

Оценка влияния асимметрии крупных волн на собственное излучение морской поверхности

И. Н. Садовский^{1,2}, Д. С. Сазонов¹

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: Ilya_Nik_Sad@mail.ru*

² *МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, 119454, Россия*

Основной целью представляемой работы была оценка влияния асимметрии распределения уклонов ветровых волн на результаты расчётов излучательных характеристик морской поверхности в рамках двухмасштабной модели формирования излучения. В силу того, что в существующих моделях спектра ветрового волнения данная информация (об асимметрии распределения уклонов) не содержится, авторы использовали результаты натурных измерений, полученные с помощью струнного волнографа. Экспериментальные измерения характеристик волнения соответствуют скорости ветра, равной 11 м/с, и распространяются на волновые компоненты длиннее 0,45–0,63 рад/см. На основе этих измерений было показано, что функция распределения уклонов вдоль направления распространения волнения наилучшим образом описывается гамма-функцией. Эти данные были интегрированы в технологию расчёта величины радиояркого контраста морской поверхности в соответствии с двухмасштабной моделью формирования излучения. Показано, что учёт асимметрии крупных волн действительно оказывает существенное влияние на изменение излучательной способности морской поверхности. Абсолютные значения отклонений являются функцией пространственной ориентации вектора наблюдения. Следует отметить, что используемая двухмасштабная модель не может корректно описать эффект азимутальной анизотропии радиотеплового излучения даже при учёте асимметричности волнения. Однако угловые зависимости вклада в излучение длинноволновых компонент волнения, рассчитанные в соответствии с этой моделью с использованием гамма-функции распределения уклонов, по форме совпадают с данными натурных наблюдений.

Ключевые слова: двухмасштабная модель, собственное излучение, радиояркий контраст, ветровое волнение, асимметрия уклонов, морская поверхность, азимутальная анизотропия, гамма-функция

Одобрена к печати: 28.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-331-343

Введение

В основе эффекта азимутальной анизотропии собственного радиотеплового излучения морской поверхности лежит пространственная неоднородность формируемой под действием ветрового потока границы раздела вода/воздух, приводящая к изменению её отражательных характеристик в зависимости от выбранного угла наблюдения. В частности, в основополагающей работе (Cox, Munk, 1954) на примере оптических измерений была продемонстрирована не только пространственная несимметричность структуры волнения, но и её сильная зависимость от интенсивности ветрового воздействия. Очевидно, что и в микроволновом диапазоне этот эффект также должен был присутствовать, что и было доказано в результате серии экспериментов, выполненных с борта самолёта-лаборатории (Vespalova et al., 1979). При этом было показано, что эффект проявляется не только в отличии друг от друга сигналов, регистрируемых при наблюдениях «вдоль» и «поперёк» генерального направления волнения, но и в существенном различии сигналов при визировании «по» распространению волновых компонент и «против» него. Последний факт позволил решить одну из важнейших практических задач пассивной радиометрии — определение вектора скорости приповерхностного ветра в океане по спутниковым микроволновым измерениям (см., например, (Поспелов, 2004; Сазонов и др., 2018; Trokhimovski, Irisov, 1995)).

Несмотря на растущую роль спутниковых микроволновых средств дистанционного зондирования Земли, следует констатировать, что в настоящее время не существует общепризнанной теоретической модели, связывающей геометрию взволнованной водной поверхности с интенсивностью её собственного излучения в микроволновом диапазоне, а значит отсутствует достоверный инструмент описания и самого эффекта азимутальной анизотропии. Модели, подобные рассмотренной в работе (Meissner, Wentz, 2012) и построенные на основе аппроксимации экспериментальных данных, имеют широкое практическое применение при обработке спутниковых измерений, связывая средние значения вектора скорости приповерхностного ветра (но не геометрии) с регистрируемым на орбите излучением. При этом любые отклонения от границ их применимости (используемые частоты, поляризации, углы наблюдения, степень соответствия геометрии поверхности уровню ветрового воздействия и пр.) приводят к резкому возрастанию уровня ошибок. Теоретическая двухмасштабная модель излучения (Trokhimovski, 1997), традиционно развиваемая в Институте космических исследований РАН, также имеет ряд недостатков. Одним из них, имеющих отношение к теме исследования, является использование спектра ветровых волн в качестве достаточной характеристики геометрии границы водной поверхности. Пространственный спектр ветровых волн содержит информацию об амплитуде и направлении распространения гармоники, соответствующей конкретному волновому числу. Если неизвестны фазы отдельных компонент (а этой информации нет ни в одной из известных моделей волнения), то формируемый профиль морской поверхности для любого произвольного сечения будет симметричен (относительно гребня/вершины). Даже для моделей волнения, в которых учитывается направление распространения волны, итоговая сумма (наложение) гармоник, распространяющихся в противоположных направлениях (итоговая поверхность), будет представлена единым профилем. Соответственно, при прочих равных условиях, оценка интенсивности излучения, формируемой этим профилем, также будет одинаковой для пар азимутальных углов наблюдения, отличающихся на 180° . Данная особенность существенно ограничивает применимость модели (Trokhimovski, 1997), несмотря на то что её отдельные положения имеют строгое теоретическое обоснование (в отличие от исследования (Meissner, Wentz, 2012)).

Неоспоримым достоинством модели (Trokhimovski, 1997) является потенциальная возможность работы с реальной формой морской поверхности, без привязки к интенсивности ветрового потока, а значит её можно использовать в гораздо большем числе практических приложений, чем аналоги. В частности, сюда могут быть отнесены все шельфовые зоны, внутренние водоёмы, области со сложной ветровой обстановкой и т. п., когда волнение не может быть отнесено к развитому и установленным моделями связи ветра и геометрии поверхности нарушаются.

Исследования авторов направлены как на поиск альтернативных способов описания геометрии морской поверхности, так и интеграцию известных фактов поведения ветровых волн в имеющуюся модель формирования излучения. Среди основных факторов, которые оказываются неучтёнными в рамках спектрального описания и имеют потенциальную возможность существенного влияния на формируемое собственное микроволновое излучение, авторы выделяют (Садовский, 2023): передний склон ветровых волн более крутой, чем задний; короткие гравитационно-капиллярные волны сосредоточены на переднем склоне гравитационных. Помимо этого, существуют вопросы корректного учёта этих и других параметров в рамках двухмасштабной модели (Trokhimovski, 1997).

