# Наземные радиометрические измерения эффективной излучательной способности морской поверхности без абсолютной калибровки

В. В. Стерлядкин<sup>1,2</sup>, Д. С. Сазонов<sup>2</sup>, А. В. Кузьмин<sup>2</sup>, Е. А. Шарков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский технологический университет, Москва, 119454, Россия <sup>2</sup> Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: sterlyadkin@mail.ru

Проводится теоретическое обоснование нового метода измерения излучательной способности шероховатой подстилающей поверхности без абсолютной калибровки радиометра. При этом достаточным условием измерений является регистрация сигнала от чёрного тела с температурой подстилающей поверхности. Метод основан на измерении нисходящего излучения атмосферы, а также измерении излучения, идущего от подстилающей поверхности под тем же зенитным углом. Метод позволяет при любых параметрах излучения изучать зависимость эффективной излучательной способности поверхности  $E_{e\!f\!f}$  как от параметров самой подстилающей поверхности, так и от параметров атмосферы, которые регистрируются в месте измерений. Измеренные таким образом величины Е<sub>eff</sub> гармонически соответствуют модели зондирования Земли из космоса и прямо входят в уравнения радиационного переноса излучения, поэтому их можно непосредственно использовать при решении обратных задач. Метод может применяться не только к поверхности океана, но и к любой шероховатой подстилающей поверхности, льдам, сельскохозяйственным посадкам, растительности. В работе приводятся данные натурных измерений, выполненных с морской платформы Черноморского гидрофизического полигона РАН. Представлены экспериментально полученные зависимости E<sub>eff</sub> от углов падения и скорости приводного ветра, полученные на частоте 37 ГГц.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, радиометрические измерения, излучательная способность, подстилающая поверхность, взволнованная поверхность, обратные задачи

Одобрена к печати: 21.03.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-29-41

# Введение

Дистанционное зондирование Земли из космоса основывается на решении уравнений переноса излучения с учётом влияния подстилающей поверхности и процессов рассеяния на ней. Процесс формирования собственного излучения атмосферы относительно хорошо изучен, и здесь прогресс связан с уточнением коэффициентов поглощения газами атмосферы, облачностью и осадками. Наиболее сложными и не вполне устоявшимися представляются теории излучения подстилающей поверхности и процессов рассеяния падающего на неё излучения атмосферы. Например, модели для формы взволнованной морской поверхности являются сложными и многопараметрическими. Форму поверхности представляют в виде совокупности длинных гравитационных и гравитационно-капиллярных волн, которые описываются соотношениями, зависящими от скорости и направления ветра (Semyonov, 1966; Ulaby et al., 1981). Рассеяние электромагнитного излучения на взволнованной поверхности является ещё более сложной задачей, которая до настоящего времени решена с определёнными упрощениями и допущениями. Например, в работе (Садовский, 2012) проводится расчёт рассеяния в приближении геометрической оптики на многообразии фасетных, зеркально отражающих элементов поверхности с некоторым распределением уклонов. Трудности возникают в процессе определения границы перехода от гравитационных к гравитационно-капиллярным волнам при выборе функции распределения уклонов и ширины этого распределения (Трохимовский, 1997). Не менее сложным является расчёт влияния капиллярно-гравитационных волн на процесс рассеяния, который, как правило, проводится на базе теории малых возмущений (Ирисов, 1984).

Эффективный метод экспериментального измерения зависимости излучательной способности морской поверхности от параметров моря и атмосферы был рассмотрен в статье (Meissner, Wentz, 2012). В этой работе изучение излучательной способности океана E и её зависимости от скорости ветра W, направления ветра  $\varphi_W$ , частоты излучения f, параметров поляризации p и других факторов основывается на сравнении яркостной температуры  $T_B$ , измеренной на спутнике, с данными независимых измерений перечисленных параметров. При этом используется следующее уравнение для описания яркостной температуры  $T_{B,p}$  на верхней границе атмосферы:

$$T_{B,p} = T_{BU} + \tau E_p T_S + \tau R_p \left[ T_{BD} + \tau T_{cold} \right] + \tau T_{B,scat,p},\tag{1}$$

где  $T_{BU}$  — яркостная температура восходящего излучения атмосферы;  $\tau$  — полное пропускание всего слоя атмосферы;  $E_p$  — излучательная способность подстилающей поверхности;  $R_p = 1 - E_p$  — коэффициент отражения;  $T_S$  — температура подстилающей поверхности;  $T_{BD}$  — яркостная температура нисходящего излучения атмосферы, которая отражается от морской поверхности;  $T_{cold}$  — излучение холодного космоса; член  $\tau T_{B,scal,p}$  учитывает негладкий характер поверхности и является коррекцией длины атмосферного пути нисходящего излучения атмосферы, рассеянного взволнованной морской поверхностью.

