

Геофизические модельные функции зависимости микроволнового излучения холодного океана от скорости ветра на частотах К- и Ка-диапазонов для угла 55°

Е. В. Заболотских¹, Б. Шапрон^{2,1}

¹ *Российский государственный гидрометеорологический университет
Санкт-Петербург, 195196, Россия
E-mail: liza@rshu.ru*

² *Французский научно-исследовательский институт эксплуатации моря
Брест, Франция
E-mail: bertrand.chapron@ifremer.fr*

Геофизические модельные функции (ГМФ) зависимости микроволнового излучения океана от скорости ветра на частотах К- и Ка-диапазонов для угла 55° определялись на основе измерений спутникового микроволнового радиометра Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2) над свободной ото льда поверхностью океана в условиях Арктики при температурах поверхности океана (ТПО), не превышающих 10°C . Для оценки коэффициента излучения океана микроволновое излучение поверхности рассчитывалось с применением физического моделирования радиояркостной температуры системы «океан–атмосфера». Результаты моделирования позволили оценить излучение поверхности на частотах 18,7; 23,8 и $36,5\text{ ГГц}$ на вертикальной и горизонтальной поляризации при известных параметрах атмосферы, в качестве которых использовались данные реанализа ERA-Interim. Этим оценкам были сопоставлены скорости приводного ветра (V), восстановленные применением разработанного ранее алгоритма восстановления V по данным измерений AMSR2 на частотах 6,9 и $10,65\text{ ГГц}$. Результирующие ГМФ сравнивались с опубликованной широко используемой моделью. Обнаружена более существенная зависимость ГМФ от ТПО: при ТПО $< 4^\circ\text{C}$ различия в ГМФ не наблюдаются, но при $4 < \text{ТПО} < 10^\circ\text{C}$ с ростом температуры чувствительность коэффициента излучения к скорости ветра падает для всех частот как на горизонтальной, так и на вертикальной поляризации. Результирующие регрессионные прямые имеют положительный уклон. Чувствительность горизонтально поляризованного сигнала к скорости ветра более чем в 2 раза превышает чувствительность вертикально поляризованного сигнала.

Ключевые слова: микроволновое излучение, геофизические модельные функции, приводный ветер, Арктика, спутниковые микроволновые радиометры, радиояркостные температуры, AMSR2, физическое моделирование

Одобрена к печати: 07.07.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-243-254

Введение

Микроволновое излучение морской поверхности зависит от таких параметров атмосферы и океана, как скорость и направление приводного ветра, температура поверхности океана (ТПО) и его солёность, оказывающих наибольшее влияние на эффективный коэффициент излучения. Это влияние различно в разных диапазонах микроволнового спектра, и его правильная оценка способствует как развитию точных методов оценки геофизических параметров, так и пониманию процессов, протекающих в системе «океан–атмосфера» (Zabolotskikh, Chapron, 2018). Геофизические модельные функции (ГМФ) представляют собой зависимости параметров излучения или рассеяния от геофизических параметров.

В одной из первых работ, посвящённых теоретическим расчётам коэффициента излучения взволнованной морской поверхности χ , было предложено свести задачу определения χ к задаче геометрической оптики, требующей знания статистического распределения поверхностных уклонов волн (Stogryn, 1967). Однако приближение геометрической оптики справедливо лишь в случае, когда типичные масштабы кривизны поверхности много больше длины

волны излучения. Часть результатов данной теории нашла подтверждение на практике, например большая чувствительность к ветру горизонтально поляризованной компоненты радиояростной температуры ($T_{я}$), чем вертикально поляризованной. Однако имели место и расхождения с экспериментальными данными (Hollinger, 1971). Влияние изменений геометрии поверхности моря под воздействием ветра на вариации $T_{я}$ обсуждается также в работе (Petty, Katsaros, 1994). Более совершенные модели (Plant, Irisov, 2017) позволяют объяснить повышенную чувствительность коэффициента излучения, особенно на горизонтальной поляризации, к среднеквадратичным наклонам поверхности на масштабах волнения, близких к длине волны. Но использование теоретических моделей затрудняется отсутствием точных знаний о диэлектрических свойствах поверхности холодного моря и характеристиках коротких волн (Anguelova, Gaiser, 2012). Температура поверхности моря меняет характеристики волнения на масштабах от сантиметра до миллиметра, изменяя в том числе вязкость воды (Grodsky et al., 2012). Более того, $T_{я}$ излучения зависят не только от параметров атмосферы и океана, но и, например, от развитости волнения, наличия на поверхности плёнок и т.д. (Gupta et al., 2014; Hollinger, 1971; Ulaby et al., 1981). Зависимость параметров микроволнового излучения от направления волнения, т.е. от направления ветра, получила название эффекта азимутальной анизотропии микроволнового излучения (Padmanabhan et al., 2006). Эффект влияния направления ветра тем сильнее, чем выше частота излучения, однако при наличии только измерений на вертикальной или горизонтальной поляризации этот сигнал не превышает 1° (Meissner, Wentz, 2012), что затрудняет возможность использования микроволновых радиометров (кроме поляриметрических, например WindSat) для измерений полного вектора скорости приводного ветра.

Поэтому, несмотря на обилие теоретических исследований, направленных на изучение влияния геофизических параметров атмосферы и океана (главным образом приводного ветра) на микроволновое излучение океана, большинство практически используемых ГМФ носят характер эмпирических моделей, разработанных для конкретных условий экспериментов (Aziz et al., 2005; Nordberg et al., 1971; Rosenkranz, 1992; Webster Jr. et al., 1976; Wilheit, 1979). Для параметризации добавки к излучению $\Delta\chi$, вызванной ветром, используют измерения микроволновых радиометров и согласованные измерения ветра. Одно из крупнейших исследований учёных американской компании Remote Sensing Systems (RSS) завершилось в 2012 г. созданием обобщённой ГМФ зависимости микроволнового излучения от вектора ветра для широкого диапазона частот (от 6 до 90 ГГц), значений ТПО и углов зондирования (Meissner, Wentz, 2012). Однако верификация данной модели для разных условий требует проведения дополнительных исследований, поскольку ни для сильных ветров, ни для высоких частот эффективность модели не подтвердилась (Zabolotskikh, Chapron, 2018; Zabolotskikh et al., 2016).