Следует отметить, что упомянутый эффект асимметрии волновых профилей и негауссовости соответствующих статистик известен уже давно. В частности, применительно к активной радиолокации существует достаточно большое количество теоретических, лабораторных и натурных исследований (см., например, (Chen et al., 1993; Gilman, 1997; Leykin et al., 1995)), в которых рассматриваются не только вопросы выбора альтернативного описания структуры волнения, но и влияния отмеченных фактов на уровень обратного рассеяния. Но, как и в случае с моделью радиотеплового излучения, единой модели ветрового волнения, описывающей связь «ветер – геометрия волновой поверхности» с учётом упомянутых особенностей и, что не маловажно, пригодной для практического использования в пассивной радиометрии, к сожалению, нет.

Цель данной работы — попытка авторов учесть в рамках модельных электродинамических расчётов (по оценке собственного радиотеплового излучения) отличие распределения уклонов крупных волн от функции Гаусса, неоднократно наблюдаемое в рамках натуральных экспериментов по исследованию излучательных характеристик морской поверхности как самими авторами (Сазонов, 2012), так и их коллегами (Стерлядкин и др., 2024), с использованием реальных значений измеренных параметров волнения. Описанию полученных результатов и посвящена содержательная часть работы.

Используемая двухмасштабная модель формирования излучения

Яркостная температура является основной информационной характеристикой, используемой в пассивной микроволновой радиополяриметрии. С учётом того, что практически все явления, происходящие внутри океана, в атмосфере, а также в прибрежных районах, находят своё отражение в процессах, наблюдаемых на морской поверхности, целесообразно выделять ту составляющую яркостной температуры $T_{я}$, которая обусловлена геометрическими характеристиками границы раздела «морская поверхность — атмосфера». Это осуществляется за счёт введения понятия радиояркостного контраста — $\Delta T_{я}$, определяемого как разность радиояркостной температуры взволнованной $T_{я\text{ВМП}}$ и гладкой $T_{я\text{ГМП}}$ водной поверхности при фиксированных значениях температуры, солёности и состояния атмосферы:

$$\Delta T_{я} = T_{я\text{ВМП}} - T_{я\text{ГМП}}.$$

Идея представления поверхности со сложной геометрией в виде совокупности двух групп неровностей для оценки отражательных параметров объектов была предложена в 70-х гг. прошлого столетия (Semyonov, 1966). Таким образом, величина приращения интенсивности собственного излучения, обусловленная присутствием ветрового волнения, определяется суммой вклада её длинноволновых $\Delta T_{я\text{ДЛ}}$ и коротковолновых $\Delta T_{я\text{КОР}}$ компонент: $\Delta T_{я} = \Delta T_{я\text{ДЛ}} + \Delta T_{я\text{КОР}}$. Деление поверхностных гармоник с волновыми числами $K = 2\pi/\Lambda$ (Λ — пространственный период) осуществляется сравнением с соответствующим значением для принимаемого электромагнитного излучения $k = 2\pi/\lambda_0$ (λ_0 — длина волны принимаемого излучения).

Используемая модель формирования излучения (Trokhimovski, 1997) предлагает следующие соотношения для оценки $\Delta T_{я\text{ДЛ}}$ и $\Delta T_{я\text{КОР}}$:

$$\Delta T_{я\text{ДЛ}}(\theta) = \iint P_{\theta}(\eta_x, \eta_y) \left\{ T_0 \left[1 - |R|^2 \right] + |R|^2 T_{\Pi}(\theta, \theta_{\text{Л}}) \right\} d\eta_x d\eta_y - T_{я\text{ГМП}}(\theta),$$

где η_x и η_y — уклоны волновой поверхности; $P_{\theta}(\eta_x, \eta_y)$ — функция распределения вероятности уклонов при наблюдении под углом θ ; T_0 — физическая температура поверхности воды; $R = R(\theta_{\text{Л}})$ — локальный коэффициент отражения Френеля; T_{Π} — яркостная температура излучения подсвета, которая равна яркостной температуре атмосферы или излучению поверхности в зависимости от угла наблюдения и локальных уклонов η_x и η_y ; $\theta_{\text{Л}}$ — локальный угол падения;

$$\Delta T_{я\text{КОР}}(\theta) = 2T_0 k^2 \int_{K_{\text{ДЛ}}}^{\infty} \int_0^{2\pi} S'(K) \delta \left(\frac{K}{k}, \theta, \varphi \right) K dK d\varphi,$$

где $S'(K) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} S(K, \varphi) d\varphi$ — пространственный спектр возвышений поверхности, усреднённый по всем азимутальным направлениям; $K_{\text{ДЛ}} = (1/20)k$ — граничное волновое число, делящее волны на длинные и короткие; δ — приращение коэффициента поглощения за счёт присутствия на гладкой поверхности гармоники с волновым числом K и амплитудой $S'(K)$, рассчитываемой в соответствии с работами (Irisov, 1997, 2000); φ — угол между генеральным направлением распространения волнения и направлением распространения выделенной поверхностной гармоники.

Как видно из представленных выражений, модель была ориентирована на работу с усреднённым пространственным спектром ветрового волнения, а получаемые значения контраста $\Delta T_{\text{я}}$ имели лишь угломестную зависимость, и их следует трактовать так же, как усреднённые по азимутальному углу φ . При этом потенциально присутствует возможность распространения приведённых соотношений на случай произвольной ориентации плоскости наблюдения и генерального направления распространения волнения. Эта работа была выполнена в рамках исследований (Садовский, 2008, 2010, 2012). В итоге получены соотношения, позволяющие проводить электродинамические расчёты пространственной картины излучения морской поверхности в координатах $(\theta_{\text{зонд}}, \varphi_{\text{зонд}})$ ($\theta_{\text{зонд}}$ — угол между нормалью к гладкой поверхности и вектором наблюдения; $\varphi_{\text{зонд}}$ — угол между генеральным направлением распространения волнения и плоскостью наблюдения), задаваемой пространственным спектром $S(K, \varphi)$, для выделенной λ_0 и произвольной плоскости поляризации.