Для вычисления E<sub>n</sub> на основе использования уравнения (1) предварительно проводится восстановление или расчёт профилей температуры атмосферы T(h), профиля влажности  $\rho(h)$ , T<sub>S</sub> — температуры подстилающей поверхности и её солёности S. Затем на основе этих данных проводится расчёт яркостной температуры восходящего излучения атмосферы T<sub>BU</sub>, полного пропускания всего слоя атмосферы т, яркостной температуры нисходящего излучения атмосферы T<sub>RD</sub>. На наш взгляд, самая большая трудность при использовании уравнения (1) заключается в необходимости предварительного вычисления коррекции атмосферной длины пути для нисходящего излучения, рассеянного на поверхности,  $T_{B,scat,p}$ . Из-за разнообразия моделей самой поверхности и сложности задачи рассеяния излучения получается, что величину  $T_{B,scat,p}$  вычислить весьма непросто. К тому же трудно оценить погрешность её вычисления, поскольку точное решение неизвестно, а экспериментально отделить вклад коррекции атмосферной длины пути от остальных вкладов в общий сигнал представляется невозможным. Это приводит к погрешностям вычисления  $E_p$  на основе использования уравнения (1) и погрешностям вычисления зависимостей  $E_p$  от параметров зондирования и состояния по-верхности и атмосферы, т.е. от величин f,  $\theta_i$  (угол падения),  $\tau$  и W. В конечном итоге это может негативно сказываться на точности решения обратной задачи восстановления параметров атмосферы и подстилающей поверхности по радиометрическим измерениям со спутников.

#### Уравнение радиационного переноса для эффективной излучательной способности подстилающей поверхности

Для расчёта излучательной способности  $E_p$  при использовании уравнения (1) сначала проводится расчёт поправки  $T_{B,scat,p}$ , которая использует фасетную модель взволнованной поверхности. При этом рассеяние на высокочастотной гравитационно-капиллярной части волн фактически не учитывается, потому что эта часть рассеяния автоматически входит в излучательную способность поверхности  $E_p$ . В данной работе предлагается отказаться от предварительного учёта как коротковолновой, так и длинноволновой поправки  $T_{B,scat,p}$ .

В предлагаемом подходе уравнение радиационного переноса будет иметь вид:

$$T_{B,p} = T_{BU} + \tau E_{eff,p} T_S + \tau R_{eff,p} [T_{BD} + \tau T_{cold}], \qquad (2)$$

где используется эффективная излучательная способность взволнованной поверхности  $E_{eff,p}$  и эффективный коэффициент отражения  $R_{eff,p}$ , связанные между собой соотношением  $E_{eff,p} + R_{eff,p} = 1$ . В нашем методе при использовании уравнения (2) в член  $E_{eff,p}$  автоматически входят все виды бокового рассеяния на неровной поверхности. В этом случае  $E_{eff,p}$  будет в не-

большой степени зависеть и от нисходящего излучения атмосферы, которое в задачах спутникового зондирования усредняется на площади пиксела в десятки квадратных километров. Измерение эффективной излучательной способности  $E_{eff,p}$  взволнованной поверхности моря или подстилающей поверхности суши можно проводить напрямую на Земле с контролем всех метеорологических параметров подстилающей поверхности и атмосферы. На основе накопленных данных о зависимости  $E_{eff,p}$  от всех восстанавливаемых метеорологических параметров предлагается проводить более точное решение обратной задачи. Предполагается, что наземные измерения выполняются при такой геометрии зондирования, которая полностью соответствует геометрии зондирования из космоса и процессам формирования излучения на границе «подстилающая поверхность — атмосфера».

Достоинством предложенного подхода является возможность проводить прямые наземные эксперименты по измерению зависимости  $E_{eff,p}$  и  $R_{eff,p}$  от скорости ветра W, направления ветра  $\varphi_W$ , частоты зондирования f, параметров поляризации p, угла падения  $\theta_i$ , пропускания атмосферы  $\tau$ , солёности S и других условий зондирования. При этом не требуется сложных модельных представлений и расчётов влияния шероховатой подстилающей поверхности. Зависимости  $E_{eff,p}$  от перечисленных параметров могут измеряться (и накапливаться в базе данных) непосредственно на Земле как с неподвижных морских платформ, так и с радиометров на подвижных носителях, при такой же геометрии формирования и рассеяния излучения, как и при зондировании со спутника (например, с морских судов, самолётов или беспилотных летательных аппаратов). При этом все параметры зондирования и свойства подстилающей поверхности измерений. При использовании подвижных носителей аппаратуры усреднение получаемых данных будет проводиться не только по времени, но и по пространству, что гармонически соответствует процессу усреднения данных, получаемых с космических аппаратов.