Для частот L- и X-диапазонов ранние эмпирические модели ГМФ в последнее время были существенно усовершенствованы за счет возможности использования огромного количества спутниковых радиометрических измерений (El-Nimri et al., 2010; Reul et al., 2016; Zabolotskikh et al., 2016). Новые модели позволили повысить точность алгоритмов восстановления скорости приводного ветра в условиях сильных ветров (Zabolotskikh et al., 2014). Однако получение точных ГМФ для более высоких частот представляет собой большую проблему. Это связано с тем, что использование спутниковых измерений требует выделения $T_{я}$ океана из общего регистрируемого излучения, и чем выше частота, тем большее влияние на излучение оказывают параметры атмосферы. В условиях облачности для частот 18–37 ГГц (K- и Ka-диапазоны) расчёт $T_{я}$ океана по радиометрическим измерениям излучения системы «океан – атмосфера» возможен только при известных параметрах атмосферы. Тем не менее ряд российских работ, связанных с проведением как наземных, так и спутниковых радиометрических измерений, позволил детально исследовать радиотепловое излучение морской поверхности в разных условиях экспериментов (Садовский, 2008; Сазонов, 2017а, б). Детальный обзор основных научных результатов в области микроволновых радиометрических исследований морской поверхности, выполненных коллективом сотрудников Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), представлен в работе (Кузьмин и др., 2015).

Наиболее полный обзор существующих российских и зарубежных ГМФ для частот К- и Ка-диапазонов по состоянию на 2018 г. представлен в диссертационной работе Сазонова Д. С., выполненной в ИКИ РАН (Сазонов, 2018). В диссертации также предложена многопараметрическая модель зависимости излучения морской поверхности от поля приводного ветра на частоте в 37,5 ГГц, полученная на основании обобщения результатов комплексных наземных экспериментов. Основным заключением обзора существующих ГМФ является вывод о сложности их имплементации для интерпретации спутниковых данных в силу разброса условий и неконтролируемости параметров экспериментов.

В настоящей работе рассматриваются эмпирические ГМФ, определяющие зависимость микроволнового излучения от скорости приводного ветра в направлении 55° к надиру для частот 18,7; 23,8 и 36,5 ГГц, полученные на основе данных измерений одного из наиболее продвинутых спутниковых микроволновых радиометров — японского инструмента Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2) над свободными ото льда морями Арктики.

Методология

Для оценки коэффициента излучения океана χ радиояркостьная температура океана рассчитывалась с применением физического моделирования излучения системы «океан — атмосфера». Моделирование было выполнено для условий без осадков для параметров измерений радиометра AMSR2 на частотах 18,7; 23,8 и 36,5 ГГц на вертикальной и горизонтальной поляризации. Диапазон частот позволяет использовать упрощённую форму одномерного уравнения переноса излучения в приближении «чистого поглощения» (Степаненко и др., 1987). Погрешность такого приближения определяется параметром $2\pi\lambda/r$, где λ — длина волны излучения, r — размер гидрометеора, а также погрешностью одномерного приближения (горизонтальной неоднородностью атмосферы и подстилающей поверхности). Статистические данные по размерам облачных капель и кристаллов в Арктике позволяют заключить, что для рассматриваемых частот погрешность приближения «чистого поглощения» не превышает шумов радиометра (Синькевич и др., 2008).

Решение уравнения переноса излучения в одномерном приближении без учёта рефракции, с учётом граничных условий на верхней границе атмосферы и на поверхности позволяет представить $T_{\text{я}}$ излучения системы «океан — атмосфера» в виде:

$$T_{\text{я}}^{\Gamma, \text{B}} = T_a^{\uparrow} + \chi^{\Gamma, \text{B}} T_s \cdot e^{-\tau} + \left(T_a^{\downarrow} + e^{-\tau} \cdot T_c \right) e^{-\tau} \cdot (1 - \chi^{\Gamma, \text{B}}), \quad (1)$$

где T_a^{\uparrow} , T_a^{\downarrow} — восходящее и нисходящее излучение атмосферы соответственно; T_s — ТПО; T_c — реликтовое космическое излучение ($T_c = 2,7$ К); τ — оптическая толщина атмосферы; $T_{\text{я}}^{\Gamma, \text{B}}$ и $\chi^{\Gamma, \text{B}}$ — радиояркостьная температура микроволнового излучения системы «океан — атмосфера» и коэффициент излучения океана на горизонтальной и вертикальной поляризации соответственно. В формуле (1) T_a^{\uparrow} , T_a^{\downarrow} , τ , $T_{\text{я}}^{\Gamma, \text{B}}$ и $\chi^{\Gamma, \text{B}}$ — функции частоты. Температура $T_{\text{я}}^{\Gamma, \text{B}}$ — измеряемая радиометром $T_{\text{я}}$, а значения T_a^{\uparrow} , T_a^{\downarrow} и τ зависят только от метеорологических параметров: профиля давления $p(h)$, температуры $T(h)$, влажности $\rho(h)$ воздуха и влажности облаков $w(h)$. При известных значениях параметров атмосферы и ТПО коэффициент излучения океана может быть рассчитан как:

$$\chi^{\Gamma, \text{B}} = \frac{T_{\text{я}}^{\Gamma, \text{B}} - T_a^{\uparrow} - e^{-\tau} \cdot \left(T_a^{\downarrow} + e^{-\tau} \cdot T_c \right)}{T_s - T_a^{\downarrow} + e^{-\tau} \cdot T_c} \cdot e^{\tau}, \quad (2)$$

где

$$T_a^{\uparrow} = \frac{1}{\cos \theta} \int_0^{\infty} T(h) \alpha(h) \cdot \exp \left[-\frac{1}{\cos \theta} \int_h^{\infty} \alpha(h') dh' \right] dh, \quad (3)$$

$$T_a^\downarrow = \frac{1}{\cos\theta} \int_0^\infty T(h) \alpha(h) \cdot \exp\left(-\frac{1}{\cos\theta} \int_0^h \alpha(h') dh'\right) dh, \quad (4)$$

$$\tau = \frac{1}{\cos\theta} \int_0^\infty \alpha(h') dh', \quad (5)$$

θ — угол по отношению к нормали к поверхности; $\alpha(h)$ — коэффициент поглощения микроволнового излучения.

Формула (2) позволяет рассчитать коэффициент излучения по измерениям $T_{\text{я}}^{\Gamma, \text{В}}$ над свободной ото льда поверхностью океана при известных профилях давления $p(h)$, температуры $T(h)$, влажности воздуха $\rho(h)$ и водности облаков $w(h)$, а также температуре поверхности океана для заданных частоты и угла излучения. Значения T_a^\uparrow , T_a^\downarrow и τ рассчитываются по формулам (3–5) с использованием моделей поглощения излучения кислородом, водяным паром и облаками.