Параметры распределения уклонов длинноволновых компонент волнения

Использование представленного выше соотношения для расчёта $\Delta T_{\text{я,дл}}$ требует знания двумерной функции распределения уклонов плоских факетов, формирующих геометрию крупных волн. «Классической» формулировкой в данном случае является утверждение, что в приближении случайного распределения фаз отдельных гармоник уклоны имеют нормальное распределение:

$$P(\eta_x, \eta_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{\eta_x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{\eta_y^2}{2\sigma_y^2}\right),$$

где σ_x^2 и σ_y^2 — дисперсии уклонов вдоль и поперёк направления распространения волнения. В подобном представлении величина дисперсии уклонов полностью определяет распределение уклонов волновых аппликат и может быть найдена по известному спектру возвышений:

$$\sigma_x^2 = \int_0^{K_{\text{дл}}} \int_{-\pi}^{\pi} K^2 \cos^2(\varphi) S(K, \varphi) K \, dK \, d\varphi, \quad \sigma_y^2 = \int_0^{K_{\text{дл}}} \int_{-\pi}^{\pi} K^2 \sin^2(\varphi) S(K, \varphi) K \, dK \, d\varphi.$$

В экспериментах (Кузьмин и др. 2009) с участием авторов настоящей публикации с помощью струнного волнографа проводились исследования распределения уклонов взволнованной водной поверхности при скорости ветра до 15 м/с. На основе полученных данных было установлено, что распределение уклонов вдоль направления волнения для волн 10 см и длиннее имеет существенные отличия от гауссова (рис. 1, см. с. 335). Как видно из представленного изображения, максимум функции смещён в сторону распространения волнения, при этом явно прослеживается её асимметрия. Результаты исследований, приведённые в работе (Сазонов, 2012), демонстрируют, что наиболее оптимальной функцией для их описания является гамма-распределение вида:

$$f(\alpha, \beta, c, x) = \begin{cases} (x+c)^{\alpha-1} \frac{\exp\left(-\frac{(x+c)}{\beta}\right)}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)}, & x+c \geq 0, \\ 0, & x+c < 0, \end{cases}$$

где $\Gamma(\alpha)$ — гамма-функция Эйлера; α — параметр формы распределения; β — параметр масштаба; c — параметр сдвига ($c = 1$).

Для всего объёма экспериментальных волнографических измерений, разбитых на равные временные отрезки, были получены гистограммы, аналогичные представленной на рис. 1, с последующим подбором параметров гамма-распределения, максимально близко описывающего их форму. Детальное описание данной процедуры может быть найдено в работе (Сазонов, 2012).

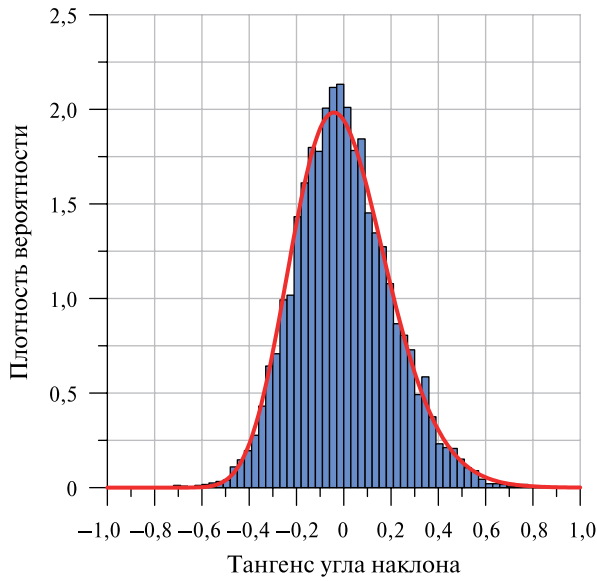


Рис. 1. Пример измеренной экспериментально функции распределения уклонов (для волн длиннее 10 см, скорость ветра 11 м/с). Красная линия — аппроксимация гамма-распределением

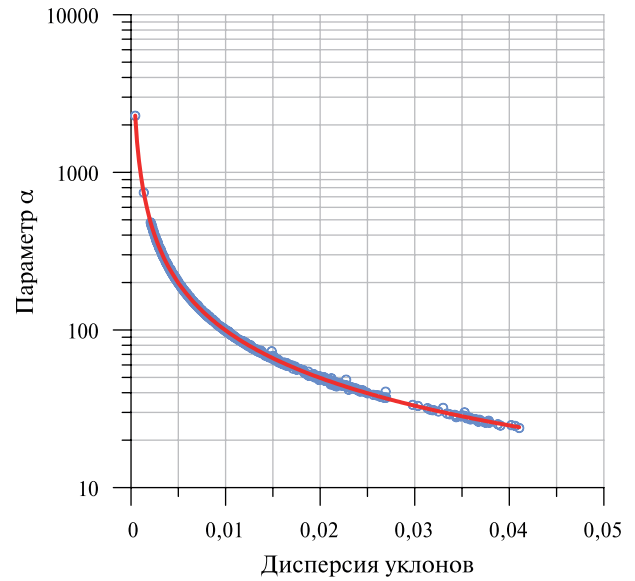


Рис. 2. Экспериментальная зависимость параметра формы α гамма-распределения от дисперсии уклонов σ^2

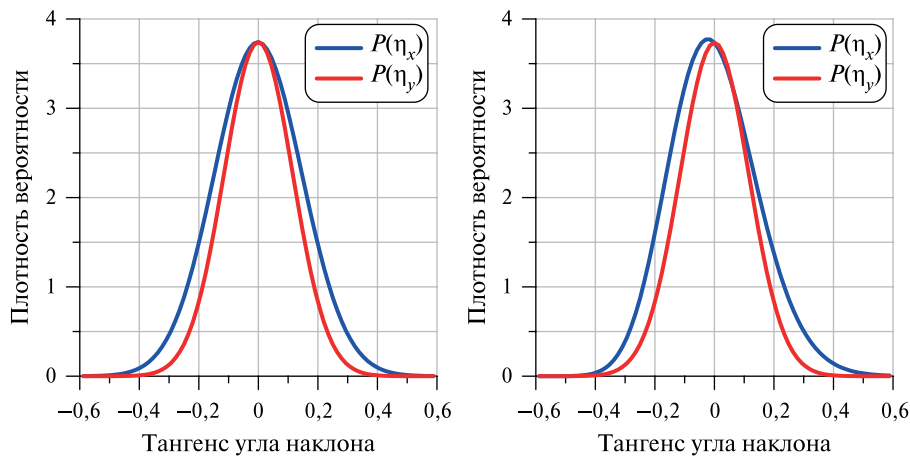


Рис. 3. Распределение уклонов длинных волн в направлениях вдоль и поперёк генерального направления распространения волнения. Скорость ветра 10 м/с. Оригинальный расчёт по модели (Elfouhaily et al., 1997) (слева), при использовании гамма-функции для описания $P(\eta_x)$ (справа)

Отметим лишь, что в рамках выполненных исследований была получена функция зависимости параметра формы α от величины дисперсии σ_x^2 (рис. 2), что в рамках настоящей публикации позволило выполнить следующую операцию. На первом шаге, на основе модели спектра гравитационно-капиллярного волнения (Elfouhaily et al., 1997), для скорости ветра 11 м/с выполнялся расчёт пространственного спектра $S(K, \varphi)$. Далее, для граничного волнового числа $K_{дл}$, равного 0,39 рад/см (соответствующего рабочей длине волны принимаемого излучения 8 мм), выполнялись оценки дисперсии σ_x^2 и σ_y^2 . Распределение уклонов в направлении, перпендикулярном направлению распространения волнения, $P(\eta_y)$, считалось гауссовым, а его форма рассчитывалась на основе модельной оценки σ_y^2 . Вдоль направления распространения распределение уклонов, $P(\eta_x)$, принималось гамма-распределением. Его параметр формы α , в соответствии с рис. 2, рассчитывался (на основе модельной оценки σ_x^2) как $\alpha = 0,9855 / (\sigma_x^2)^{1,002}$. А параметр масштаба β — как $\beta = \sigma_x / \sqrt{\alpha}$. Таким образом в модельные

оценки (Elfouhaily et al., 1997) удалось внести несимметричность распределения уклонов элементарных фазетов в направлении распространения волнения, зарегистрированную в рамках натуральных измерений. Сравнение двух вариантов распределения (Гаусса и гамма) уклонов $P(\eta_y)$ и $P(\eta_x)$ приведено на рис. 3 (см. с. 335).

