

Экспериментальные исследования эффективной излучательной способности взволнованной 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*

Представлены результаты экспериментальных исследований, направленных на изучение поведения эффективного коэффициента излучения морской поверхности для различных волновых условий и состояний приповерхностного слоя атмосферы. Эксперимент был проведён на океанографической платформе «Кацивели» Черноморского гидрофизического полигона РАН (ЧГП РАН), расположенной на южной оконечности п-ова Крым. Изменения интенсивности излучения системы «океан – атмосфера» регистрировалось двумя идентичными радиометрами-поляриметрами с рабочей длиной волны 8 мм. Получаемая радиояркая температура на вертикальной и горизонтальной поляризации пересчитывалась в соответствующие значения эффективной излучательной способности взволнованной водной поверхности. На основе анализа зависимости этого параметра от вертикального угла визирования показана его чувствительность к состоянию приводного слоя атмосферы, определяемого величиной интегрального поглощения на частоте 36,0 ГГц. На примере азимутальных зависимостей показан эффект азимутальной анизотропии эффективной излучательной способности и приведены результаты аппроксимации этого эффекта бигармонической функцией. Работа носит предварительный характер, качественно демонстрирующий указанные эффекты.

Ключевые слова: эффективный коэффициент излучения, взволнованная водная поверхность, собственное микроволновое излучение системы «океан – атмосфера», радиометр-поляриметр

Одобрена к печати: 08.11.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-234-246

Введение

В настоящее время понятие эффективного коэффициента отражения/излучения (эффективной отражательной/излучательной способности) водной поверхности является базой всех моделей (за исключением, видимо, только приведённой в работе (Трохимовский, 1997)) формирования и переноса микроволнового излучения в системе «океан – атмосфера» (см., например, исследования (Kazumori, English, 2015; Meissner, Wentz, 2012)). Эти модели активно используются при интерпретации данных спутниковых микроволновых измерений, выполняемых такими инструментами, как SSMIS (*англ.* Special Sensor Microwave Imager/Sounder), AMSR-E (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer) и т. п.

Главной особенностью термина «эффективный коэффициент отражения» является то, что он вводится не на основе решения строгой электродинамической задачи (как, например, коэффициент отражения Френеля для гладкой водной поверхности), а формируется путём составления аппроксимирующих функций разной степени сложности. Эти функции, как правило, имеют достаточную обоснованность и понятный физический смысл. Однако являются лишь согласующим звеном, позволяющим объяснить результаты измерения интенсивности излучения системы с набором её физических параметров. Таким образом, получаемые коэффициенты аппроксимаций имеют свои, характерные лишь для данного инструмента (схемы сканирования, углов визирования, набора частот и т. д.) значения. Помимо этого, качество и достоверность получаемых аппроксимаций могут быть гарантированы лишь для условий реализации самих измерений. Так, например, очевидно, что аппроксимирующая функция для эффективного коэффициента отражения, полученного по результатам анализа данных AMSR-E, будет иметь высокую точность на угле визирования 55°, штатных частот

тах и поляризации этого инструмента. При этом попытка распространения этой функции на произвольные частоты и углы наблюдения, например для анализа данных российского сканера-зондировщика МТВЗА-ГЯ (микроволновый сканер температурно-влажностного зондирования атмосферы, ГЯ — в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (1918–2002)), будет давать ошибочные результаты.

В связи с отмеченной особенностью актуальной задачей становится вопрос о проведении экспериментальных измерений эффективной излучательной способности во всём диапазоне частот, углов наблюдения и поляризации, для того чтобы подтвердить и уточнить имеющиеся модельные аппроксимации. Естественно, «точечный» подспутниковый эксперимент никогда не сравнится по объёмам выборки с глобальными спутниковыми данными, охватывающими практически весь спектр метеоусловий. В то же время детальное исследование этих условий, пусть и в существенно более узких пределах, выступает источником информации, недоступной при глобальных измерениях.

Содержательная часть настоящей публикации посвящена описанию результатов натуральных экспериментальных исследований, направленных на изучение поведения эффективного коэффициента излучения морской поверхности для различных метеоусловий и состояний приповерхностного слоя атмосферы. Представленные результаты носят предварительный характер и приводятся для демонстрации наиболее общих закономерностей. Их использование для уточнения существующих моделей требует дальнейшего накопления данных с целью повышения репрезентативности результатов.

Понятие эффективного коэффициента излучения

Собственное излучение гладкой водной поверхности (идеализированная ситуация), регистрируемое спутниковыми микроволновыми радиометрами, T_B , может быть описано соотношением вида:

$$T_B = T_{BU} + \tau'(1 - R_0)T_S + \tau'R_0(T_{BD} + \tau T_{cold}), \quad (1)$$

где T_{BU} и T_{BD} — восходящее и нисходящее излучение атмосферы соответственно; T_{cold} — излучение холодного космоса; τ' — интегральное пропускание атмосферы; T_S — температура водной среды; R_0 — коэффициент отражения Френеля (индексы, указывающие на зависимости приведённых величин от частоты, поляризации и т. п., опущены).

Простота и понятность указанного соотношения стали причиной попыток его распространения для описания процесса формирования и переноса излучения в случае шероховатой поверхности, образованной ветровыми волнами. Так, наиболее «классическое» представление имеет вид, приведённый в работе (Meissner, Wentz, 2012):

$$\left. \begin{aligned} T_B &= T_{BU} + \tau'ET_S + \tau'T_{B\Omega}, \\ T_{B\Omega} &= R(T_{BD} + \tau'T_{cold}) + T_{Bscat}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В этом выражении полная излучательная, E , и отражательная, R , способность взволнованной водной поверхности связаны соотношением $R = 1 - E$; член T_{Bscat} учитывает отличные от зеркальных компонент переотражения на шероховатой поверхности, идущие в направлении визирования прибора. В свою очередь, полный коэффициент излучения имеет три составляющие:

$$E = E_0 + \Delta E_W + \Delta E_\phi,$$

где ΔE_W — добавка к коэффициенту E_0 , учитывающая скорость ветра (и через неё — увеличение шероховатости поверхности); ΔE_ϕ — добавка к коэффициенту E_0 , отвечающая за взаимное расположение плоскости визирования и генерального направления распространения волнения (учёт эффекта азимутальной анизотропии излучения взволнованной водной поверхности).