Для определения ГМФ — зависимостей $\chi^{\Gamma, \text{В}}(V)$ — требуется знание согласованных скоростей приводного ветра V . В качестве скоростей ветра для сопоставления с $T_{\text{я}}$ излучения использовались спутниковые оценки V , полученные путём применения разработанного ранее алгоритма восстановления V к данным измерений AMSR2 на частотах 6,9 и 10,65 ГГц (Zabolotskikh et al., 2013). ГМФ для данных частот достаточно хорошо изучены благодаря слабому влиянию атмосферы, и результаты исследований для ветров с $V < 15$ м/с согласуются у разных авторов (Zabolotskikh et al., 2016). Алгоритм верифицирован с помощью данных контактных измерений V буйами и нефтяными платформами, и его точность составляет ~ 1 м/с.

Данные

Для расчёта $\chi^{\Gamma, \text{В}}(V)$ использовались среднесуточные измерения AMSR2 над регионом Арктики выше 60° с. ш. Данные AMSR2 уровня Level 3 с разрешением 10×10 км на частотах 6,9; 10,65; 18,7; 23,8 и 36,5 ГГц на Г- и В-поляризации за 2015 г. были загружены с сайта Японского аэрокосмического агентства (Japan Aerospace Exploration Agency, <https://gportal.jaxa.jp>).

Данные реанализа ERA-Interim по профилям метеопараметров за 2015 г. были загружены с сайта Европейского центра среднесрочных прогнозов (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts — ECMWF, <https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily>) с разрешением $0,75 \times 0,75^\circ$ для региона Арктики. Из четырёх наборов данных ERA-Interim по профилям давления $p(h)$, температуры $T(h)$, влажности воздуха $\rho(h)$ и водности облаков $w(h)$, а также по ТПО T_s за сутки были сформированы среднесуточные значения.

Для отбора измерений над свободной ото льда морской поверхностью был загружен спутниковый продукт по среднесуточным значениям сплочённости льда из университета Бремена (<https://seaice.uni-bremen.de/data/amr2>). Этот продукт основан на применении алгоритма Artist Sea Ice (ASI) к данным измерений AMSR2 на частоте 89 ГГц (Sprenn et al., 2008), и его использование позволяет с уверенностью выделять области морской воды.

Измерения AMSR2 и данные по сплочённости льда (C) были гридированы на сетку ERA-Interim с применением линейной интерполяции, и для расчёта коэффициентов излучения отбирались данные с $C = 0$.

При этом измерения на 18,7; 23,8 и 36,5 ГГц использовались для расчёта $\chi^{\Gamma, \text{В}}$ по формуле (2), а данные измерений на 6,9 и 10,65 ГГц — для расчёта V с помощью нейронно-сетового алгоритма.

Результаты

Результирующие массивы согласованных значений $\chi^{\Gamma, \text{В}}$ были разбиты на шесть подмассивов в соответствии с диапазонами значений ТПО: $T_s \leq 0^\circ \text{C}$, $0 < T_s \leq 2^\circ \text{C}$, $2 < T_s \leq 4^\circ \text{C}$, $4 < T_s \leq 6^\circ \text{C}$, $6 < T_s \leq 8^\circ \text{C}$, $8 < T_s \leq 10^\circ \text{C}$. Поскольку количество данных с $T_s > 10^\circ \text{C}$ оказалось

меньше 5 %, этот температурный диапазон не рассматривался для вывода ГМФ. Для определения собственно ветровой поправки $\Delta\chi^{\Gamma,B}$ из полученных значений $\chi^{\Gamma,B}$ вычитался коэффициент излучения спокойной морской поверхности, расчёт которого проводился по модели (Liu et al., 2011). Для каждого из температурных диапазонов были построены зависимости $\Delta\chi_{18,7}^{\Gamma,B}$, $\Delta\chi_{23,8}^{\Gamma,B}$ и $\Delta\chi_{36,5}^{\Gamma,B}$ для частот 18,7; 23,8 и 36,5 ГГц соответственно. Анализ результатов позволил объединить в один диапазон данные с $T_s \leq 4$ °C и данные с $4 < T_s \leq 8$ °C, поскольку характер зависимостей на всех частотах оказался одинаковым. В результате осталось три диапазона температуры с разными $\Delta\chi^{\Gamma,B}$: $T_s \leq 4$ °C, $4 < T_s \leq 8$ °C, $8 < T_s \leq 10$ °C. На *рис. 1* представлены функции $\Delta\chi_{18,7}^{\Gamma}(V)$ и $\Delta\chi_{36,5}^{\Gamma}(V)$, а на *рис. 2* — $\Delta\chi_{18,7}^B(V)$ и $\Delta\chi_{36,5}^B(V)$ для диапазона температуры $4 < T_s \leq 6$ °C. Графики на *рис. 1* и *2* содержат информацию о плотности распределения данных: цвет точек на рисунках характеризует количество данных, попадающих в соответствующую ячейку при разбиении всего пространства точек на ячейки 200×200 .

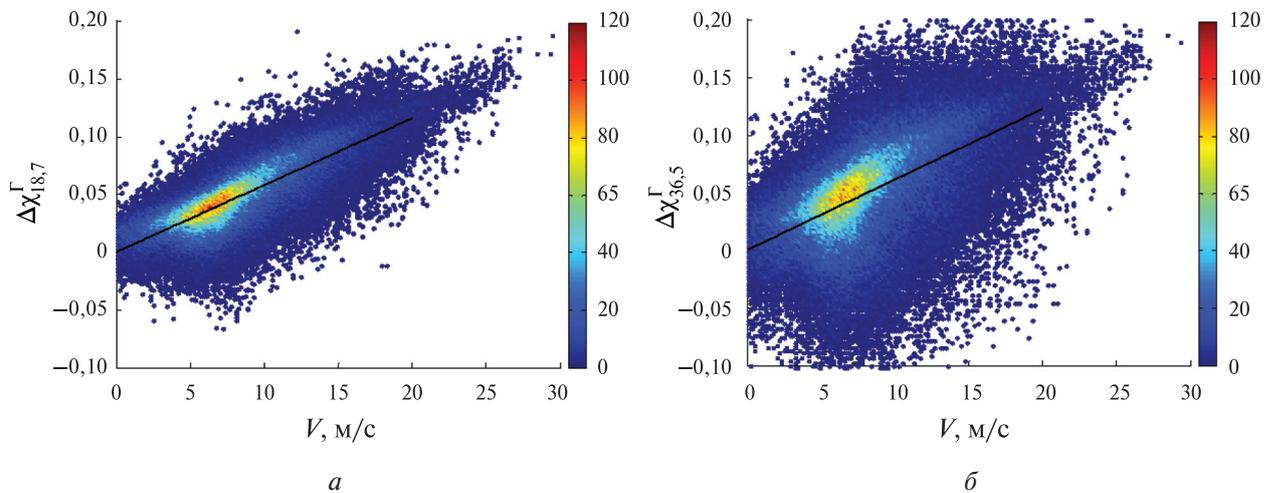


Рис. 1. Рассчитанные значения $\Delta\chi_{18,7}^{\Gamma}$ (а) и $\Delta\chi_{36,5}^{\Gamma}$ (б) как функции восстановленных по данным измерений AMSR2 скоростей приводного ветра V . Чёрная линия представляет линейную регрессионную кривую. Цвет обозначает количество данных в соответствующем диапазоне значений V и $\Delta\chi$