В представленном виде изменённые модельные распределения уклонов длинных волн использовались при выполнении электродинамического моделирования.

Результаты моделирования излучения морской поверхности

В силу того, что результаты экспериментальных измерений статистики уклонов длинноволновых компонент ветрового волнения были получены для вполне определённых метеоусловий, принято решение об их выборе в качестве входных параметров при моделировании излучения взволнованной водной поверхности: скорость ветра — 11 м/с; температура водной среды — 26,8 °С; солёность водной среды — 35 ‰; температура приповерхностного слоя атмосферы — 20 °С; длина волны принимаемого излучения — 8 мм; интегральное поглощение атмосферы на выделенной частоте — 0,08. Геометрия поверхности в виде спектра ветровых волн определялась по модели (Elfouhaily et al., 1997) для выбранной скорости ветра. При этом высокочастотная часть спектра (выше 0,39 рад/см) оставалась неизменной, а участвующие в расчёте излучения длинноволновых компонент частные распределения $P(\eta_y)$ и $P(\eta_x)$ преобразовывались в соответствии с методикой, описанной в предыдущем разделе. Соответственно, в полученных результатах, с точки зрения проводимых исследований, расчётные значения $\Delta T_{я_кор}$ представляют меньший интерес, поскольку внесённые изменения их не затрагивают. Однако итоговое значение $\Delta T_{я}$ является суммой вклада длинноволновых и коротковолновых компонент, поэтому вид угловых зависимостей будет напрямую зависеть и от динамики $\Delta T_{я_кор}$.

Расчёт выполнялся для вертикальных углов наблюдения $\theta_{зонд}$ в диапазоне 10–70° от надира с шагом 5°. Азимутальная ориентация плоскости наблюдения и генерального направления распространения волн $\varphi_{зонд}$ составляли 0–360° с аналогичным шагом. Достаточно сильная разреженность измерений была обусловлена существенным временем машинных вычислений, требующимся для выполнения расчётов. Однако, ввиду особой важности углов визирования в окрестности $\theta_{зонд} = 55^\circ$, вблизи него шаг был уменьшен до 1°. Расчёты выполнялись для следующих поляризаций принимаемого излучения: вертикальной (*англ.* Vertical — V), горизонтальной (*англ.* Horizontal — H), а также поляризаций, повёрнутых на углы $\pm 45^\circ$ относительно вертикальной. Вычисленные значения яркости, полученные на двух последних поляризациях, использовались для оценки величины третьего модифицированного параметра Стокса (равного разнице соответствующих значений $T_{+45} - T_{-45}$), являющегося основой существующих подходов к восстановлению направления ветра. Ввиду ожидаемой гладкости получаемых угловых зависимостей, а также для сокращения времени расчётов, учёт реальной формы диаграммы направленности антенны не проводился.

На рис. 4 (см. с. 337) приведён пример результатов модельных оценок угломестной зависимости и зависимости величины радиояркостного контраста для случая $\varphi_{зонд} = 0^\circ$ (условно, волнение распространяется на наблюдателя). Сплошные цветные линии соответствуют расчёту, выполненному для нормального распределения уклонов, крестиками обозначены результаты, полученные для гамма-распределения уклонов вдоль направления распространения волнения. Ввиду малости наблюдаемых изменений эффект от перехода между функциями распределения представлен в правой части рисунка. Смена вида функции практически не отразилась на надирных углах визирования. Для всех поляризаций в диапазоне углов от 0 до 50–60° наблюдается эффект снижения интенсивности излучения, наибольшим образом затрагивающий горизонтальную поляризацию, приводя к снижению яркостной температуры на 0,5 К. При смещении в область настильных углов визирования смещение максимума функции распределения уклонов в направлении развития волнения приводит к росту излучательной способности переднего склона ветровых волн. Также максимальные изменения касаются, в первую очередь, горизонтальной составляющей излучения.

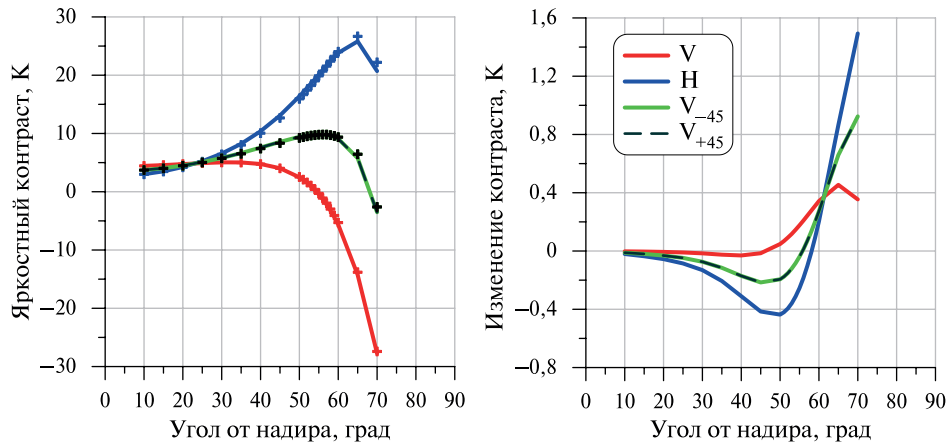


Рис. 4. Зависимость интенсивности излучения взволнованной морской поверхности от вертикального угла визирования для случая $\varphi_{\text{зонд}} = 0^\circ$ (слева) и эффект от перехода между функциями распределения (справа)