#### Радиометрический метод натурных измерения эффективной излучательной способности подстилающей поверхности без абсолютной калибровки радиометров

Вертикальные разрезы системы «океан – атмосфера» применялись многими исследователями (Шарков, 2014; Sharkov, 2003). Однако их комплексное использование для определения эффективной излучательной способности поверхности не проводилось.

Предлагаемый метод основывается на проведении наземных натурных радиометрических измерений подстилающей поверхности с помощью радиометра, установленного на небольшой высоте *H*, при которой вкладом слоя 0-H в сигнал восходящего излучения  $T_{BU}$  можно пренебречь (*puc. 1*, см. с. 32). Такие условия возникают, например, в диапазоне частот 6-50 ГГц, если радиометр располагается у поверхности Земли на высоте зондирования 10-20 м. Радиометр 1 установлен на поворотной платформе 2 и может сканировать по заданной программе как по углу места  $-90 < \beta < +90^{\circ}$  (или по зенитному углу  $\theta$ ), так и по углу азимута  $\alpha$ в диапазоне  $0-360^{\circ}$ .

При зондировании вниз, в сторону поверхности, под заданными углами падения на поверхность  $\theta$  и при азимутальном угле  $\alpha$  уравнение (2) для яркостной температуры, формируемой на входе радиометра, будет иметь вид:

$$T_{B,p,S} = E_{eff,p}T_S + R_{eff,p}(T_{BD} + \tau T_{cold}),$$
(3)

где  $T_{B,p,S}$  — значение яркостной температуры при зондировании вниз, в сторону поверхности;  $E_{eff,p}$  — эффективная излучательная способность шероховатой поверхности;  $R_{eff,p} = 1 - E_{eff,p}$  — эффективный коэффициент отражения;  $T_S$  — термодинамическая температура подстилающей поверхности;  $(T_{BD} + \tau T_{cold})$  — яркостная температура нисходящего излучения, сформированная атмосферой и фоновым космическим излучением в направлении падения  $\theta$  и при азимуте  $\alpha$ .



Рис. 1. Схема измерений эффективной излучательной способности шероховатой подстилающей поверхности. Радиометр 1 установлен на платформе 2 на высоте *H* над поверхностью. При зондировании вверх с зенитным углом θ и азимутом α регистрируется нисходящее излучение атмосферы и вклад космического излучения. При зондировании вниз под углом падения θ и при азимуте α регистрируется восходящее излучение от подстилающей поверхности 3. Дополнительно регистрируется сигнал от чёрного тела 4, имеющего температуру подстилающей поверхности *T<sub>S</sub>* 

При зондировании вверх под зенитным углом  $\theta$  и тем же азимутом  $\alpha$ , что и при зондировании вниз, регистрируется нисходящее излучение атмосферы, для которого в случае пренебрежения вкладом слоя (0–*H*) получаем другое уравнение:

$$T_{B,p,D} = T_{BD} + \tau T_{cold}.$$
 (4)

Из соотношений (3) и (4) нетрудно получить выражение для эффективной излучательной способности подстилающей поверхности:

$$E_{eff,p} = \frac{T_{B,p,S} - T_{B,p,D}}{T_S - T_{B,p,D}}.$$
(5)

Учитывая линейную связь сигнала радиометра *U* с яркостной температурой излучения  $T_B$ , падающего на его приёмную антенну, получим, что радиометрический сигнал при зондировании вниз имеет вид:  $U_S(\theta, \alpha, p) = A + BT_{B,p,S}$ , а при зондировании вверх —  $U_D(\theta, \alpha, p) = A + BT_{B,p,D}$ , где калибровочные коэффициенты радиометра *A* и *B* постоянны. Поэтому соотношение (5) можно представить в другой форме:

$$E_{eff,p} = \frac{U_{S}(\theta, \alpha, p) - U_{D}(\theta, \alpha, p)}{(A + BT_{s}) - U_{D}(\theta, \alpha, p)} = \frac{U_{S}(\theta, \alpha, p) - U_{D}(\theta, \alpha, p)}{U_{0} - U_{D}(\theta, \alpha, p)},$$
(6)

где мы учли, что величина  $A + BT_S$  формируется сигналом, яркостная температура которого равна термодинамической температуре  $T_S$  подстилающей шероховатой поверхности. Именно такой радиометрический сигнал  $U_0$  формирует абсолютно чёрное тело, имеющее температуру подстилающей поверхности  $T_S$ :

$$U_0 = A + BT_s. (7)$$

Таким образом, измерение эффективной излучательной способности шероховатой подстилающей поверхности проводится по формуле (6) по трём измеренным радиометром сигналам без абсолютной калибровки радиометра и без вычисления калибровочных коэффициентов *A* и *B*. Альтернативой абсолютной калибровке является наличие чёрного тела с температурой подстилающей поверхности.