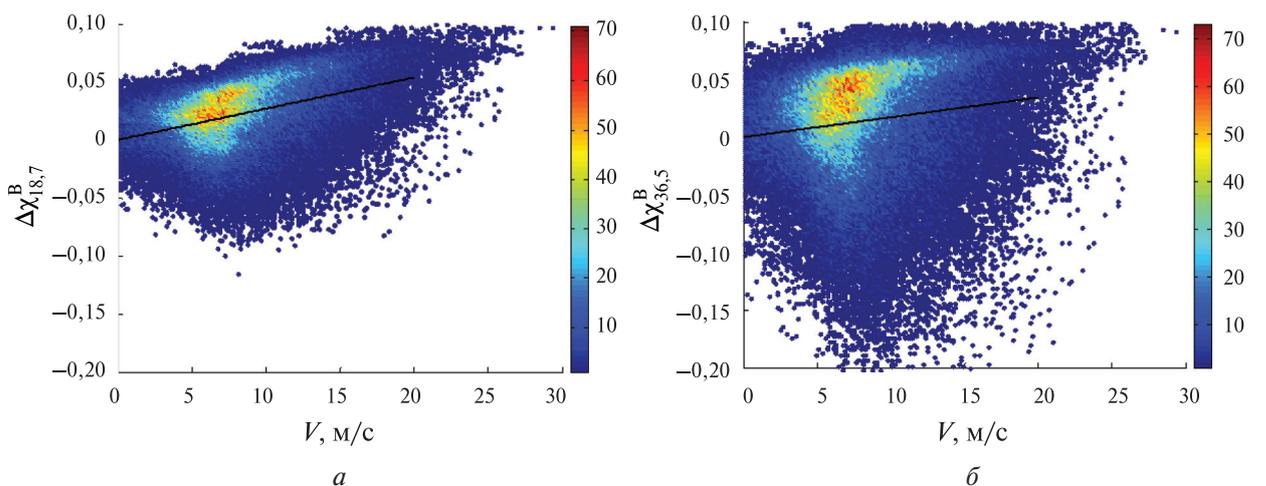


Рис. 2. Рассчитанные значения $\Delta\chi_{18,7}^B$ (а) и $\Delta\chi_{36,5}^B$ (б) как функции восстановленных по данным измерений AMSR2 скоростей приводного ветра V . Чёрная линия представляет линейную регрессионную кривую. Цвет обозначает количество данных в соответствующем диапазоне значений V и $\Delta\chi$

Существенный разброс данных вызван как неопределённостями в задании состояния атмосферы, так и разнообразием эффектов воздействия приводного ветра на результирующую радиояркость излучения океана. Невысокая точность профилей атмосферных параметров по данным реанализа, очевидно, вносит вклад в разброс χ в любом диапазоне скоростей ветра и является причиной значительно бóльших вариаций $\Delta\chi$ на бóльших частотах (36,5 ГГц на *рис. 1* и 2а сравнительно с частотой 18,7 ГГц на *рис. 1* и 2б). Однако характер поля точек как на горизонтальной, так и на вертикальной поляризации (наличие явного «треугольника», ограничивающего поле $\chi(V)$) позволяет предположить изменения механизма воздействия ветра на морскую поверхность при некоторых пороговых значениях V . Принято считать, что эти изменения связаны с началом формирования различных пенных образований (Anguelova, Gaiser, 2012; Raizer, 2007). Именно пена повышает результирующий коэффициент излучения на вертикальной поляризации, компенсируя отрицательный эффект воздействия ветра за счёт изменений геометрии поверхности (Meissner, Wentz, 2012). Однако, как видно на *рис. 1*, участок с отрицательным значением $\Delta\chi$ для части данных характерен и для излучения на горизонтальной поляризации, что не укладывается в рамки традиционных представлений. Неучёт эффекта азимутальной анизотропии вносит определённый вклад в разброс точек на *рис. 1* и 2, однако он много меньше, чем влияние неопределённостей в задании параметров влагосодержания атмосферы.

Авторы работы (Meissner, Wentz, 2012) для вывода ГМФ аппроксимировали $\chi(V)$ полиномом 5-й степени. Мы обнаружили, что использование полинома степени выше 1-й нецелесообразно. Несмотря на то, что ветровая зависимость сигнала, очевидно, нелинейна, выделить диапазоны разного влияния ветра на излучение при имеющемся разбросе точек, как это сделано, например, в работе (Zabolotskikh et al., 2016), не представляется возможным. В результате были построены регрессионные кривые $\Delta_i\chi_v^{\Gamma,B}(V) = a_{vi}^{\Gamma,B}V$, где i — температурный диапазон. Коэффициенты представлены в *таблице*.

Коэффициенты a_{vi} в линейной зависимости коэффициента излучения, вызванной воздействием ветра на морскую поверхность, от скорости ветра $\Delta_i\chi_v^{\Gamma,B}(V) = a_{vi}^{\Gamma,B}V$; i — температурный диапазон: 1 — $T_s \leq 4$ °C; 2 — $4 < T_s \leq 8$ °C; 3 — $8 < T_s \leq 10$ °C; v — частота, ГГц

| v, ГГц | 18,7 | | 23,8 | | 36,5 | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Г | В | Г | В | Г | В |
| 1 | 0,0058 | 0,0026 | 0,0065 | 0,0041 | 0,0062 | 0,0017 |
| 2 | 0,0055 | 0,0023 | 0,0058 | 0,0034 | 0,0055 | 0,0010 |
| 3 | 0,0044 | 0,0008 | 0,0041 | 0,0010 | 0,0034 | 0,0001 |

Графики зависимостей $\Delta_i\chi_v^{\Gamma,B}(V) = a_{vi}^{\Gamma,B}V$ на частотах 18,7 и 36,5 ГГц для трёх температурных диапазонов при Г- и В-поляризации представлены на *рис. 3* и *4* (см. с. 249) соответственно. Для сравнения приведены ГМФ, заимствованные из модели (Meissner, Wentz, 2012) (кривая на рисунках обозначена MW), рассчитанной для $T_s = 8$ °C. Для более низких температур результаты расчётов по модели MW практически такие же, поэтому на рисунках показана одна кривая и указан диапазон $T_s \leq 10$ °C. Следует, однако, отметить, что, хотя модель MW выведена для всего диапазона ТПО, авторы отмечают, что данные для её вывода в диапазоне низких температур океана практически не представлены.