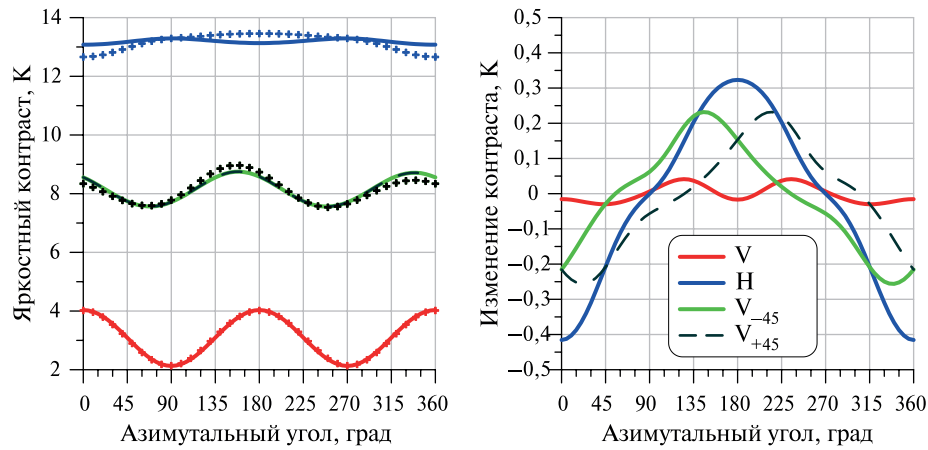


Рис. 5. Зависимость интенсивности излучения взволнованной морской поверхности от азимутального угла визирования для случая $\theta_{\text{зонд}} = 40^\circ$ (слева) и эффект от перехода между функциями распределения (справа)

Азимутальная зависимость модельных значений $\Delta T_{\text{я}}$ приведена на рис. 5. Расчёт выполнен для постоянного угла $\theta_{\text{зонд}} = 40^\circ$, где, ориентируясь на рис. 4, должен был наблюдаться значительный эффект от смены типа распределения. Изменения в уровне излучения на вертикальной поляризации можно считать нулевыми. Наблюдаемая зависимость от угла $\varphi_{\text{зонд}}$ сохранила свой гармонический характер, не проявив разницы в излучении заднего и переднего склона ветровых волн. Этот эффект отчётливо наблюдается для горизонтальной поляризации принимаемого излучения, где яркость изменилась на 0,8 К. Однако вопреки ожиданиям, основанным на опыте обработки реальных радиометрических измерений, это проявление имеет обратный знак. Причины, по которым используемая двухмасштабная модель дала подобные результаты, станут предметом будущих исследований.

В рамках настоящей публикации хотелось бы обратить внимание на другой эффект, обнаруженный в рамках выполненного моделирования. На рис. 6 (см. с. 338) приведены результаты сравнения азимутальных зависимостей третьего параметра Стокса, рассчитанных в соответствии с исследованиями (Trokhimovski, 1997) и (Meissner, Wentz, 2012) (для четырёх значений угла места, обозначенных разными цветами). Совершенно очевидно, что они существенно отличаются друг от друга не только по амплитуде, но и по форме. То есть третий параметр Стокса, рассчитываемый через независимое сложение вклада длинноволновых и коротковолновых компонент (слева на рисунке), не может корректно описать реально наблюдаемые угловые зависимости (справа).

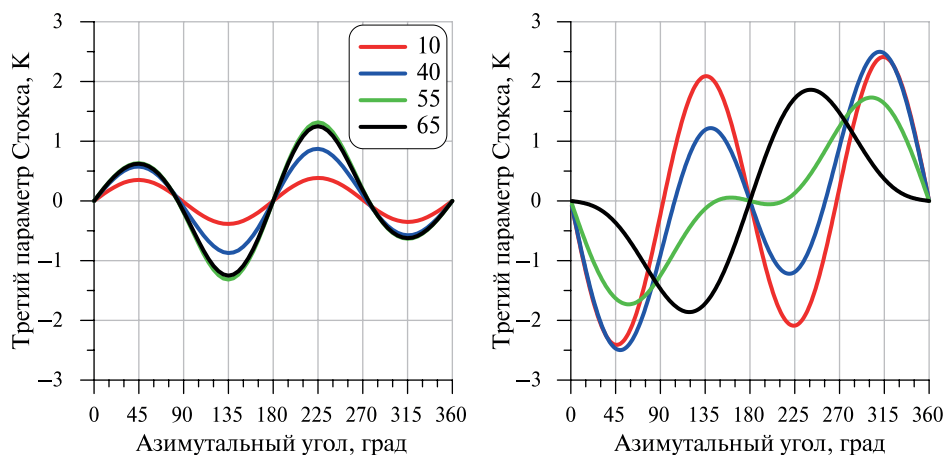


Рис. 6. Результаты модельных оценок третьего параметра Стокса, выполненных в соответствии с работами (Trokhimovski, 1997) (слева) и (Meissner, Wentz, 2012) (справа)