В представленном виде модель переноса излучения присутствует во всех современных её вариантах, включая и популярную FASTEM (*англ.* Fast Microwave Emissivity Model) всех версий (см., например, работу (Kazumori, English, 2015)).

В исследовании (Стерлядкин и др., 2018) был предложен несколько иной вариант записи уравнения переноса излучения для случая взволнованной водной поверхности:

$$T_B = T_{BU} + \tau' E_{eff} T_S + \tau' R_{eff} (T_{BD} + \tau' T_{cold}). \quad (3)$$

Как видно из представленного выражения, оно полностью повторяет уравнение (1) для гладкой границы раздела поверхность/атмосфера. Отличие заключается в присутствии введённых авторами эффективных коэффициентов излучения E_{eff} и отражения R_{eff} , которые, по их предположению, должны существенно упростить решение обратных задач пассивного дистанционного зондирования за счёт отказа от многопараметрических и сложных к определению в точке зондирования переменных E и $T_{B\,scat}$ выражения (2). Предполагается, что по предложенной авторами работы (Стерлядкин и др., 2018) методике безкалибровочной оценки величины E_{eff} можно заменить сложные модельные расчёты данными надёжных натурных подспутниковых измерений, которые впоследствии позволят выявить зависимости введённого параметра от различных условий волнообразования и состояния приземного слоя атмосферы. Начальный набор этих условий может быть определён на основании анализа аппроксимаций, предложенных для величин ΔE_w , ΔE_φ и $T_{B\,scat}$ в работе (Meissner, Wentz, 2012). Исключив общие зависимости от температуры и солёности водной среды, требуемые для расчёта диэлектрической проницаемости при вычислении коэффициента отражения Френеля для гладкой поверхности, имеем: скорость ветрового потока, его направление, интегральное поглощение атмосферы и физическую температуру её приповерхностного слоя. Наиболее явное проявление имеет зависимость E_{eff} от скорости приповерхностного ветра, что уже было показано в публикации (Стерлядкин и др., 2018).

Оставаясь в рамках развитой в работе (Стерлядкин и др., 2018) идеи, далее в тексте настоящей публикации приводим результаты натурных измерений, демонстрирующих зависимость введённого термина E_{eff} от состояния приземного слоя атмосферы (интегрального поглощения атмосферы τ (термин, используемый в исследовании (Садовский, 2008), фактически равный $\tau = 1 - \tau'$) и взаимной ориентации генерального направления распространения волнения и плоскости наблюдений.

Описание эксперимента

В работе использованы результаты, полученные в рамках комплексного натурального эксперимента по исследованию собственного радиотеплового излучения системы «океан – атмосфера». Эксперимент был проведён на океанографической платформе «Кацивели» Черноморского гидрофизического полигона РАН (ЧГП РАН), расположенной на южной оконечности п-ова Крым. Подробное описание платформы приведено в публикации (Кузьмин и др., 2009). Исследования проводились в период с середины сентября по конец октября 2019 г.

При проведении измерений были задействованы два идентичных радиометра-поляриметра с рабочей длиной волны порядка 8 мм. Полный перечень основного и вспомогательного (для контроля за метеоусловиями) измерительного оборудования также может быть найден в работе (Кузьмин и др., 2009).

Радиометры были установлены на автоматизированной сканирующей платформе «Траверс-2» (Кузьмин и др., 2020), позволяющей в дистанционном режиме задавать и контролировать программу измерений. С точки зрения настоящей публикации отметим два режима сканирования. Первый — сканирование в вертикальной плоскости в диапазоне углов места $\theta \in [0^\circ; 180^\circ]$ от надира, выполняемое на семи различных азимутах, равномерно распределённых в диапазоне углов $\varphi \in [70^\circ; 270^\circ]$ относительно направления «на север». Полученные таким образом измерения использовались для оценки чувствительности эффективного коэф-

фициента излучения к состоянию атмосферы. Второй режим — сканирование в азимутальной плоскости в диапазоне углов $\varphi \in [70^\circ; 270^\circ]$ относительно направления «на север» на фиксированных углах места θ (9,5; 24,5; 39,5; 55,0 и 65,0° от надира). В этом режиме проводились измерения для оценки эффекта азимутальной анизотропии эффективного коэффициента излучения.

Результаты измерений интенсивности радиотеплового излучения пересчитывались в соответствии с методикой, подробно описанной в работе (Стерлядкин и др., 2018), для получения значений E_{eff} . В качестве примера на *рис. 1* приведены группы измерений, полученных на вертикальной и горизонтальной поляризации для угломестных (*слева*) и азимутальных (*справа*) зависимостей E_{eff} . Из графиков угломестных зависимостей видно, что они имеют вид, схожий с поведением классического коэффициента отражения Френеля, рассчитанного для гладкой поверхности, имеющей те же физические параметры, что и наблюдаемые в эксперименте. Анализ отличий измеренных E_{eff} от расчётных E_0 , обусловленных внешними метеопараметрами, является целью настоящей публикации.

