)$) и рассеяния на длинных волнах (из-за наличия mss_y).

Необходимые для расчета спектральные характеристики ветрового волнения, а также соответствующие им скорости ветра были определены в рамках лабораторного моделирования на ветро-волновом канале. В отличие от первой серии измерений, в данных экспериментах исследовалось чисто ветровое волнение на глубокой воде: без использования подводной пластины и волнопродуктора.

Параметры воздушного потока, такие как динамическая скорость ветра u_* и скорость ветра, приведенная к высоте 10 м, U_{10} , определялись с использованием градиентного метода, заключающегося в анализе формы профиля скорости воздушного потока в ветро-волновом канале на основе теории автомодельности дефекта профиля скорости [12]. Одновременно с записью скорости ветра на различных горизонтах, в исследуемой области антенной из трех струнных волнографов резистивного типа регистрировались возвышения волной поверхности. Далее по этим данным

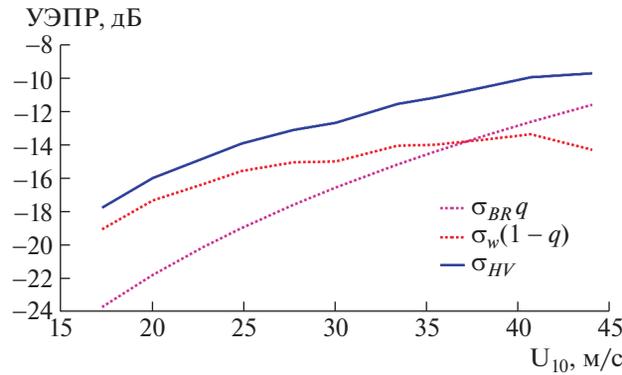


Рис. 3. Зависимость УЭПР на ортогональной поляризации, рассчитанной в рамках модели SSA-2 (красный пунктир), полученная по формуле (1) для обрушивающихся гребней (фиолетовый пунктир) и по предложенной композитной ГМФ (синяя сплошная); угол падения 30 градусов.

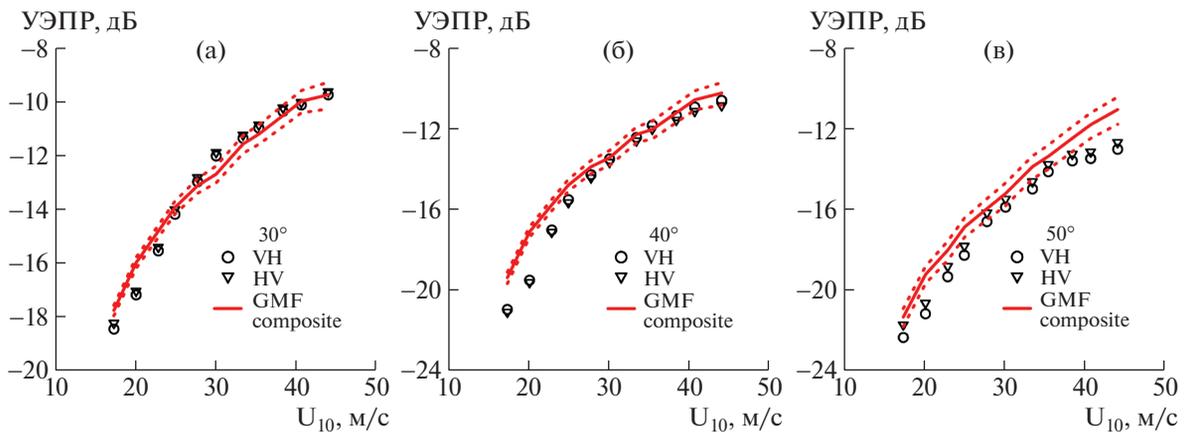


Рис. 4. Сопоставление экспериментально измеренных значений УЭПР (цветные круги) с расчетом в рамках предложенной композитной модели для углов падения 30° (а), 40° (б) и 50° (в).