Очевидно, что при отсутствии чёрного тела, температура которого подстраивается под температуру подстилающей поверхности, возможная модификация предложенного метода заключается в традиционной калибровке измерения радиометрических сигналов  $U_{01}$  и  $U_{02}$  не от одного, а от двух чёрных тел, имеющих термодинамическую температуру  $T_1$  и  $T_2$  соответственно. Предложенные методы позволяют измерять также эффективный коэффициент отражения шероховатой поверхности  $R_{eff,p}$ , поскольку  $R_{eff,p} = 1 - E_{eff,p}$ .

При зондировании со спутника геометрия рассеяния нисходящего излучения на неровной подстилающей поверхности и формирования восходящего излучения от самой шероховатой поверхности полностью соответствуют процессам, происходящим при наземных измерениях, за исключением масштабов усреднения. Очевидно, что необходимым условием возможности прямого использования  $E_{eff,p}$ , полученного на Земле, к спутниковым данным является эквивалентность аппаратуры, применяемой на спутнике и на Земле, и усреднение наземных данных во времени или как во времени, так и в пространстве. При этом автоматически и, естественно, без привлечения модельных представлений о форме поверхности и о процессах рассеяния учитываются все свойства подстилающей поверхности, всё многообразие её форм, режимов рассеяния и формирования восходящего излучения. Предложенные методы, при условии эквивалентности аппаратуры на спутнике и на Земле, в процессе измерений автоматически будут учитывать и ширину диаграммы направленности антенной системы радиометра, и коррекцию вклада атмосферного пути нисходящего излучения атмосферы, обусловленную шероховатым характером поверхности.

Прямые наземные измерения эффективной излучательной способности шероховатой поверхности с одновременной регистрацией на месте всех основных параметров самой поверхности и атмосферы позволят получить надёжные зависимости  $E_{eff,p}$  от модуля скорости ветра W, коэффициенты анизотропии, связанные с направлением измерений относительно направления ветра, зависимости от частоты f, поляризации p, угла падения  $\theta$ , полного пропускания атмосферы  $\tau$ , интегрального паросодержания, водности облаков и т.д. Накопленные данные, по-видимому, позволят более надёжно проводить решение обратных задач радиометрического зондирования из космоса, поскольку не привлекают сложные модельные представления о форме поверхности и процессах рассеяния, а опираются на прямые натурные измерения.

Отметим, что рассмотренную методику можно применять для любых частотных диапазонов и для любой высоты H установки радиометра при условии, что вклад слоя 0-H учитывается в уравнении (2).

# Натурные измерения *E*<sub>eff,p</sub> морской поверхности со стационарной платформы. Описание аппаратуры и методики измерений

Одним из направлений исследований, проводимых в лаборатории микроволновой радиометрии отдела исследования Земли из космоса Института космических исследований РАН (ИКИ РАН), является исследование параметров взаимодействия водной поверхности с приводным слоем атмосферы измерением микроволнового излучения системы «океан – атмосфера». Экспериментальные исследования с 2005 по 2016 г. проводились на океанографической платформе «Кацивели», принадлежащей Черноморскому гидрофизическому полигону РАН (ЧГП РАН), расположенному на южной оконечности полуострова Крым. Данная платформа удалена от берега на 600 м, глубина моря у платформы составляет ~30 м. Более подробное описание платформы приведено в работе (Кузьмин и др., 2009).



Рис. 2. Радиометрический комплекс на поворотном устройстве «Траверс-2» позволял проводить автоматические круглосуточные измерения по заданной программе

Применение предложенного метода измерения  $E_{eff,p}$  будет показано на экспериментальном материале, собранном в период с 6 по 9 сентября 2016 г. Измерения проводились с помощью микроволнового радиометра Р08П с рабочей длинной волны ~8 мм (f = 36,0 ГГц), шириной диаграммы направленности по уровню половинной мощности 9° и чувствительностью поряд-

ка 0,1 К (Анискович и др., 2016). Данный прибор регистрирует излучение на вертикальной (V), горизонтальной (H) и линейных поляризациях, повёрнутых на ±45°. В эксперименте 2016 г. прибор работал только в режиме двух поляризаций (V, H).

Радиометр Р08П был закреплён вместе с другими измерительными приборами на поворотно-сканирующей платформе «Траверс-2», разработанной в ИКИ РАН. Платформа установлена на высоте 13,5 м над уровнем моря с горизонтальным выносом относительно края морской вышки длинной 5 м (*puc. 2*).

Рабочий диапазон углов, при котором в луч не попадала береговая линия или элементы платформы, составлял  $-70...+90^{\circ}$  по углу места  $\beta$  и 73...251° по азимуту  $\alpha$ , отсчитываемому от направления на север. В процессе работы поворотной платформы радиометры периодически поворачивались таким образом, что происходило измерение излучения от двух чёрных тел, имеющих термодинамические температуры  $T_1 = 286,5$  К и  $T_2 = 323$  К. Синхронно с радиометрическим измерением проводилось измерение температуры воды, скорости и направления ветра на высоте 21 м, а также велась видеорегистрация изображения поверхности моря или атмосферы в направлении зондирования.