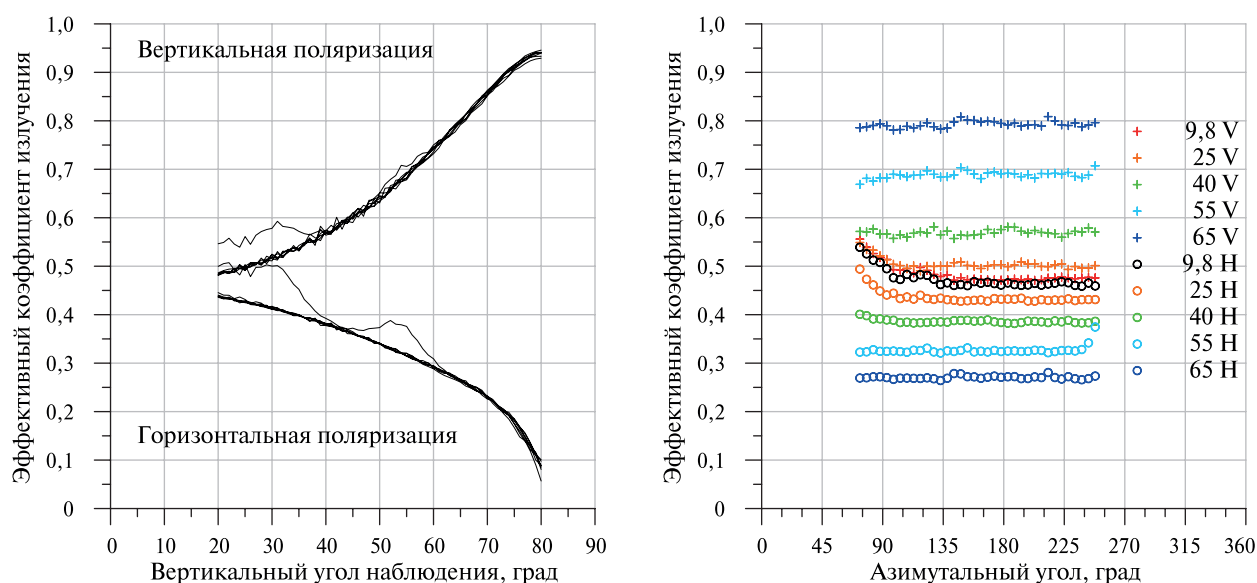


Рис. 1. Примеры экспериментально измеренных зависимостей величины E_{eff} от вертикального (*слева*) и азимутального (*справа*) углов визирования

Присутствующие на графиках неоднородности, заметные на обеих поляризациях в области близких к надиру вертикальных углов, объясняются схемой реализации эксперимента (влияние элементов платформы, моделей чёрных тел, используемых для калибровки аппаратуры, и т. п.).

Исследование зависимости эффективного коэффициента излучения от состояния атмосферы

Анализ влияния состояния атмосферы на поведение E_{eff} проводился на основе угломестных зависимостей этого параметра. За время проведения эксперимента с помощью первого радиометра было получено 8346 вертикальных профилей яркости в диапазоне углов $\theta \in [0^\circ; 180^\circ]$ (левое верхнее изображение на *рис. 2*). Данные второго радиометра составили 9249 профилей (первый радиометр отключался для проведения ремонтных работ). Среднее количество вертикальных сканов за сутки составляло порядка 480 шт. (с обоих радиометров). Для целей последующего анализа следует привести информацию о метеоусловиях, соответствующих этим измерениям (см. *рис. 2*). Как видно из представленных гистограмм, подавляющее число изме-

рений соответствует диапазону скоростей ветра 3–7 м/с, при этом для географического расположения платформы характерны ветры восточного и западного направления. Состояние атмосферы можно классифицировать следующим образом (по значениям интегрального поглощения атмосферы τ , соответствующим рабочей длине волны принимаемого излучения): 0,04–0,06 — безоблачная атмосфера с пониженным содержанием водяного пара; 0,06–0,08 — стандартная безоблачная атмосфера; 0,08–0,1 — стандартная атмосфера при наличии облачности в виде дымки; $>0,1$ — наличие облачности различной интенсивности, включая осадки. Из представленных на рис. 2 зависимостей видно, что основное число измерений было выполнено в условиях безоблачной атмосферы.

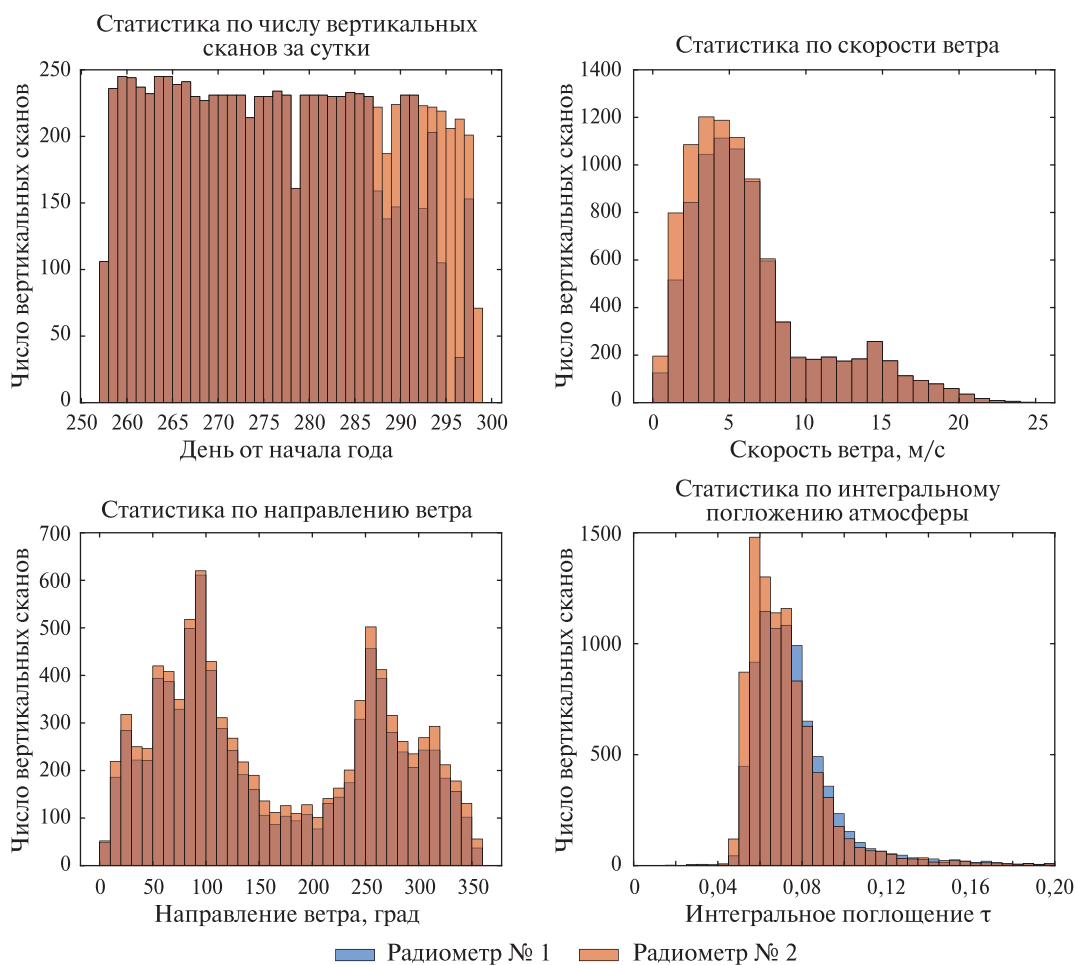


Рис. 2. Обобщённая характеристика условий проведения измерений. Тёмно-коричневый цвет соответствует случаю синхронных измерений двумя идентичными приборами