были восстановлены пространственно-временные спектры ветрового волнения с использованием методики FDM, основанной на сопоставлении комплексных преобразований Фурье от временных записей с разнесенных в пространстве волнографов [12]. Данная методика накладывает ограничение сверху на восстанавливаемые волновые числа: при используемом расстоянии между волнографами в 1.25 см максимальное значение восстанавливаемого волнового числа составляет $k_{\max} = 2.5$ рад/см. Необходимо отметить, что при угле зондирования в 50 градусов, береговое волновое числа достигает значения 3 рад/см, а потому возникает необходимость в экстраполяции экспериментальных данных. В работе [13] показано, что в условиях молодого волнения значения спектра в коротковолновой области пропорциональны k^{-3} . Экстраполяция экспериментальных данных на базе функции αk^{-3} была ис-

пользована для определения входных значений при численном моделировании в рамках модели (4).

Результаты моделирования в рамках модели SSA-2 по данным лабораторных измерений приведены на рис. 3, из которого видно, что итоговый вклад обоих слагаемых в (3) одного порядка, а их соотношение зависит от скорости ветра. При этом сигнал на ортогональной поляризации, рассеянный на ветровых волнах, имеет тенденцию к насыщению аналогично сигналу на согласованной по излучению-приему поляризации (см., например, [4, 14]). При этом монотонный рост УЭПР при высоких скоростях ветра, наблюдаемый в экспериментальных данных, обеспечивается за счет рассеяния на обрушивающихся гребнях волн, что следует из анализа предложенной ГМФ.

Для верификации предложенной модели были проведены измерения УЭПР водной поверхности под действием различных скоростей ветра. Ре-

зультаты сопоставления экспериментальных и модельных значений УЭПР приведены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что предложенная модель хорошо согласуется с экспериментальными измерениями, а наибольшее расхождение наблюдается в области относительно низких скоростей ветра. Данное расхождение вероятнее всего связано с трудностью точного определения доли обрушений в этом диапазоне скоростей ветра и, как следствие, завышением вклада обрушивающихся волн в рассеянный сигнал. На рис. 4 в, соответствующем углу падения 50° , предложенная ГМФ наиболее сильно отклоняется от данных лабораторных измерений, поскольку при такой конфигурации лабораторной установки бреггоское волновое число превышает восстанавливаемые в лабораторном моделировании значения, и применяется экстраполяция экспериментальных данных.