Площадь усреднения радиометра Р08П при угле места  $\beta = -20^{\circ}$  составляла около 5 м<sup>2</sup>, а при угле места  $-70^{\circ}$  увеличивалась до 120 м<sup>2</sup>. Учитывая, что при типичной скорости ветра 10 м/с длина гравитационных волн сравнима с размерами пятна диаграммы направленности, а скорость углового сканирования составляла 2 град/с, получалось, что при зондировании, близком к надиру, единичный цикл сканирования регистрировал влияние длинных гравитационных волн. Особенно это проявлялось при наличии волн зыби. Усреднение результатов по нескольким циклам сканирования позволило снизить это влияние, однако при малых углах падения данный фактор вносил определённые погрешности.

Сканирование водной поверхности и атмосферы осуществлялось по следующей схеме: поворотная платформа устанавливалась на один из шести равноудалённых друг от друга азимутальных углов  $\alpha$ , а затем проводилось сканирование по углу места  $\beta$  от  $-70^{\circ}$  до  $+90^{\circ}$ . При зондировании вниз при углах падения на поверхность  $20 \le \theta_i \le 80^{\circ}$  (или при углах места  $-70 \le \beta_i \le -10^{\circ}$ ) регистрировались сигналы радиометра  $U_s(\theta, \alpha, p)$ . Это соответствовало излучению, исходящему от поверхности вверх. При зондировании вверх регистрировалось нисходящее излучение атмосферы — сигналы радиометра  $U_D(\theta, \alpha, p)$  под зенитными углами  $100 \le \theta_i \le 180^{\circ}$  (или при углах места  $10 \le \beta_i \le 90^{\circ}$ ).

В начале данного цикла сканирования поворотная платформа поворачивала радиометр в сторону нагрузок, при этом измерялись радиометрические сигналы  $U_{01}$  и  $U_{02}$  от двух чёрных тел, имеющих термодинамическую температуру  $T_1$  и  $T_2$  соответственно, а радиометрический сигнал  $U_0$  от чёрного тела с термодинамической температурой  $T_S$  вычислялся по линейному закону:

$$U_0 = U_{01} + \frac{U_{02} - U_{01}}{T_2 - T_1} (T_S - T_1).$$
(8)

Зависимость эффективного коэффициента излучения поверхности от угла  $\theta_j$  при различных скоростях ветра *W* вычислялась на основе соотношения (6), которое для конкретных углов имеет следующий вид:

$$E_{eff}(\theta, \alpha, p, W) = \frac{U_S(\theta_i, \alpha_j, p, W) - U_D(\theta_i, \alpha_j, p, W)}{U_0 - U_D(\theta_i, \alpha_j, p, W)},$$
(9)

где  $U_{S}(\theta_{i}, \alpha_{j}, p, W)$  — некалиброванный сигнал радиометра при зондировании вниз под углом падения  $\theta_{i}$ ;  $U_{D}(\theta_{i}, \alpha_{j}, p, W)$  — некалиброванный сигнал радиометра при зондировании вверх под зенитным углом  $\theta_{i}$ ;  $U_{0}$  — радиометрический сигнал от чёрного тела с термодинамической температурой  $T_{S}$ , вычисленный по формуле (8).

#### Влияние модуля скорости ветра на эффективную излучательную способность взволнованной морской поверхности

Влияние ветра на взволнованность морской поверхности и, соответственно, на её излучательную способность E наиболее рационально учитывается в работе (Meissner, Wentz, 2012), в которой E определяется из уравнения (1) и представлена в виде суммы трёх компонент:

$$E = E_0 + \Delta E_W + \Delta E_{\varphi}, \tag{12}$$

где  $E_0$  — излучательная способность гладкой поверхности, которая даёт основной вклад и рассчитывается по формулам Френеля с учётом углов падения, зависимости диэлектрической проницаемости от частоты, солёности и температуры воды;  $\Delta E_W$  —дополнительный вклад, зависящий от скорости ветра, он усредняется в диапазоне 0—360° по всем возможным азимутальным направлениям зондирования относительно ветра  $\varphi$ ; слагаемое  $\Delta E_{\varphi}$  описывает дополнительный вклад, обусловленный анизотропией излучения поверхности, которая зависит от угла  $\varphi$ . Анизотропия, в частности, проявляется в том, что собственное излучение взволнованной морской поверхности при зондировании по ветру, против ветра и поперёк ветра различаются друг от друга. Масштаб каждого последующего слагаемого в уравнении (12), как правило, существенно меньше предыдущего.