Результаты, полученные для низких температур морей Арктики, частично согласуются с моделью MW, а частично — отличаются. Во-первых, зависимость ГМФ от ТПО выражена гораздо отчётливее: по модели MW ГМФ для диапазона температур $T_s \leq 10$ °C величина $\Delta\chi^{\Gamma}(T_s) < 0,001$, а $\Delta\chi^{\text{B}}(T_s)$ ещё меньше, и кривые для разных температур сливаются в одну. Результаты настоящей работы свидетельствуют об отсутствии различий в ГМФ при $T_s < 4$ °C и значительных отличиях при $4 < T_s \leq 10$ °C. С ростом температуры угол наклона кривых $a_v = \delta\chi/\delta V$ падает для всех частот как на горизонтальной поляризации, так и на вертикальной.

То есть при повышении ТПО чувствительность излучения океана к ветру понижается. Чем выше частота, тем больше выражено это температурное влияние. Рост частоты в рассмотренном частотном диапазоне 18,7–36,5 ГГц ведёт к небольшому увеличению $\delta\chi/\delta V$ на Г-поляризации и снижению чувствительности на В-поляризации более чем в 1,5 раза. Мы также не нашли оснований для вывода о наличии участка с падением $\Delta\chi^B(V)$ на В-поляризации (отрицательных значений $\delta\chi/\delta V$), характерного для модели MW. Наблюдаемый разброс $\Delta\chi^B(V)$ (см. рис. 2) свидетельствует о разных состояниях морской поверхности, вызванных воздействием приводного ветра. Часть из них действительно вносит вклад в уменьшение микроволнового сигнала от поверхности, но часть — в его увеличение. Результирующая регрессионная прямая имеет положительный уклон.

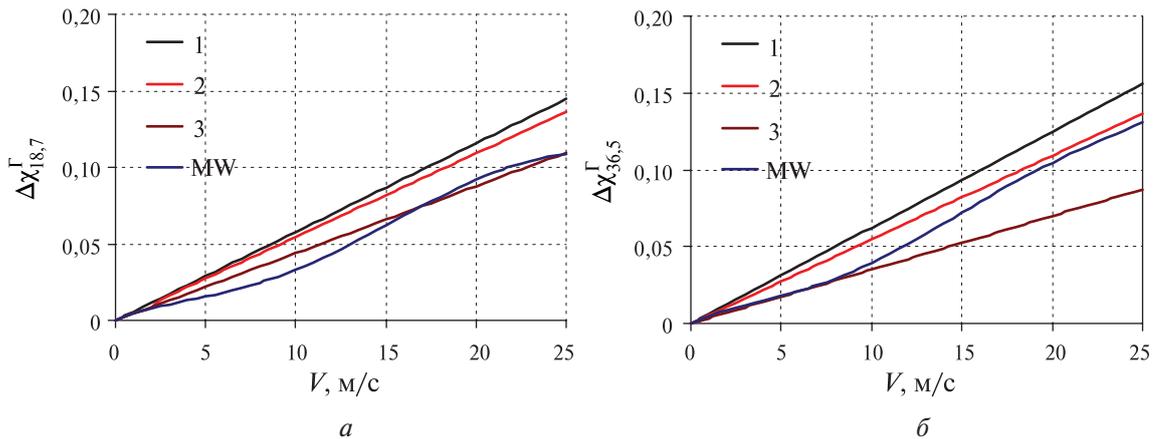


Рис. 3. Линейные регрессионные кривые зависимости поправки к коэффициенту горизонтально поляризованного излучения океана от скорости ветра на частоте 18,7 ГГц — $\Delta_i\chi_{18,7}^\Gamma(V)$ (а) и на частоте 36,5 ГГц — $\Delta_i\chi_{36,5}^\Gamma(V)$ (б). MW — ГМФ по модели (Meissner, Wentz, 2012) для диапазона температуры $T_s \leq 10^\circ\text{C}$. Угол излучения — 55° .

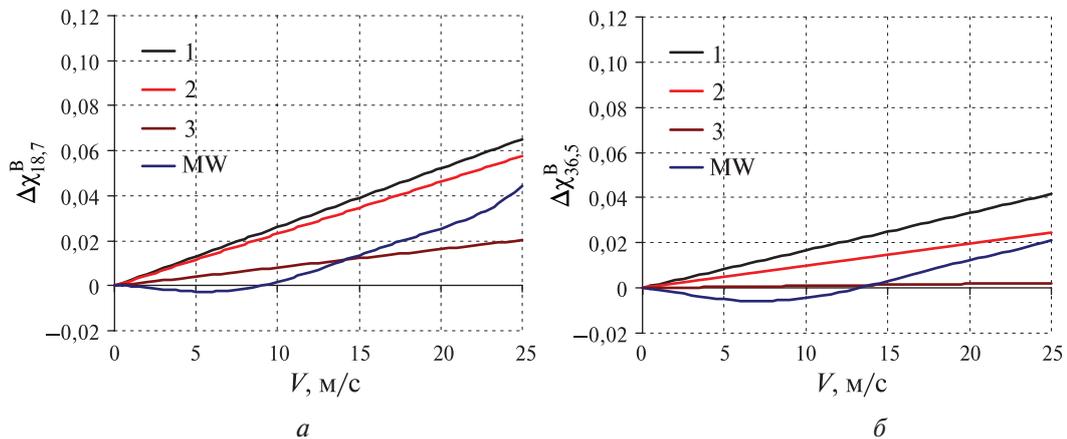


Рис. 4. Линейные регрессионные кривые зависимости поправки к коэффициенту вертикально поляризованного излучения океана от скорости ветра на частоте 18,7 ГГц — $\Delta_i\chi_{18,7}^B(V)$ (а) и на частоте 36,5 ГГц — $\Delta_i\chi_{36,5}^B(V)$ (б). MW — ГМФ по модели (Meissner, Wentz, 2012) для диапазона температуры $T_s \leq 10^\circ\text{C}$. Угол излучения — 55° .