Способность предложенной полуэмпирической композитной модели описывать поведение УЭПР на ортогональной поляризации говорит о возможности использовать разработанную методику для конструирования геофизических модельных функций, применимых в том числе для экстремальных ветров в условиях океана. Основное отличие будет заключаться в необходимости использования соответствующего спектра волнения, а также данных о зависимости доли обрушений на водной поверхности от скорости ветра.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Лабораторные измерения проведены на Уникальной научной установке “Комплекс крупномасштабных геофизических установок” ИПФ РАН (<http://www.ckp-rf.ru/usu/77738/>). Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-77-00076.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zhang B., Perrie W.* Cross-polarized synthetic aperture radar: a new potential technique for hurricanes // *Bulletin of the American Meteorological Society*. V. 93. № 4. P. 531–541.
2. *Hwang P.A., Zhang B., Perrie W.* Depolarized radar return for breaking wave measurement and hurricane wind retrieval // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. L01604. 4 pp. <https://doi.org/10.1029/2009GL041780>
3. *Mouche A., Chapron B., Knaff J., Zhao Y., Zhang B., Combot C.* Copolarized and cross-polarized SAR measurements for high-resolution description of major hurricane wind structures: Application to Irma category 5 hurricane // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. V. 124. P. 3905–3922. <https://doi.org/10.1029/2019JC015056>
4. *Troitskaya Yu., Abramov V., Baidakov G., Ermakova O., Zuikova E., Sergeev D., Ermoshkin A., Kazakov V., Kandaurov A., Rusakov N., Poplavsky E., Vdovin M.* Cross-Polarization GMF For High Wind Speed and Surface Stress Retrieval // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2018. V. 123. № 8. August 2018, <https://doi.org/10.1029/2018JC014090>
5. <http://www.ckp-rf.ru/usu/77738/>
6. *Ermakov S.A., Dobrokhoto V.A., Sergievskaya I.A., Kapustin I.A.* Suppression of Wind Ripples and Microwave Backscattering Due to Turbulence Generated by Breaking Surface Waves // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. № 21. P. 3618.
7. *Воронович А.Г.* Приближение малых наклонов в теории рассеяния волн на неровных поверхностях // *ЖЭТФ*. 1985. Т. 89. № 1 (7). С. 116–125.
8. *Voronovich A.G., Zavorotny V.U.* Theoretical Model for Scattering of Radar Signals in Ku- and C-bands from a Rough Sea Surface with Breaking Waves. // *Waves in Random Media – WAVE RANDOM MEDIA*. 2001. 11. <https://doi.org/10.1080/13616670109409784>
9. *Voronovich Alexander, Zavorotny Valery.* Full-Polarization Modeling of Monostatic and Bistatic Radar Scattering from a Rough Sea Surface // *Antennas and Propagation*. 2015. *IEEE Transactions on*. 62. 1362–1371. <https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2295235>
10. *Shira Lynn Broschat, Eric I. Thorsos.* An investigation of the small slope approximation for scattering from rough surfaces. Part II. Numerical studies // *J. Acoust. Soc. Am.* 1997. 101 (5).
11. *Guérin C.-A., Johnson J.T.* A Simplified Formulation for Rough Surface Cross-Polarized Backscattering Under the Second-Order Small-Slope Approximation // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. V. 53. № 11. P. 6308–6314. Nov. 2015. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2440443>
12. *Troitskaya Yu.I., Sergeev D.A., Kandaurov A.A., Baidakov G.A., Vdovin M.A., Kazakov V.I.* Laboratory and Theoretical Modeling of Air-sea Momentum Transfer under Severe Wind Conditions // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. C00J21. 13 p. <https://doi.org/10.1029/2011JC007778>
13. *Байдаков Г.А., Кандауров А.А., Кузнецова А.М., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И.* Натурные исследования особенностей ветрового волнения при малых значениях разгонах // *Изв. РАН Серия физическая*. 2018. Т. 82. № 11. С. 1569–1573.
14. *Donnelly W.J., Carswell J.R., McIntosh R.E., Chang P.S., Wilkerson J., Marks F., and Black P.G.* Revised Ocean Backscatter Models at C and Ku Band under High-wind Conditions // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104 (C5). P. 11485–11497.

A COMPOSITE MODEL OF MICROWAVE SCATTERING FROM WATER SURFACE IN EXTREME WIND SPEED CONDITION

N. S. Rusakov^{a,#}, G. A. Baydakov^a, and Yu. I. Troitskaya^a

^a*Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

[#]*E-mail: nikitariusakov@ipfran.ru*

Presented by Academician of the RAS G.S. Golitsyn August 1, 2023

Experiments were carried out in the wind-wave flume of Large Thermo-Stratified Wind-Wave Tank of IAP RAS aimed at studying the mechanisms of cross-polarized microwave radiation scattering from water surface under conditions of extremely high wind speeds. It is shown that the normalized radar cross-section (NRCS) can be represented as the result of an incoherent addition of contributions from breaking wave crests and from non-breaking wind waves. The effect of smoothing the water surface after passing the breaking crest made it possible to measure the NRCS of the breaking area on cross-polarization, while no dependence of the NRCS on wind speed and incidence angle was revealed. NRCS on non-breaking wind waves was calculated within the framework of the small slope approximation (SSA) using experimentally measured wind wave spectra. It is shown that the NRCS on cross-polarization increases monotonically with increasing wind speed, including hurricane conditions. In this case, the contribution of non-breaking wind waves to the NRCS saturates at wind speeds above 25 m/s. The monotonous increasing NRCS at higher wind speeds is associated with a breaking area increasing. A composite model of microwave radiation scattering from wave-covered water surface has been constructed, which has been verified on the basis of comparison with measurement data. The possibility of constructing a geophysical model function for ocean conditions based on the proposed composite model is shown, which can be used for remote sensing of sea storms and hurricanes.

Keywords: microwave scattering, wave breaking, polarized microwave radiation, laboratory modeling, remote sensing, geophysical model function