Очевидно, что в условиях такого многообразия значений параметров, влияющих на формирование уходящего излучения системы «морская поверхность — атмосфера», дальнейший анализ требует рассмотрения искомым зависимостей в заранее определённых поддиапазонах каждого из них. С одной стороны, подобное разделение позволяет снизить влияние этого параметра (для которого введено деление на поддиапазоны), а с другой — повышает количество необходимых к рассмотрению сочетаний параметров и, что самое главное, снижает репрезентативность используемых выборок исходных данных.

Ранее уже отмечалось, что представленные в рамках данной публикации результаты носят предварительный характер и направлены на подтверждение гипотез о чувствительности введённого эффективного коэффициента излучения к сопутствующим метеорологическим параметрам. В связи с этим анализ чувствительности E_{eff} к вариациям τ (как к основному па-

раметру состояния атмосферы в рамках используемой модели переноса излучения (3)) проводился без разделения данных по разной температуре водной среды, температуре приводного слоя атмосферы, а также для всех направлений ветрового потока. Естественно, в дальнейшем, при накоплении достаточных объёмов результатов измерений, соответствующие оценки будут проведены. Разделение проводилось по двум факторам, оказывающим наиболее явное влияние на величину E_{eff} : скорости ветрового потока и вертикальному углу визирования. Ниже представлены результаты, относящиеся к преобладающей скорости ветра в ходе реализации эксперимента ($5,0 \pm 0,5$ м/с) и надирным углам, охватывающим диапазон $20-80^\circ$ с фиксированным шагом 5° .

В качестве примера на рис. 3 представлена зависимость отсортированных по описанным признакам экспериментальных значений E_{eff} от величины интегрального поглощения атмосферы. Данные получены одним из радиометров на вертикальной поляризации и соответствуют углу наблюдения 65° от надира. Несмотря на существенный разброс полученных значений, объясняющийся, по всей видимости, включением в рассмотрение всего спектра направлений ветрового потока, температуры воды и атмосферы, наблюдается явная зависимость E_{eff} от состояния атмосферы, соответствующего каждому измерению. Возможно, характер этой зависимости будет нелинейным при более детальном изучении, но на первом этапе проводилась линейная аппроксимация наблюдаемого эффекта. Для приведённого примера аппроксимирующая функция имеет вид: $E_{eff}(\tau) = -0,2226143739\tau + 0,8164826933$, что позволяет оценить соответствующий угол наклона кривой, равный $-12,55^\circ$. Количественную оценку данного угла следует понимать как чувствительность измеряемого E_{eff} к интегральному поглощению атмосферы на фиксированных угле наблюдения, частоте излучения, поляризации и скорости ветрового потока. Подобные расчёты были выполнены для всех вертикальных углов наблюдения, обеих поляризаций (вертикальной и горизонтальной) и обоих радиометрических приёмников (рис. 4).

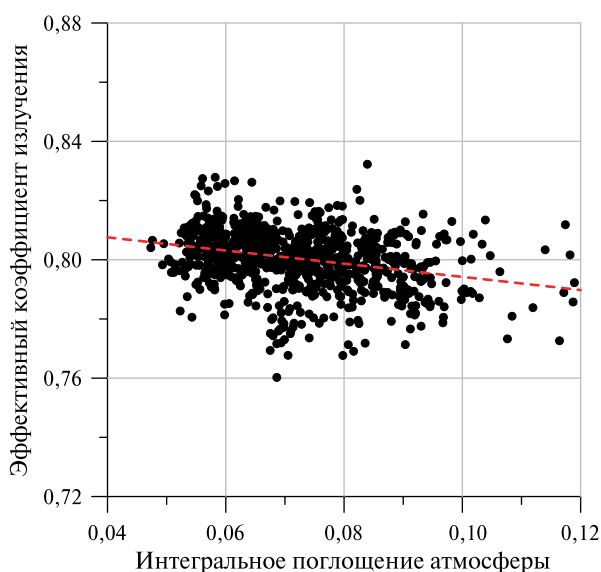


Рис. 3. Зависимость экспериментально измеренного эффективного коэффициента излучения от интегрального поглощения атмосферы (радиометр № 1, вертикальная поляризация, скорость ветра 5 м/с, надирный угол 65°)

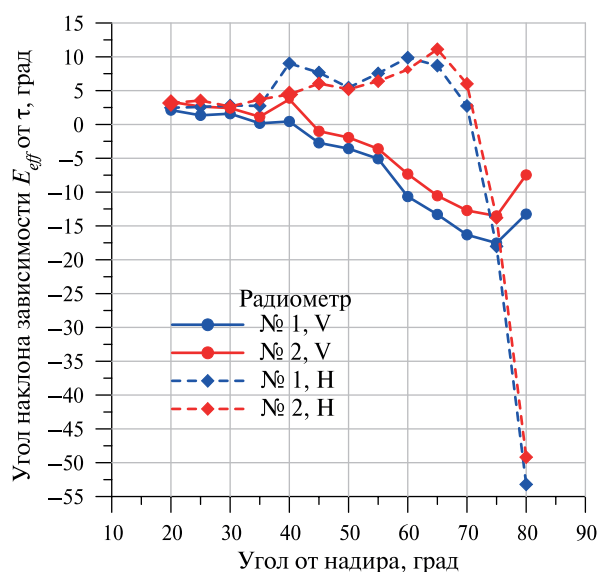


Рис. 4. Результаты оценки чувствительности эффективного коэффициента излучения к состоянию атмосферы для различных вертикальных углов наблюдения

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- Как и ожидалось, введённый в соответствии с моделью переноса излучения (3) коэффициент E_{eff} демонстрирует чёткую зависимость от состояния атмосферы. При этом

идентичность результатов, полученных независимыми радиометрическими приёмниками, а также сама форма наблюдаемых кривых свидетельствуют об отсутствии ошибок при выполнении оценок.