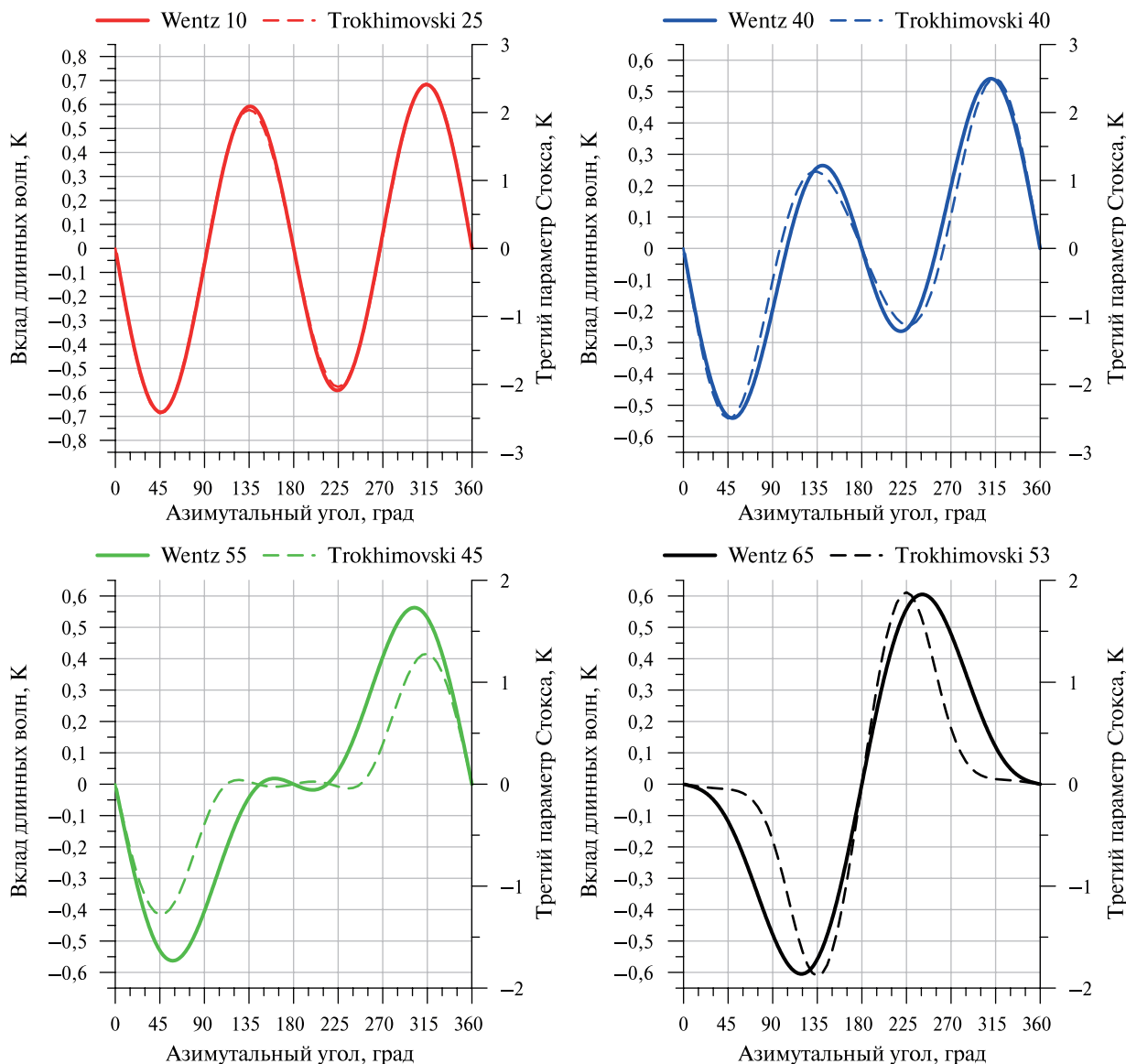


Рис. 7. Результаты сравнения азимутальной зависимости третьего параметра Стокса, рассчитанного в соответствии с работой (Meissner, Wentz, 2012), с вкладом в излучение длинноволновых компонент, обладающих асимметрией функции распределения $P(\eta_x)$

Однако если мы исключим из расчётов коротковолновую часть волнения, то вклад длинных волн, с учётом введённой асимметрии, даёт хорошее соответствие с моделью (Meissner, Wentz, 2012). Этот эффект продемонстрирован на серии зависимостей, приведённых на рис. 7 (см. с. 338). Масштаб сравниваемых функций подбирался отдельно (это можно видеть по значениям пределов соответствующих осей) для максимального совмещения имеющихся кривых. Кроме этого, совпадения зависимостей удалось достичь при разных исходных углах визирования от надира, за исключением угла $\theta_{\text{зонд}} = 40^\circ$. В частности, азимутальная зависимость третьего параметра Стокса, рассчитанная в соответствии с работой (Meissner, Wentz, 2012) для $\theta_{\text{зонд}} = 65^\circ$, имеет вид, схожий с угловой зависимостью вклада длинных волн, рассчитанной по модели (Trokhimovski, 1997) для $\theta_{\text{зонд}} = 53^\circ$, и т. д. Соответствующие обозначения приведены на рис. 7.

Заключение

Основным результатом выполненных исследований является демонстрация того факта, что угловая зависимость третьего параметра Стокса, наблюдаемая в натуральных условиях, имеет форму, определяемую вкладом длинноволновых компонент ветровых волн при учёте асимметричности распределения уклонов в генеральном направлении их распространения. Вопросы о причинах расхождения абсолютных значений модельных оценок с наблюдаемыми требуют дополнительного изучения. В частности, измерениям статистики распределения уклонов длинных волн, ранее относимым к второстепенным, в будущем следует уделить больше внимания в рамках проводимых натуральных (и подспутниковых) экспериментов, исследуя их связь с параметрами ветрового потока на разных масштабах волновых чисел. Также усилению продемонстрированного эффекта, возможно, будет способствовать отказ от независимого рассмотрения вклада длинноволновых и коротковолновых компонент, хотя бы за счёт введения модуляции излучения мелкомасштабных аппликат крупными волнами. О необходимости выполнения подобных оценок авторы упоминали в начале данной работы.

Полученные в результате моделирования (в рамках двухмасштабной модели формирования излучения) расхождения азимутальных зависимостей яркости на вертикальной и горизонтальной поляризациях с данными работы (Meissner, Wentz, 2012) косвенно свидетельствуют о необходимости пересмотра методики учёта коротковолнового волнения. Принимая во внимание тот факт, что корректность применения теории критических явлений в отношении периодически неровной поверхности доказана неоднократно (см., например, (Садовский и др., 2005; Трохимовский, Эткин, 1985; Pospelov et al., 2001)), изменения должны коснуться учёта их пространственного распределения и ориентации волновых векторов на поверхности более длинноволновых составляющих.

Для придания большего веса планируемым модельным изысканиям требуются аккуратные волнографические измерения, в которых описанным выше вопросам будет уделено особое внимание. Авторы настоящей работы выражают надежду, что разрабатываемые средства и методы измерений, подобные представленным в публикациях (Стерлядкин, 2020; Стерлядкин, Куликовский, 2022), позволят на них ответить, поскольку нацелены на определение пространственных характеристик волнения именно в гравитационно-капиллярной области, критически важной для микроволновых средств дистанционного зондирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-17-00189, <https://rscf.ru/project/23-17-00189/>).

Литература

1. Кузьмин А. В., Горячкин Ю. А., Ермаков Д. М., Ермаков С. А., Комарова Н. Ю., Кузнецов А. С., Репина И. А., Садовский И. Н., Смирнов М. Т., Шарков Е. А., Чухарев А. М. Морская гидрографическая платформа «Кацивели» как подспутниковый полигон на Черном море // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 1. С. 31–44.