Если перевести значения $\Delta\chi$ в радиояркостную температуру океана $\Delta T_{\text{яок}} = \Delta\chi \cdot T_s$, то можно количественно оценить итоговую дополнительную радиояркость поверхности за счёт воздействия приводного ветра. На частоте 18,7 ГГц на горизонтальной поляризации при температуре T_s ниже 4°C она составляет $\sim 1,5\text{ K}$, понижаясь до $1,2\text{ K}$ при $T_s = 10^\circ\text{C}$. Для 36,5 ГГц

$\Delta T_{\text{яок}} = 1,7$ К при $T_s \leq 4$ °С и $\Delta T_{\text{яок}} = 1$ К при $T_s = 10$ °С. На вертикальной поляризации на 18,7 ГГц $\Delta T_{\text{яок}} = 0,7$ К при $T_s \leq 4$ °С и $\Delta T_{\text{яок}} = 0,2$ К при $T_s = 10$ °С, уменьшаясь до 0,4 и 0,02 К соответственно на 36,5 ГГц. Очевидно, что зарегистрировать вертикально поляризованный сигнал ветра с учётом ослабляющего влияния атмосферы и шумов аппаратуры представляется возможным лишь при сильном ветре над холодными водами. В то время как горизонтально поляризованный ветровой сигнал настолько сильный, что при стандартных уровнях поглощения он будет превышать шумы радиометра при ветровом градиенте ~ 1 м/с.

Заключение

С использованием данных измерений японского спутникового микроволнового радиометра AMSR2 и результатов физического моделирования разработаны эмпирические геофизические модельные функции зависимости влияния скорости приводного ветра на коэффициент горизонтально и вертикально поляризованного излучения океана на частотах 18,7; 23,8 и 36,5 ГГц для холодных вод морей Арктики для угла 55°. При расчете ГМФ использовались данные реанализа ERA-Interim для оценки атмосферных составляющих микроволнового излучения системы «океан – атмосфера» и согласованные скорости ветра V , восстановленные по данным AMSR2 при помощи разработанного ранее алгоритма, применённого к измерениям на частотах 6,9 и 10,65 ГГц.

Полученные ГМФ демонстрируют более существенную зависимость от ТПО, чем широко используемая опубликованная модель (Meissner, Wentz, 2012). При $T_s < 4$ °С различия в ГМФ не наблюдаются, но при $4 < T_s \leq 10$ °С с ростом температуры чувствительность $\delta\chi/\delta V$ падает для всех частот как на горизонтальной, так и на вертикальной поляризации. Чем выше частота, тем больше влияние температуры на $\delta\chi/\delta V$. Рост частоты в диапазоне 18,7–36,5 ГГц ведёт к небольшому увеличению $\delta\chi/\delta V$ на Г-поляризации и снижению чувствительности на В-поляризации более чем в 1,5 раза. Наблюдаемый разброс значений $\Delta\chi$ свидетельствует о наличии разных состояний морской поверхности, вызванных воздействием приводного ветра, дающих вклад в коэффициент излучения с разным знаком на обеих поляризациях. Результирующие регрессионные прямые имеют положительный уклон. При этом чувствительность горизонтально поляризованного сигнала к скорости ветра более чем в 2 раза превышает чувствительность вертикально поляризованного сигнала.

Спутниковый радиометрический ветровой сигнал на вертикальной поляризации для рассматриваемых частот превышает шумы радиометра лишь при сильном ветре над холодными водами. Горизонтально поляризованный ветровой сигнал превышает шумы радиометра при ветровом градиенте от 1 м/с.

Использование уточнённых ГМФ позволит повысить точность алгоритмов восстановления приводного ветра, основанных на каналах измерений в К- и Ка-диапазонах, что даст возможность получать карты ветра с более высоким пространственным разрешением.

Исследования, представленные в данной статье, выполнены за счёт гранта Российского научного фонда № 17-77-30019.

Литература

1. Кузьмин А. В., Репина И. А., Садовский И. Н., Селунский А. Б. Микроволновые радиометрические исследования морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 76–97.
2. Садовский И. Н. Методика дистанционного определения характеристик ветрового волнения: 1. Расчет радиоярких контрастов взволнованной водной поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 2. № 5. С. 192–198.
3. Сазонов Д. С. (2017а) Корреляционный анализ экспериментальных дистанционных измерений и моделей микроволнового излучения взволнованной водной поверхности // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 3. С. 53–64.