Однако данный подход определения E и её зависимости от параметров подстилающей поверхности и атмосферы, как отмечалось в начале статьи, требует предварительного вычисления коррекции атмосферной длины пути для нисходящего излучения, рассеянного поверхностью,  $T_{B,scat,p}$ , а эта процедура затруднительна из-за многообразия моделей формы поверхности и сложности учёта её влияния на рассеянное излучение атмосферы.

Отмеченные недостатки всех перечисленных подходов к определению ветровой добавки снимаются при использовании эффективной излучательной способности  $E_{eff,p}$  в соответствии с уравнением (2), которую можно измерять при прямых натурных измерениях зависимости  $E_{eff,p}$  от скорости и направления приповерхностного ветра. При таком подходе также будет использоваться уравнение (12), только в него будут входить значения эффективной излучательной способности:

$$E_{eff} = E_0 + \Delta E_{eff,W} + \Delta E_{eff,\varphi}.$$
(13)

В предложенном методе автоматически учитывается состояние атмосферы, поскольку её яркостная температура измеряется. При этом не требуется привлекать какие-либо модельные представления о форме поверхности и предварительно рассчитывать какие-либо поправки.

Известно, что излучательная способность взволнованной морской поверхности зависит в первую очередь от модуля скорости ветра и в меньшей степени — от азимута зондирования относительно направления ветра. При рассмотрении зависимости  $E_{eff,p}$  от модуля скорости ветра азимутальную зависимость, как правило, усредняют по различным азимутальным направлениям.

На *рис. 3* представлены экспериментальные зависимости эффективной излучательной способности  $E_{eff,p}$  водной поверхности для различных углов падения  $\theta$  при разных значениях скорости ветра W на вертикальной и горизонтальной поляризациях. Данные усреднены по различным суточным измерениям от 06.10.2016 до 09.10.2016 и сгруппированы по величине модуля скорости ветра.

Усреднение данных проводилось по интервалам скоростей ветра  $W \pm 0,5$  м/с, где величина W принимала целочисленные значения от минимальной до максимальной регистрируемой скорости в течение конкретных суток. На *рис.* 4 (см. с. 37) представлены в явном виде зависимости  $E_{eff,p}$  от величины модуля скорости ветра W для двух дней измерений. Значения углов наблюдений отмечены в таблице в правой части графиков.



*Рис. 3.* Зависимость эффективной излучательной способности взволнованной морской поверхности от угла падения θ, усреднённая по различным дням измерений в группах с разными скоростями ветра. Погрешности измерений представлены на *рис. 4* 



*Рис. 4.* Зависимость эффективной излучательной способности взволнованной морской поверхности от модуля скорости ветра для различных углов θ падения на поверхность. Данные усреднены за 06.10.2016 и 08.10.2016. Тонкими линиями показан 95%-й доверительный интервал изменений



*Рис. 5.* Статистика данных по измеренным значениям  $E_{eff,p}$  в различные дни

Из представленных данных видно, что получаемые новым методом значения эффективной излучательной способности имеют сильную зависимость от угла зондирования и модуля скорости ветра. Объём усредняемой статистики по каждому дню приведён на *puc. 5*. Как для вертикальной, так и для горизонтальной поляризаций прослеживается чёткая ветровая зависимость излучательной способности почти при всех углах наблюдения. Для вертикальной поляризации, представленной на *puc. 4* слева, наиболее сильная убывающая зависимость  $E_{eff,v}$ от скорости ветра наблюдается при углах падения 70–75°. При углах падения 50–55° параметр  $E_{eff,v}$  от скорости ветра практически не зависит, что соответствует известным фактам. При малых углах падения 20–40° ветровая зависимость меняет знак, и  $E_{eff,v}$  растёт с увеличением скорости ветра. На горизонтальной поляризации  $E_{eff,h}$  растёт со скоростью ветра при углах падения от 20 до 75°. В то же время на *puc. 3* за 07.10.2016 и 08.10.2016 можно заметить, что в окрестности 75° параметр  $E_{eff,h}$  почти не зависит от скорости ветра.

Наибольшая чувствительность  $E_{eff,p}$  от модуля скорости ветра наблюдается на вертикальной поляризации в окрестности углов падения 75° и на горизонтальной поляризации в окрестности 50–60°. Именно эти углы падения и соответствующую поляризацию целесообразно выбирать для регистрации скорости ветра при радиометрических измерениях со спутника. Наименьшая чувствительность  $E_{eff,p}$  к скорости ветра наблюдается на вертикальной поляризации при углах падения около 50–55° и на горизонтальной поляризации вблизи углов 75°. Эти диапазоны и поляризации целесообразно использовать для восстановления иных метеорологических параметров подстилающей поверхности и атмосферы. В сложившейся практике космических измерений именно углы падения 53–55° используются для дистанционного зондирования Земли.