- Изменение чувствительности E_{eff} к состоянию атмосферы с ростом надирного угла является «зеркальной» к функции $E_{eff}(\theta)$, т.е. рост абсолютного значения E_{eff} сопровождается повышением чувствительности к τ , взятой с обратным знаком.
- Для углов визирования, близких к надиру, на обеих поляризациях увеличение интегрального поглощения атмосферы приводит к росту эффективного коэффициента излучения. Дальнейшее изменение угла сопровождается усилением указанного эффекта на горизонтальной поляризации, вплоть до 70° от надира, в то время как для вертикальной поляризации имеет строго обратный эффект.

Дальнейшие работы в данном направлении будут состоять в получении аналогичных зависимостей для произвольных скоростей ветрового потока, генеральных направлений распространения ветровых волн относительно плоскости наблюдения, температуры водной среды и атмосферы и т.п. Часть из этих исследований в настоящий момент невозможна по причине нерепрезентативности выборок соответствующих наборов данных. В случае их пополнения в рамках будущих экспериментов будет возможно ввести параметризацию и предложить соответствующие аналитические зависимости.

Исследование эффекта азимутальной анизотропии эффективного коэффициента излучения

Как уже было отмечено ранее, исследование эффекта азимутальной анизотропии E_{eff} проводилось на основе результатов измерений, выполняемых в азимутальной плоскости. За время проведения эксперимента с помощью первого радиометра было получено 5896 азимутальных сканов в диапазоне углов $\varphi \in [70^\circ; 270^\circ]$ (относительно направления «на север») на фиксированных углах места θ (9,5; 24,5; 39,5; 55,0 и $65,0^\circ$ от надира). Данные второго радиометра составили 6571 азимутальный проход. Среднее количество азимутальных сканов за сутки составляло порядка 340 шт. (с обоих радиометров). Эти значения ниже соответствующих для вертикальных сканов, поскольку каждое измерение интенсивности излучения водной поверхности, в соответствии с методикой расчёта E_{eff} , должно быть обеспечено измерением нисходящего излучения атмосферы на «зеркальном» угле места. Соответствующее удвоение числа измерений, которые чисто физически не могут быть синхронизированы во времени (требуется время на переориентацию радиометров), является источником дополнительных ошибок в их результатах. Для примера на рис. 5 (см. с. 241) приведён общий вид азимутальных зависимостей E_{eff} , полученных за весь период проведения измерений на угле визирования $9,5^\circ$ от надира (вертикальная поляризация, без разделения по скоростям ветра и т.п.). Видно, что помимо влияния элементов конструкции (попадание в поле зрения радиометра калибровочных моделей абсолютно чёрных тел на углах в районе $\varphi = 70^\circ$) наблюдаются периодически возникающие чёткие изменения уровня E_{eff} на произвольных азимутальных углах. Причинами этих изменений являются в первую очередь со стороны водной среды — проходящие мимо платформы морские суда, а со стороны атмосферы — изменяющие своё положение метеообразования в виде облачности различной водности.

Таким образом, анализ и сортировка азимутальных зависимостей E_{eff} представляют собой более сложную задачу, поэтому проводились в несколько этапов. Сначала из рассмотренных исключались азимутальные углы, на которых влияние элементов конструкции морской платформы и сканирующей установки оказывало наиболее очевидное влияние. Для каждого вертикального угла визирования и каждого из двух радиометрических приёмников границы азимутальных углов, пригодных для анализа, подбирались вручную на основе просмотра имеющихся изображений с видеокамеры, установленной соосно с направлением визирования радиометров (отслеживалось попадание береговой линии и элементов конструкций морской

платформы в поле зрения радиометрических приёмников). Далее в автоматическом режиме отбрасывались те проходы, в рамках которых значения вариаций расчётных зависимостей E_{eff} от φ выходили за пределы $\pm 3\sigma$ от их средних. Это позволило исключать те сканы, в ходе которых наблюдались сильные случайные ошибки, оговорённые выше. Следующим шагом отбора было выделение интересных значений скорости ветра ($\pm 0,5$ м/с от заданного) и состояния атмосферы τ . Как и в случае с сортировкой вертикальных зависимостей E_{eff} , получить приемлемые размеры выборок для всех поддиапазонов скоростей ветра и τ оказалось невозможным. В связи с чем описываемые далее результаты будут относиться ко всему диапазону состояний атмосферы, характеризуемых значениями τ из диапазона 0,04–0,12.

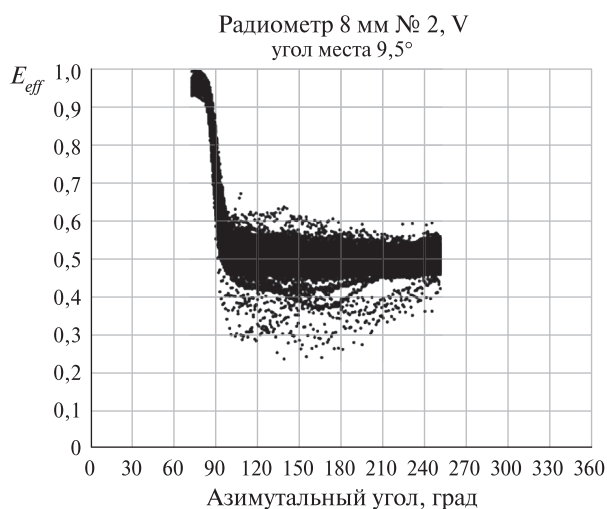


Рис. 5. Зависимости величины E_{eff} от азимутального угла наблюдения φ . Данные получены посредством радиометра № 2 на угле места $9,5^\circ$, вертикальная поляризация