4. Сазонов Д. С. (2017б) Моделирование микроволнового излучения взволнованной морской поверхности на основе экспериментальных данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 271–287.
5. Сазонов Д. С. Многопараметрическая модель радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности: анализ спутниковой информации и надводных измерений: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2018. 138 с.
6. Синькевич А. А., Степаненко В. Д., Довгалюк Ю. А. Вопросы физики облаков. 50 лет отделу физики облаков ГГО. СПб.: Астерион, 2008. 513 с.
7. Степаненко В. Д., Щукин Г. Г., Бобылев Л. П., Матросов С. Ю. Радиотеплокация в метеорологии. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 284 с.
8. Anguelova M. D., Gaiser P. W. Dielectric and Radiative Properties of Sea Foam at Microwave Frequencies: Conceptual Understanding of Foam Emissivity // Remote Sensing. 2012. V. 4. Iss. 5. P. 1162–1189.
9. Aziz M. A., Reising S. C., Asher W. E., Rose L. A., Gaiser P. W., Horgan K. A. Effects of air-sea interaction parameters on ocean surface microwave emission at 10 and 37 GHz // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2005. V. 43. Iss. 8. P. 1763–1774.
10. El-Nimri S. F., Jones W. L., Uhlhorn E., Ruf C., Johnson J., Black P. An improved C-band ocean surface emissivity model at hurricane-force wind speeds over a wide range of earth incidence angles // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2010. V. 7. Iss. 4. P. 641–645.
11. Grodsky S. A., Kudryavtsev V. N., Bentamy A., Carton J. A., Chapron B. Does direct impact of SST on short wind waves matter for scatterometry? // Geophysical Research Letters. 2012. V. 39. Iss. 12. DOI: 10.1029/2012GL052091.
12. Gupta M., Scharien R. K., Barber D. G. Microwave Emission and Scattering from Ocean Surface Waves in the Southern Beaufort Sea // Intern. J. Oceanography. 2014. V. 2014. Article ID 872342. 12 p. URL: <https://doi.org/10.1155/2014/872342>.
13. Hollinger J. P. Passive microwave measurements of sea surface roughness // IEEE Trans. Geoscience and Electronics. 1971. V. 9. Iss. 3. P. 165–169.
14. Liu Q., Weng F., English S. J. An Improved Fast Microwave Water Emissivity Model // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2011. V. 49. Iss. 4. P. 1238–1250.
15. Meissner T., Wentz F. J. The emissivity of the ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speeds and earth incidence angles // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2012. V. 50. Iss. 8. P. 3004–3026.
16. Nordberg W., Conaway J., Ross D. B., Wilheit T. Measurements of microwave emission from a foam-covered, wind-driven sea // J. Atmospheric Sciences. 1971. V. 28. Iss. 3. P. 429–435.
17. Padmanabhan S., Reising S. C., Asher W. E., Rose L. A., Gaiser P. W., Bobak J. P., Anguelova M. Azimuthal dependence of the microwave emission from foam generated by breaking waves at 18.7 and 37 GHz // Proc. IEEE MicroRad. 2006. P. 131–136.
18. Petty G. W., Katsaros K. B. The Response of the SSM/I to the Marine Environment. Part II: A Parameterization of the Effect of the Sea Surface Slope Distribution on Emission and Reflection // J. Atmospheric and Ocean Technology. 1994. V. 11. Iss. 3. P. 617–628.
19. Plant W. J., Irisov V. A joint active/passive physical model of sea surface microwave signatures // J. Geophysical Research: Oceans. 2017. V. 122. Iss. 4. P. 3219–3239.
20. Raizer V. Macroscopic Foam–Spray Models for Ocean Microwave Radiometry // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2007. V. 45. Iss. 10. P. 3138–3144.
21. Reul N., Chapron B., Zabolotskikh E., Donlon C., Quilfen Y., Guimard S., Piolle J.-F. A revised L-band radio-brightness sensitivity to extreme winds under Tropical Cyclones: the five year SMOS-storm database // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 180. P. 274–291.
22. Rosenkranz P. W. Rough-sea microwave emissivities measured with the SSM/I // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1992. V. 30. Iss. 5. P. 1081–1085.
23. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels // J. Geophysical Research Atmospheres. 2008. V. 113. Iss. C2. DOI: 10.1029/2005JC003384.
24. Stogryn A. The apparent temperature of the sea at microwave frequencies // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 1967. V. 15. Iss. 2. P. 278–286.
25. Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K. Microwave remote sensing: Active and passive. Volume I: Microwave remote sensing fundamentals and radiometry. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Co., 1981. 470 p.
26. Webster Jr. W. J., Wilheit T. T., Ross D. B., Gloersen P. Spectral characteristics of the microwave emission from a wind-driven foam-covered sea // J. Geophysical Research. 1976. V. 81. Iss. 18. P. 3095–3099.
27. Wilheit T. T. A model for the microwave emissivity of the ocean's surface as a function of wind speed // IEEE Trans. Geoscience and Electronics. 1979. V. 17. Iss. 4. P. 244–249.
28. Zabolotskikh E. V., Chapron B. New Geophysical Model Function for Ocean Emissivity at 89 GHz Over Arctic Waters // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2018. V. 16. Iss. 4. P. 573–576.

29. Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Chapron B. New approach for severe marine weather study using satellite passive microwave sensing // *Geophysical Research Letters*. 2013. V. 40. Iss. 13. P. 3347–3350.
30. Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Chapron B. GCOM-W1 AMSR2 and MetOp-A ASCAT wind speeds for the extratropical cyclones over the North Atlantic // *Remote Sensing of Environment*. 2014. V. 147. P. 89–98.
31. Zabolotskikh E. V., Reul N., Chapron B. Geophysical Model Function for the AMSR2 C-Band Wind Excess Emissivity at High Winds // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2016. V. 13. Iss. 1. P. 78–81.

Geophysical model functions for cold water microwave radiation dependency on wind speed in K and Ka range at an incidence angle of 55°

E. V. Zabolotskikh¹, B. Chapron^{2,1}

¹ Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg 195196, Russia
E-mail: liza@rshu.ru

² French Research Institute for Exploitation of the Sea, Brest, France
E-mail: bertrand.chapron@ifremer.fr

Geophysical model functions (GMFs) of the ocean microwave radiation dependence on wind speed at the frequencies of K and Ka range for an incidence angle of 55° are derived using the measurements of the satellite microwave radiometer Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2) over open Arctic ocean at the sea surface temperatures (SST), not exceeding 10 °C. To estimate ocean radiation coefficients, surface microwave radiation was calculated using physical modeling of the ocean – atmosphere system brightness temperature. The simulation results made it possible to estimate surface radiation at 18.7, 23.8 and 36.5 GHz on the vertical and horizontal polarization with known atmospheric parameters, based on the ERA-Interim reanalysis data. These estimates were matched to the sea surface wind speeds (V), retrieved by applying previously developed V retrieval algorithm to the AMSR2 measurements at 6.9 and 10.65 GHz. The resulting GMF were compared to a widely used published model. A more significant dependence of the GMFs on SST is found: at SST < 4 °C, differences in the GMFs are not observed, but at 4 < SST < 10°C the sensitivity of the emissivity to V drops with the SST increase for all the frequencies at horizontal and vertical polarization. The resulting regression lines have a positive slope. The sensitivity of a horizontally polarized signal to sea surface wind speed is more than 2 times higher than the sensitivity of a vertically polarized signal.

Keywords: microwave radiation, geophysical model functions, sea surface wind speed, Arctic, satellite microwave radiometers, brightness temperatures, AMSR2, physical modeling

Accepted: 07.07.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-243-254

References

1. Kuzmin A. V., Repina I. A., Sadovsky I. N., Selunsky A. B., Mikrovolnovye radiometricheskie issledovaniya morskoi poverkhnosti (Microwave radiometric studies of the sea surface), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 76–97.
2. Sadovsky I. N., Metodika distantsionnogo opredeleniya kharakteristik vetrovogo volneniya: 1. Raschet radioyarkostnykh kontrastov vzvolnovannoi vodnoi poverkhnosti (Methods for remote estimation of wind-wave characteristics: 1. Calculation of radio brightness contrasts of wind roughened sea water surface), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 2, No. 5, pp. 192–198.
3. Sazonov D. S. (2017a), Korrelyatsionnyi analiz eksperimentalnykh distantsionnykh izmerenii i modelei mikrovolnovogo izlucheniya vzvolnovannoi vodnoi poverkhnosti (Correlation analysis of experimental remote sensing measurements and models of microwave radiation of wind roughened sea water surface), *Issledovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2017, No. 3, pp. 53–64.