Стоит отметить особенность метеоусловий во время проведения эксперимента. Начиная с вечера 7 октября поднялся сильный восточный ветер, который к полудню 8 октября достиг значения 22 м/с, затем резко изменился на западный с той же скоростью и не стихал до вечера 9 октября. Под влиянием такого сильного и стабильного по направлению ветра образовались, как это обычно и бывает, длинные энергонесущие волны амплитудой в 2–3 м, которые даже после окончания ветрового воздействия затихают медленно. Как отмечено ранее, высота установки радиометров 13,5 м и пространственное разрешение антенной системы соизмеримы с длинными ветровыми волнами. Хотя усреднение экспериментальных данных и позволяет уменьшить влияние длинных волн на результаты измерений, при сильном разгоне это влияние все-таки велико, что и наблюдается при оценке погрешностей за 8 и 9 октября, несмотря на достаточное для усреднения количество экспериментальных данных.

В целом полученные данные указывают на то, что предложенный метод измерений  $E_{eff,p}$  даёт хорошую стабильность результатов. Полученные зависимости качественно соответствуют известным свойствам взволнованной поверхности. В настоящей работе авторы не ставили задачу численного сравнения полученных зависимостей с известными данными, поскольку параметры радиометра в данном эксперименте отличаются от большинства экспериментальных приборов. Кроме того, массив полученных результатов не очень велик. Целью проведённого эксперимента было подтверждение работоспособности предложенных методов измерений.

#### Заключение

Приведено теоретическое обоснование нового метода измерения излучательной способности шероховатой подстилающей поверхности без абсолютной калибровки радиометра. При этом достаточным условием замены абсолютной калибровки является дополнительная регистрация сигнала от чёрного тела с температурой подстилающей поверхности. Метод основан на измерении нисходящего излучения атмосферы, которое затем отражалось и рассеивалось подстилающей поверхностью, а также измерении излучения, идущего от подстилающей поверхности под тем же зенитным углом. Метод позволяет при любых параметрах излучения изучать зависимости эффективной излучательной способности поверхности  $E_{eff}$  как от параметров самой подстилающей поверхности, так и от параметров атмосферы, которые регистрируются в месте измерений. Измеренные таким образом зависимости  $E_{off}$  от параметров поверхности гармонически соответствуют модели переноса излучения и уравнениям, которые используются при решении обратных задач зондирования Земли из космоса. Метод может применяться не только к поверхности океана, но и к шероховатой подстилающей поверхности суши, льдам, сельскохозяйственным посадкам, растительности. Если радиометр установить на подвижный носитель, например на судно, беспилотный летательный аппарат или самолёт, то можно проводить усреднение эффективной излучательной способности не только по времени, но и по пространству. Такое усреднение более гармонично будет соответствовать режиму зондирования со спутника, чем измерение с неподвижной платформы, за счёт меньшего различия в площади усреднения. При этом способ может применяться к поверхности Земли, сельскохозяйственным посадкам, льдам и другим шероховатым поверхностям даже при перемежаемых свойствах подстилающей поверхности.

В работе приводятся данные натурных измерений, выполненных с морской платформы Черноморского гидрофизического полигона РАН. Представлены экспериментально полученные зависимости  $E_{eff}$  от угла падения, скорости приводного ветра, которые качественно соответствуют известным свойствам взволнованной морской поверхности. Если геометрия зондирования и параметры наземного радиометра будут идентичны спутниковой аппаратуре, то получаемые предложенным способом зависимости  $E_{eff}$  станут автоматически учитывать как диаграмму направленности антенны, так и всё многофакторное влияние шероховатости поверхности, поэтому будут гармонично соответствовать задачам радиометрического зондирования из космоса. Предложенный метод находится на этапе патентования (*Стерлядкин В. В.*, Способ бескалибровочного радиометрического измерения эффективного коэффициента излучения шероховатой подстилающей поверхности: заявка на патент РФ № 2017104904 от 15.02.2017).

#### Литература

- 1. *Анискович В. М., Кузьмин А. В., Сазонов Д. С., Хайкин В. Б.* Радиометр-поляриметр диапазона 0,8 см для натурных и лабораторных измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 213–223.
- 2. *Ирисов В. Г.* Исследование излучения электромагнитных волн периодически неровной поверхностью: препринт. М.: ИКИ АН СССР, 1984. Пр-944. 18 с.