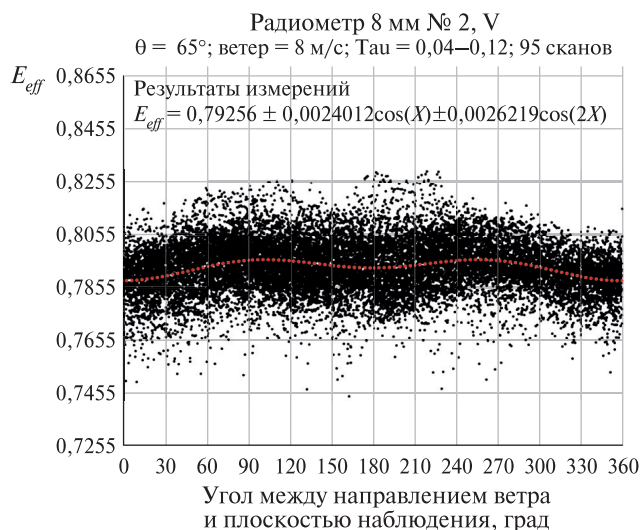


Рис. 6. Экспериментальные значения E_{eff} как функция угла между направлениями визирования и ветрового потока. Радиометр № 1, вертикальная поляризация, угол места 65° , скорость ветра 8 м/с

Следует особо отметить, что из анализа были полностью исключены случаи, когда ветровой поток был направлен со стороны берега. Во-первых, в условиях малого ветрового разгона (менее 800 м) и экранирования элементами морской платформы (несущие опоры) совершенно чётко нельзя отнести возникающее ветровое волнение к развитому. Во-вторых, генерируемые с этих направлений ветровые волны, как правило, накладываются на волновые структуры, сгенерированные до этого момента и распространяющиеся с открытого моря, что также затрудняет последующую интерпретацию получаемых данных.

Заключительным этапом подготовки данных был расчёт угла между азимутальными углами (в системе поворотной платформы, приведёнными к направлению «на север»), соответствующими конкретному измерению E_{eff} и направлением ветрового потока, регистрируемого метеокомплексом. Получающееся значение угла было равно 180° , когда измерение E_{eff} проводилось «против» направления распространения волнения (в идеальном случае — когда направление ветра и генерального направления распространения волнения совпадают), и 0° , когда наблюдались задние, «удаляющиеся» склоны волн.

Один из примеров описанной процедуры обработки экспериментальных данных приведён на рис. 6. Данный случай соответствует измерениям, полученным с помощью радиометрического приёмника № 1 для скорости ветра 8,0 м/с, на вертикальной поляризации, угол наблюдения 65° . Деление по параметру τ не проводилось. Следует обратить внимание на существенное сокращение объёмов выборки измерений, удовлетворяющих заданным параметрам. Как видно из численного значения, приведённого на графике, выделенным условиям соответствует всего лишь 95 азимутальных проходов из общего их числа в 12 467 шт.

Анализ данных, приведённых на *рис. 6*, позволяет сделать вывод о наличии ярко выраженного характера зависимости E_{eff} от азимутального угла (здесь и далее для сокращения мы будем подразумевать под азимутальным углом φ разницу между направлениями визирования и ветрового потока). Как и ожидалось (на основании результатов из работы (Сазонов и др., 2018)), внешний вид этой зависимости может быть описан бигармонической функцией вида:

$$E_{eff}(\varphi) = a_0 + a_1 \cos(\varphi) + a_2 \cos(2\varphi),$$

а коэффициенты a_0 , a_1 и a_2 могут быть найдены по экспериментальным данным. Для приведённого примера они составляют: $a_0 = 0,79256$, $a_1 = -0,0024012$ и $a_2 = -0,0026219$.

Несмотря на то, что найденные значения коэффициентов точно соответствуют масштабам эффекта азимутальной анизотропии радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности (до 3–4 К в зависимости от условий), рассмотрение их отдельных значений не позволяет судить о правильности решения поставленной задачи. В связи с этим описанная процедура обработки была проведена независимо для каждого из двух радиометрических приёмников, для обеих поляризаций, для надириных углов θ , равных 9,5; 24,5; 39,5; 55,0 и 65,0°, а также для всего диапазона имеющихся скоростей ветра. Поскольку информация о коэффициенте a_0 не представляет интерес в контексте рассматриваемой задачи, а также повторяет результаты, показанные в работе (Стерлядкин и др., 2018), на *рис. 7* и *8* (см. с. 243) приведены ветровые зависимости только для коэффициентов a_1 и a_2 . Из рассмотрения были исключены случаи (в основном соответствующие скоростям ветра более 16 м/с), для которых объём выборки составил менее 10 азимутальных сканов.

Для сравнения на всех графиках приведены результаты модельных расчётов соответствующих переменных, выполненных в соответствии с работой (Meissner, Wentz, 2012) для тех же метеоусловий и физических параметров водной среды.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Масштаб продемонстрированного эффекта азимутальной анизотропии параметра E_{eff} имеет значения, схожие с представленными в литературе.
2. Результаты, полученные с помощью двух идентичных по характеристикам радиометрических приёмников, свидетельствуют о корректности проведённых измерений и последующей обработки.
3. Наилучшее совпадение результатов моделирования и экспериментальных исследований наблюдается для коэффициента a_1 , полученного на горизонтальной поляризации, а также для коэффициента a_2 — на вертикальной.
4. В свою очередь, коэффициент a_1 , соответствующий горизонтальной поляризации, на настильных надириных углах (55° и выше) демонстрирует наибольшие отличия от модели, соответствующие прямо противоположным эффектам.
5. Разброс полученных значений, наблюдаемый для скоростей ветра более 10 м/с, соответствует существенному снижению объёмов выборки анализируемых данных (см. *рис. 2*).
6. Резкое уменьшение объёма выборок анализируемых данных с ростом скорости ветра не позволяет говорить о достоверности результатов, соответствующих скоростям ветра более 14–15 м/с.
7. Наблюдаемые отличия в области малых скоростей ветра (несмотря на большую статистическую обеспеченность), такие как возникновение максимумов и параллельное смещение вдоль горизонтальной оси, могут быть вызваны существенными отличиями состояния водной поверхности в точке реализации измерений от условий развитого волнения в открытом океане.