4. Sazonov D. S. (2017b), Modelirovanie mikrovolnovogo izlucheniya vzvolnovannoi morskoi poverkhnosti na osnove eksperimentalnykh dannykh (Simulation of microwave radiation from wind roughened sea based on experimental data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 271–287.
5. Sazonov D. S., *Mnogoparametricheskaya model radioteplovogo izlucheniya vzvolnovannoi morskoi poverkhnosti: analiz sputnikovoi informatsii i nadvodnykh izmerenii: Diss kand. fiz.-tekhn. nauk* (Multiparameter model of microwave radiation of wind roughened sea: analysis of satellite information and surface measurements, Cand. phys. techn. sci. thesis), Moscow, 2018, 138 p.
6. Sinkevich A. A., Stepanenko V. D., Dovgaluk Yu. A., *Voprosy fiziki oblakov. 50 let otdelu fiziki oblakov GGO* (Problems of cloud physics. 50 years of the department of physics of clouds of the State Geological Society), St. Petersburg: Asterion, 2008, 513 p.
7. Stepanenko V. D., Shchukin G. G., Bobylev L. P., Matrosov S. Yu., *Radioteplolokatsiya v meteorologii* (Radiation in meteorology), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987, 284 p.
8. Anguelova M. D., Gaiser P. W., Dielectric and Radiative Properties of Sea Foam at Microwave Frequencies: Conceptual Understanding of Foam Emissivity, *Remote Sensing*, 2012, Vol. 4, No. 5, pp. 1162–1189.
9. Aziz M. A., Reising S. C., Asher W. E., Rose L. A., Gaiser P. W., Horgan K. A., Effects of air-sea interaction parameters on ocean surface microwave emission at 10 and 37 GHz, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2005, Vol. 43, No. 8, pp. 1763–1774.
10. El-Nimri S. F., Jones W. L., Uhlhorn E., Ruf C., Johnson J., Black P., An improved C-band ocean surface emissivity model at hurricane-force wind speeds over a wide range of earth incidence angles, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, Vol. 7, No. 4, pp. 641–645.
11. Grodsky S. A., Kudryavtsev V. N., Bentamy A., Carton J. A., Chapron B., Does direct impact of SST on short wind waves matter for scatterometry? *Geophysical Research Letters*, 2012, Vol. 39, No. 12, DOI: 10.1029/2012GL052091.
12. Gupta M., Scharien R. K., Barber D. G., Microwave Emission and Scattering from Ocean Surface Waves in the Southern Beaufort Sea, *Intern. J. Oceanography*, 2014, Vol. 2014, Article ID 872342, 12 p., available at: <https://doi.org/10.1155/2014/872342>.
13. Hollinger J. P., Passive microwave measurements of sea surface roughness, *IEEE Trans. Geoscience and Electronics*, 1971, Vol. 9, No. 3, pp. 165–169.
14. Liu Q., Weng F., English S. J., An Improved Fast Microwave Water Emissivity Model, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2011, Vol. 49, No. 4, pp. 1238–1250.
15. Meissner T., Wentz F. J., The emissivity of the ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speeds and earth incidence angles, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2012, Vol. 50, No. 8, pp. 3004–3026.
16. Nordberg W., Conaway J., Ross D. B., Wilheit T., Measurements of microwave emission from a foam-covered, wind-driven sea, *J. Atmospheric Sciences*, 1971, Vol. 28, No. 3, pp. 429–435.
17. Padmanabhan S., Reising S. C., Asher W. E., Rose L. A., Gaiser P. W., Bobak J. P., Anguelova M., Azimuthal dependence of the microwave emission from foam generated by breaking waves at 18.7 and 37 GHz, *Proc. IEEE MicroRad*, 2006, pp. 131–136.
18. Petty G. W., Katsaros K. B., The Response of the SSM/I to the Marine Environment. Part II: A Parameterization of the Effect of the Sea Surface Slope Distribution on Emission and Reflection, *J. Atmospheric and Ocean Technology*, 1994, Vol. 11, No. 3, pp. 617–628.
19. Plant W. J., Irisov V., A joint active/passive physical model of sea surface microwave signatures, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2017, Vol. 122, No. 4, pp. 3219–3239.
20. Raizer V., Macroscopic Foam–Spray Models for Ocean Microwave Radiometry, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2007, Vol. 45, No. 10, pp. 3138–3144.
21. Reul N., Chapron B., Zabolotskikh E., Donlon C., Quilfen Y., Guimbarde S., Piolle J.-F., A revised L-band radio-brightness sensitivity to extreme winds under Tropical Cyclones: the five year SMOS-storm database, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 180, pp. 274–291.
22. Rosenkranz P. W., Rough-sea microwave emissivities measured with the SSM/I, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1992, Vol. 30, No. 5, pp. 1081–1085.
23. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G., Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels, *J. Geophysical Research Atmospheres*, 2008, V. 113, No. C2, DOI: 10.1029/2005JC003384.
24. Stogryn A., The apparent temperature of the sea at microwave frequencies, *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 1967, Vol. 15, No. 2, pp. 278–286.
25. Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K., *Microwave remote sensing: Active and passive. Volume I: Microwave remote sensing fundamentals and radiometry*, Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Co., 1981, 470 p.
26. Webster Jr. W. J., Wilheit T. T., Ross D. B., Gloersen P., Spectral characteristics of the microwave emission from a wind-driven foam-covered sea, *J. Geophysical Research*, 1976, Vol. 81, No. 18, pp. 3095–3099.
27. Wilheit T. T., A model for the microwave emissivity of the ocean's surface as a function of wind speed, *IEEE Trans. Geosciences and Electronics*, 1979, Vol. 17, No. 4, pp. 244–249.

28. Zabolotskikh E. V., Chapron B., New Geophysical Model Function for Ocean Emissivity at 89 GHz Over Arctic Waters, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, Vol. 16, No. 4, pp. 573–576.
29. Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Chapron B., New approach for severe marine weather study using satellite passive microwave sensing, *Geophysical Research Letters*, 2013, Vol. 40, No. 13, pp. 3347–3350.
30. Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Chapron B., GCOM-W1 AMSR2 and MetOp-A ASCAT wind speeds for the extratropical cyclones over the North Atlantic, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 147, pp. 89–98.
31. Zabolotskikh E. V., Reul N., Chapron B., Geophysical Model Function for the AMSR2 C-Band Wind Excess Emissivity at High Winds, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 78–81.