- 3. 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 Чёрном море // Исследование Земли из космоса. 2009. № 1. С. 31–44.
- 4. *Садовский И. Н.* Особенности учёта вклада длинноволновых компонент волнения в приращение излучательной способности морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 228–239.
- 5. *Трохимовский Ю. Г.* Модель радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности // Исследование Земли из космоса. 1997. № 1. С. 39–49.
- 6. Шарков Е.А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 552 с.
- Meissner T., Wentz F.J. The emissivity of ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speed and Earth incidence angles // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2012. V. 50. No. 8. P. 3004–3026.
- 8. *Semyonov B. I.* Approximate computation of scattering of electromagnetic waves by rough surface contours // Radio engineering and electronic physics. 1966. V. 1. P. 1179–1187.
- 9. *Sharkov E. A.* Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations. Berlin, Heidelberg, N.Y.: Springer/PRAXIS, 2003. 612 p.
- 10. *Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K.* Microwave Remote Sensing: Active and Passive. 1981. V. 1 and 2. Addison-Wesley Publishing Company, Advanced Book Program/World Science Division, 1981.

# Ground radiometric measurements of the sea surface effective emissivity without absolute calibration

V.V. Sterlyadkin<sup>1,2</sup>, D.S. Sazonov<sup>2</sup>, A.V. Kuzmin<sup>2</sup>, E.A. Sharkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Moscow University of Technology, Moscow 119454, Russia <sup>2</sup> Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: sterlyadkin@mail.ru

Theoretical substantiation of a new method for measuring the emissivity of a rough underlying surface without absolute calibration of the radiometer is carried out. In this case, a sufficient condition for measurements is recording of the signal from the blackbody with the temperature of the underlying surface. The method is based on the measurement of the descending radiation of the atmosphere, as well as measuring the radiation coming from the underlying surface at the same zenith angle. The method makes it possible to study, for all radiation parameters, the dependences of the effective emissivity of the surface  $E_{eff}$ , both on the parameters of the underlying surface itself and on the parameters of the atmosphere, which are recorded at the measurement site. The values of  $E_{eff}$  measured in this way harmonically correspond to the radiative transfer model and directly enter into the radiation transfer equations, therefore they can be used directly for solving inverse problems. The method can be applied not only to the surface of the ocean, but also to any rough surface, ice, agricultural plantations, vegetation. The paper presents the data of field measurements performed from the offshore platform of the Black Sea Hydrophysical Polygon of the Russian Academy of Sciences. Experimentally obtained dependences  $E_{eff}$  on the angles of incidence and on the velocity of the surface wind obtained at the frequency of 37.5 GHz are presented.

**Keywords:** remote sensing of the Earth, radiometric measurements, emissivity, underlying surface, roughed ocean surface, inverse problems

Accepted: 21.03.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-29-41

### References

- 1. Aniskovich V. M., Kuzmin A. V., Sazonov D. S., Khaikin V. B., Radiometr-polyarimetr diapazona 0,8 sm dlya naturnykh i laboratornykh izmereniy (Radiometer-polarimeter of 0.8 cm range for nature and laboratory measurements), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 2, pp. 213–223.
- 2. Irisov V.G., *Issledovaniye izlucheniya elektromagnitnykh voln periodicheski nerovnoy poverkhnosťyu* (Investigation of the radiation of electromagnetic waves by periodically uneven surface), Moscow: IKI AN SSSR, 1984, Pr-944, 18 p.
- 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., Morskaya gidrofizicheskaya platforma "Katsiveli" kak podsputnikovyi poligon na Chernom more (Marine Hydrophysical platform "Katsiveli" as a sub-satellite test site on the Black Sea), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 1, pp. 31–44.
- 4. Sadovskii I. N., Osobennosti ucheta vklada dlinnovolnovykh komponent volneniya v prirashchenie izluchatel'noi sposobnosti morskoi poverkhnosti (Features including the contribution of long-wavelength components of the unrest in the increase of the sea surface emissivity), *Sovremennye problemy distantsion-nogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 228–239.
- 5. Trokhimovskii Yu. G., Model' radioteplovogo izlucheniya vzvolnovannoi morskoi poverkhnosti (The model of radio emission rough sea surface), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1997, No. 1, pp. 39–49.
- 6. Sharkov E. A., *Radioteplovoye distantsionnoye zondirovaniye Zemli: fizicheskiye osnovy* (Radiothermal remote sensing of the Earth: physical bases), Vol. 1, Moscow: IKI RAN, 2014, 552 p.
- Meissner T., Wentz F.J., The emissivity of ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speed and Earth incidence angles, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, Vol. 50, No. 8, pp. 3004–3026.
- 8. Semyonov B. I., Approximate computation of scattering of electromagnetic waves by rough surface contours, *Radio engineering and electronic physics*, 1966, Vol. 1, pp. 1179–1187.
- 9. Sharkov E.A., *Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations*, Berlin, Heidelberg, New York: Springer/PRAXIS, 2003, 612 p.
- 10. Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K., *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*, Vol. 1 and 2, Addison-Wesley Publishing Company, Advanced Book Program/World Science Division, 1981.