Важно ещё раз отметить, что представленные результаты являются первым этапом обработки экспериментальных данных. Как было показано, в отличие от ярко выраженной ветровой или угломестной зависимости эффективного коэффициента излучения, выделение менее заметных, но критически важных для развития модели формирования и переноса излучения

эффектов требует более сложной процедуры их обработки. Многие процессы сортировки и оценки качества на этом, первом, этапе были опущены ввиду невозможности их автоматизации. А применённые алгоритмы машинной обработки могли привести к частичной потере экспериментальных данных в значимых (где проявляются особенности анализируемых зависимостей) областях углов, скорости и направления ветрового потока и т. д. Несмотря на это, подобная «экспресс»-обработка позволила продемонстрировать действие двух дополнительных эффектов, влияющих на величину E_{eff} , а также определить общий вид этих зависимостей.

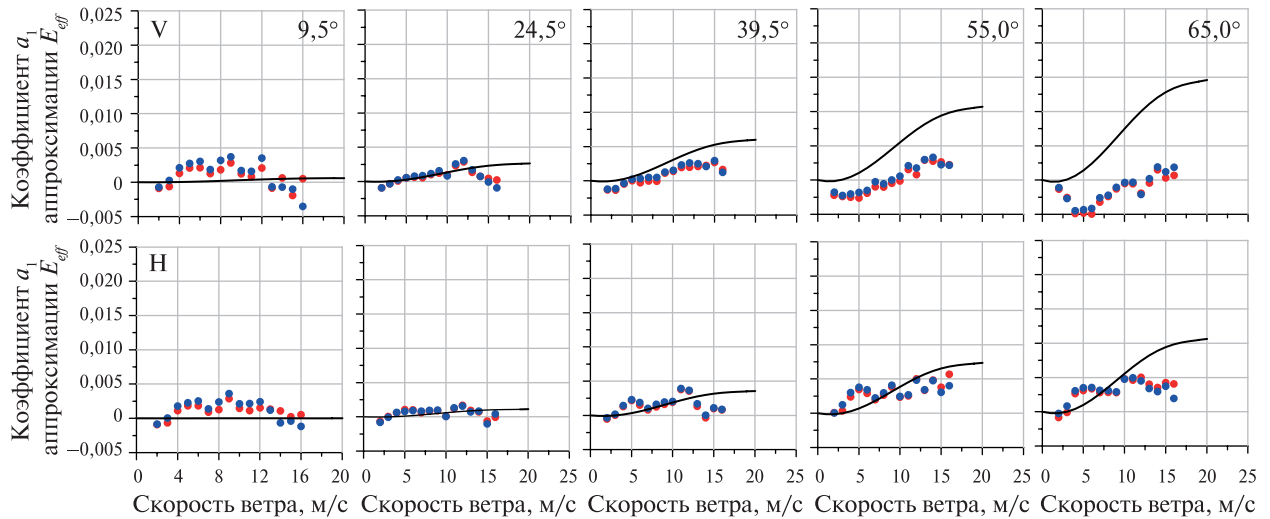


Рис. 7. Ветровые зависимости коэффициента a_1 аппроксимации $E_{eff}(\varphi)$. Красные точки — данные, полученные радиометром № 1, синие — радиометром № 2; сплошная чёрная линия — результаты модельных расчётов

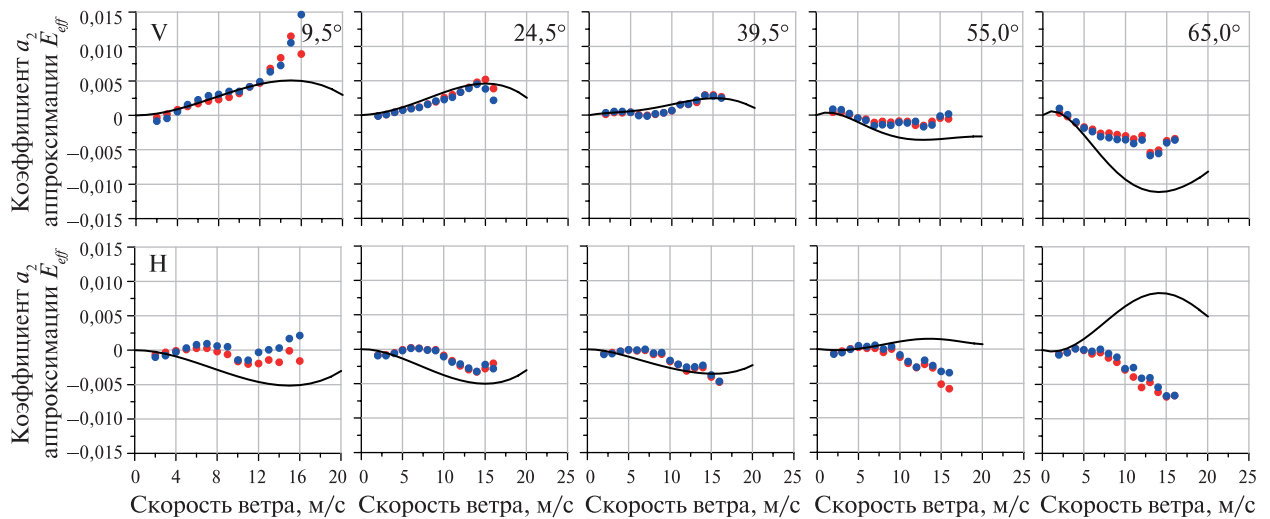


Рис. 8. Ветровые зависимости коэффициента a_2 аппроксимации $E_{eff}(\varphi)$. Красные точки — данные, полученные радиометром № 1, синие — радиометром № 2; сплошная чёрная линия — результаты модельных расчётов

В дальнейшем авторами работы будет проведён повторный, более детальный анализ всего объёма экспериментальных измерений, где основное внимание будет уделено оценке качества имеющихся данных и, по возможности, сохранению большего их количества с целью обеспечения статистической значимости соответствующих выборок. Очевидно, что некоторые этапы обработки будут при этом выполняться вручную.