2. *Поспелов М. Н.* Применение поляризационной радиометрии в дистанционном зондировании: история и перспективы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Т. 1. № 1. С. 58–69.
3. *Садовский И. Н.* Методика дистанционного определения характеристик ветрового волнения: 1. Расчет радиоярких контрастов взволнованной водной поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 192–198.
4. *Садовский И. Н.* Оценка величины радиоярких контрастов морской поверхности, обусловленных присутствием компонент ветрового волнения разного масштаба // 9-я Международ. научно-техн. конф. «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» ФРЭМЭ'2010: тез. докл. Владимир: ВлГУ, 2010. С. 483–486.
5. *Садовский И. Н.* Особенности учета вклада длинноволновых компонент волнения в приращение излучательной способности морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 228–239.
6. *Садовский И. Н.* Проблемы использования спектрального описания ветрового волнения в задачах оценки уходящего излучения системы океан–атмосфера // Всероссийская науч. конф. «Моря России: от теории к практике океанологических исследований»: тез. докл. Севастополь: МГИ РАН, 2023. С. 195–196.
7. *Садовский И. Н., Кузьмин А. В., Поспелов М. Н.* Лабораторный эксперимент по измерению угловых зависимостей параметров Стокса теплового радиоизлучения взволнованной водной поверхности // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 1. С. 21–26.
8. *Сазонов Д. С.* Исследование статистических характеристик распределения уклонов взволнованной водной поверхности // 2-е Всероссийские Армандовские чтения «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». Материалы 5-й Всероссийской науч. конф. Муром: Изд.-полигр. центр МИ ВлГУ, 2012. С. 548–552.
9. *Сазонов Д. С., Стерлядкин В. В., Кузьмин А. В.* Тестирование алгоритма определения поля направления приводного ветра по спутниковым радиополяриметрическим измерениям // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 6. С. 3–12. DOI: 10.31857/S020596140003363-0.
10. *Стерлядкин В. В.* Сканирующий лазерный волнограф с регистрацией «мгновенной» формы поверхности: Патент РФ № 2749727. Рег. 16.10.2020.
11. *Стерлядкин В. В., Куликовский К. В.* Измерение капиллярных волн лазерным волнографом // Russian Technological J. 2022. Т. 10. № 5. С. 100–110. DOI: 10.32362/2500-316X-2022-10-5-100-110.
12. *Стерлядкин В. В., Куликовский К. В., Бадулин С. И.* Натурные измерения формы морской поверхности и одномерного пространственного спектра волнения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 1. С. 270–285. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-270-285.
13. *Трохимовский Ю. Г., Эткин В. С.* Лабораторные и натурные исследования критических явлений в радиотепловом излучении взволнованной водной поверхности: Препринт. Пр-988. М.: ИКИ АН СССР, 1985. 23 с.
14. *Bespalova E. A., Veselov V. M., Glotov A. A., Militkii Yu. A., Mirovskii V. G., Pokrovskaya I. V., Popov A. E., Raev M. D., Sharkov E. A., Etkin V. S.* Investigations of wind sea roughness's anisotropy with variability of thermal radioemission // Doklady Acad. Nauk (Russian Academy of Sciences. Earth Science Section: Engl. Transl.). 1979. V. 246. No. 6. P. 1482–1485.
15. *Chen K. S., Fung A. K., Faouzi A.* An empirical bispectrum model for sea surface scattering // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1993. V. 31. No. 4. P. 830–835.
16. *Cox C. S., Munk W.* Statistics of the sea surface derived from sun glitter // J. Marine Research. 1954. V. 13. P. 198–227.
17. *Elfouhaily T., Chapron B., Katsaros K., Vandemark D.* A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves // J. Geophysical Research. 1997. V. 102. P. 15781–15796. DOI: 10.1029/97JC00467.
18. *Gilman M. A.* Bispectrum and analysis of the statistics of electromagnetic waves backscattered by sea surface // J. Computer and System Sciences. 1997. V. 36. No. 6. P. 972–980.
19. *Irisov V. G.* Small-slope expansion for thermal and reflected radiation from a rough surface // Waves Random Media. 1997. V. 7. No. 1. P. 1–10. DOI: 10.1088/0959-7174/7/1/001.
20. *Irisov V. G.* Azimuthal variation of the microwave radiation from a slightly non-Gaussian surface // Radio Science. 2000. V. 35. No. 1. P. 65–82. DOI: 10.1029/1999RS900104.
21. *Leykin I. A., Donelan M. A., Mellen R. H., McLaughlin D. J.* Asymmetry of wind waves studied in a laboratory tank // Nonlinear Processes in Geophysics. 1995. V. 2. P. 280–289. DOI: 10.5194/npg-2-280-1995.
22. *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 incident angles // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2012. V. 50. No. 8. P. 3004–3026. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2179662.

23. Pospelov M. N., Kuzmin A. V., Trokhimovski Y. G. Polarimetric measurements of microwave emission from capillary waves // IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future: Proc. IEEE 2001 Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 2001. V. 3. P. 1561–1563. DOI: 10.1109/IGARSS.2001.976910.
24. Semyonov B. I. Approximate computation of scattering of electromagnetic waves by rough surface contours // Radio Engineering and Electronic Physics. 1966. V. 11. P. 1179–1187.
25. Trokhimovski Y. G. The model for microwave thermal emission of sea surface with waves // Earth Observation and Remote Sensing. 1997. V. 1. P. 39–49.
26. Trokhimovski Y. G., Irisov V. G. Wind speed and direction measurements using microwave polarimetric radiometers. NOAA Technical Memorandum ELP ETL-250. 1995. 35 p.

Estimation of large wave asymmetry influence on sea surface self-radiation

I. N. Sadovskii^{1,2}, D. S. Sazonov¹

¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: Ilya_Nik_Sad@mail.ru

² MIREA — Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

The main objective of the work is to assess the influence of the asymmetry of the wind wave slope distribution on the results of calculations of the emissivity of the sea surface within the framework of a two-scale model of radiation formation. Since the existing models of wind wave spectrum do not contain this information (on the asymmetry of slope distribution), the authors use the results of *in situ* measurements obtained with a string wave recorder. Experimental measurements of wave characteristics correspond to a wind speed of 11 m/s and apply to wave components longer than 0.45–0.63 rad/cm. Based on these measurements, it is shown that the slope distribution function along the direction of wave propagation is best described by the gamma function. These data were integrated into the technology of calculating the brightness contrast of the sea surface in accordance with the two-scale model of radiation formation. It was shown that taking into account the asymmetry of large waves indeed has a significant effect on the change in the emissivity of the sea surface. The absolute values of the deviations are a function of the spatial orientation of the observation vector. It should be noted that the two-scale model used cannot correctly describe the effect of azimuthal anisotropy of radio-thermal radiation, even taking into account the asymmetry of the waves. However, the angular dependences of the long-wave contribution to the radiation, calculated in accordance with this model using the Gamma function of the slope distribution, coincide in shape with the data of natural observations.

Keywords: two-scale model, self-radiation, radio-brightness contrast, wind waves, slope asymmetry, sea surface, azimuthal anisotropy, gamma function

Accepted: 28.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-331-343

References

1. Kuzmin A. V., Goryachkin Yu. A., Ermakov D. M., Ermakov S. A., Komarova N. Yu., Kuznetsov A. S., Repina I. A., Sadovskii I. N., Smirnov M. T., Sharkov E. A., Chukharev A. M., Marine hydrographic platform “Katsiveli” as a subsatellite test site in the Black Sea, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 1, pp. 31–44 (in Russian).
2. Pospelov M. N., Application of polarization radiometry in remote sensing: history and prospects, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2004, Vol. 1, No. 1, pp. 58–69 (in Russian).
3. Sadovskii I. N., Methodology for remote determination of wind wave characteristics: 1. Calculation of radio-brightness contrasts of a rough water surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Iss. 5, Vol. 2, pp. 192–198 (in Russian).