На основании результатов повторного анализа будут сделаны окончательные выводы об их сходстве/отличии от имеющихся модельных представлений, а также о возможности их (эффектов) аналитического описания для включения в модель формирования и переноса излучения в системе «океан – атмосфера». При этом уже сейчас авторам очевидно, что ключ к пониманию связи «ветровой поток – излучение», скорее всего, лежит в изучении тонкой структуры ветрового волнения, присутствующей на поверхности в момент проведения измерений при фиксированных метеорологических условиях.

Заключение

В силу значительных пробелов в теории формирования излучения морской поверхностью применение понятия эффективного коэффициента излучения становится оправданным на данном этапе исследований. Его введение, как показывает практика, позволяет уже сейчас решать широкий спектр актуальных задач дистанционно зондирования Земли из космоса. При этом точность аппроксимаций, построенных на основе экспериментальных исследований, существенным образом зависит от их репрезентативности и охвата всех возможных вариаций параметров водной поверхности и атмосферы над ней. Спутниковые данные в этом плане хороши тем, что позволяют накапливать огромную статистику на фиксированных углах и частотах, характерных для каждого отдельного инструмента и определённых заранее параметрами сканирования и частотно-поляризационным планом. При этом задачей натуральных подспутниковых экспериментов является заполнение пробелов в отсутствующих углах и частотах, а также изучение более тонких эффектов за счёт возможности детальной оценки как условий волнообразования, так и параметров системы «океан – атмосфера».

Приведённые в настоящей работе результаты натуральных измерений позволили, в дополнение к уже полученным в исследовании (Стерлядкин и др., 2018) данным, продемонстрировать наличие связи эффективного коэффициента излучения E_{eff} с состоянием приводного слоя атмосферы (характеризуемого интегральным поглощением τ), а также с углом взаимной ориентации плоскости наблюдения и ветрового потока (генерального направления распространения волнения). При этом характер выявленных зависимостей и их масштаб близки к результатам, признанным во всём мире. Несмотря на отсутствие полного согласия результатов описываемых экспериментальных измерений с модельными оценками, полученная информация, безусловно, становится полезной с точки зрения развития теории формирования и переноса излучения в системе «океан – атмосфера», а дальнейшие исследования будут продолжены с целью повышения их качества и статистической обеспеченности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 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 гидрофизическая платформа «Кацивели» как подспутниковый полигон на Черном море // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 1. С. 31–44.
2. Кузьмин А. В., Садовский И. Н., Горшков А. А., Ермаков Д. М. Приборная платформа для надводных измерений морской поверхности и атмосферы // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 1. С. 83–91. DOI: 10.31857/S0205961420010054.
3. Садовский И. Н. Методика восстановления параметров спектра ветрового волнения на основе данных угловых радиополяриметрических измерений // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 6. С. 1–7.
4. Сазонов Д. С., Кузьмин А. В., Садовский И. Н. Азимутальная зависимость микроволнового излучения водной поверхности на основе дистанционных измерений на Черном море // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 3. С. 29–38. DOI: 10.7868/S0205961418030028.
5. Стерлядкин В. В., Сазонов Д. С., Кузьмин А. В., Шарков Е. А. Наземные радиометрические измерения эффективной излучательной способности морской поверхности без абсолютной калибров-

- ки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 29–41. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-29-41.
6. Трохимовский Ю. Г. Модель радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности // Исслед. Земли из космоса. 1997. № 1. С. 39–49.
 7. Kazumori M., English S.J. Use of the ocean surface wind direction signal in microwave radiance assimilation // Quarterly J. Royal Meteorological Society. 2015. V. 141. Iss. 689. P. 1354–1375. DOI: 10.1002/qj.2445.
 8. Meissner Th., 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.

Experimental studies of rough sea surface effective emissivity

I. N. Sadovsky^{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

This paper presents the results of experimental work aimed at studying the behavior of effective emissivity of sea surface for various wave conditions and states of the surface layer of the atmosphere. The experiment was carried out at the Katsiveli oceanographic platform of the Black Sea hydrophysical test site of the Russian Academy of Sciences (BGP RAS) located at the southern tip of the Crimean Peninsula. Changes in the radiation intensity of the ocean-atmosphere system were recorded by two identical radiometer-polarimeters with an operating wavelength of 8 mm. The resulting brightness temperatures at vertical and horizontal polarizations were recalculated into the corresponding values of effective emissivity of the disturbed water surface. From analysis of the vertical viewing angle dependence of this parameter, its sensitivity to the state of the near-water layer of the atmosphere determined by the value of the integral absorption at a frequency of 36.0 GHz is shown. Using the example of azimuthal dependences, the effect of azimuthal anisotropy of effective emissivity is shown and the results of approximating this effect with a biharmonic function are presented. The work is preliminary in nature and qualitatively demonstrates these effects.

Keywords: effective emissivity, rough water surface, microwave radiation of the ocean-atmosphere system, radiometer-polarimeter

Accepted: 08.11.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-234-246

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. Kuzmin A. V., Sadovskii I. N., Gorshkov A. A., Ermakov D. M., An instrument platform for above-water measurements of the ocean’s surface and atmosphere, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2020, No. 1, pp. 83–91 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961420010054.
3. Sadovskii I. N., Wind wave spectra parameters retrieval method based on measuring angular dependences of the brightness temperature, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2008, No. 6, pp. 1–7 (in Russian).
4. Sazonov D. S., Kuzmin A. V., Sadovskii I. N., Studying the azimuthal dependence of the sea surface microwave emissions based on measurements at the Black Sea, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2018, No. 3, pp. 29–38 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961418030028.

5. Sterlyadkin V. V., Sazonov D. S., Kuzmin A. V., Sharkov E. A., Ground radiometric measurements of the sea surface effective emissivity without absolute calibration, *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 2, pp. 29–41 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-29-41.
6. Trokhimovskii Yu. G., The model of radio emission of rough sea surface, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1997, No. 1, pp. 39–49 (in Russian).
7. Kazumori M., English S. J., Use of the ocean surface wind direction signal in microwave radiance assimilation, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2015, Vol. 141, Issue 689, pp. 1354–1375, DOI: 10.1002/qj.2445.
8. Meissner Th., 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, Vol. 50, No. 8, pp. 3004–3026, DOI: 10.1109/TGRS.2011.2179662.