4. Sadovskii I. N., Estimation of the magnitude of radio-brightness contrasts of the sea surface caused by the presence of wind wave components of different scales, *9-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii" FREME'2010: tez. dokl.* (9th Intern. Scientific and Technical Conf. "Physics and Radioelectronics in Medicine and Ecology" (FREME-2010)), Vladimir: VIGU, 2010, pp. 483–486 (in Russian).
5. Sadovskii I. N., Features of taking into account the contribution of long-wave components of waves to the increase in the emissivity of the sea surface, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 228–239 (in Russian).
6. Sadovskii I. N., Problems of using spectral description of wind waves in problems of estimating outgoing radiation of the ocean – atmosphere system, *Vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya "Morya Rossii: ot teorii k praktike okeanologicheskikh issledovaniy": tez. dokl.* (All-Russian Scientific Conf. "Seas of Russia: From Theory to Practice of Oceanographic Research": Abstr.), Sevastopol': MGI RAN, 2023, pp. 195–196 (in Russian).
7. Sadovskii I. N., Kuzmin A. V., Pospelov M. N., Laboratory experiment on measuring angular dependence of the Stokes parameters of thermal radio-emission from the rough water surface, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2005, No. 1, pp. 21–26 (in Russian).
8. Sazonov D. S., Study of statistical characteristics of distribution of slopes of rough water surface, *2-e Vserossiiskie Armandovskie chteniya "Radiofizicheskie metody v distantsionnom zondirovanii sred", Materialy 5-i Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii* (2nd All-Russian Armandov Readings "Radiophysical Methods in Remote Sensing of Environments", Proc. 5th All-Russian Scientific Conf.), Murom: Izd.-poligraficheskii tsentr MI VIGU, 2012, pp. 548–552 (in Russian).
9. Sazonov D. S., Sterlyadkin V. V., Kuz'min A. V., A new algorithm for determining the wind direction using satellite radiopolarimetric measurements, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2018, No. 6, pp. 3–12 (in Russian), DOI: 10.31857/S020596140003363-0.
10. Sterlyadkin V. V., *Skanirovuyushchii lazernyi volnograf s registratsiei "mgnovennoi" formy poverkhnosti* (Scanning laser wave recorder with registration of the "instantaneous" surface shape), Patent RU 2749727, Reg. 16.10.2020 (in Russian).
11. Sterlyadkin V. V., Kulikovskiy K. V., Measurement of capillary waves with a laser wave recorder, *Russian Technological J.*, 2022, Vol. 10, No. 5, pp. 100–110 (in Russian), DOI: 10.32362/2500-316X-2022-10-5-100-110.
12. Sterlyadkin V. V., Kulikovskiy K. V., Badulin S. I., Field measurements of sea surface shape and one-dimensional spatial wave spectrum, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, Vol. 21, No. 1, pp. 270–285 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-270-285.
13. Trokhimovskiy Y. G., Etkin V. S., *Laboratornye i naturnyye issledovaniya kriticheskikh yavleniy v radioteplovom izlucheni vzvolnovannoi vodnoi poverkhnosti: Preprint Pr-988* (Laboratory and field studies of critical phenomena in radiothermal radiation of a disturbed water surface: Preprint Pr-988), Moscow: IKI AN SSSR, 1985, 23 p. (in Russian).
14. Bespalova E. A., Veselov V. M., Glotov A. A., Militskii Yu. A., Mirovskii V. G., Pokrovskaya I. V., Popov A. E., Raev M. D., Sharkov E. A., Etkin V. S., Investigations of wind sea roughness's anisotropy with variability of thermal radioemission, *Doklady Acad. Nauk (Russian Academy of Sciences. Earth Science Section: Engl. Transl.)*, 1979, Vol. 246, No. 6, pp. 1482–1485.
15. Chen K. S., Fung A. K., Faouzi A., An empirical bispectrum model for sea surface scattering, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1993, Vol. 31, No. 4, pp. 830–835.
16. Cox C. S., Munk W., Statistics of the sea surface derived from sun glitter, *J. Marine Research*, 1954, Vol. 13, pp. 198–227.
17. Elfouhaily T., Chapron B., Katsaros K., Vandemark D., A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves, *J. Geophysical Research*, 1997, Vol. 102, pp. 15781–15796, DOI: 10.1029/97JC00467.
18. Gilman M. A., Bispectrum and analysis of the statistics of electromagnetic waves backscattered by sea surface, *J. Computer and System Sciences*, 1997, Vol. 36, No. 6, pp. 972–980.
19. Irisov V. G., Small-slope expansion for thermal and reflected radiation from a rough surface, *Waves Random Media*, 1997, Vol. 7, No. 1, pp. 1–10, DOI: 10.1088/0959-7174/7/1/001.
20. Irisov V. G., Azimuthal variation of the microwave radiation from a slightly non-Gaussian surface, *Radio Science*, 2000, Vol. 35, No. 1, pp. 65–82, DOI: 10.1029/1999RS900104.
21. Leykin I. A., Donelan M. A., Mellen R. H., McLaughlin D. J., Asymmetry of wind waves studied in a laboratory tank, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 1995, Vol. 2, pp. 280–289, DOI: 10.5194/npg-2-280-1995.
22. 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 incident angles, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 2012, Vol. 50, No. 8, pp. 3004–3026, DOI: 10.1109/TGRS.2011.2179662.
23. Pospelov M. N., Kuzmin A. V., Trokhimovskiy Y. G., Polarimetric measurements of microwave emission from capillary waves, *IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future: Proc. IEEE 2001 Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, 2001, Vol. 3, pp. 1561–1563, DOI: 10.1109/IGARSS.2001.976910.

24. Semyonov B. I., Approximate computation of scattering of electromagnetic waves by rough surface contours, *Radio Engineering and Electronic Physics*, 1966, Vol. 11, pp. 1179–1187.
25. Trokhimovski Y. G., The model for microwave thermal emission of sea surface with waves, *Earth Observation and Remote Sensing*, 1997, Vol. 1, pp. 39–49.
26. Trokhimovski Y. G., Irisov V. G., Wind speed and direction measurements using microwave polarimetric radiometers, *NOAA Technical Memorandum ELP ETL-250*, 1995, 35 p.