

УДК 621.371.3/205.2

В.Л. МИРОНОВ\*,\*\*, Л.Г. КОСОЛАПОВА\*, Е.А. РУДАКОВА\*\*

### ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛАЖНЫХ ПОЧВ ДЛЯ РАДИОМЕТРА AMSR-E КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА AQUA<sup>1</sup>

Предлагается диэлектрическая модель влажных почв на частоте 6,9 ГГц, которая часто используется для измерения влажности суши. Прототипом этой модели является ранее созданная В.Л. Мироновым и С.В. Фоминым спектроскопическая диэлектрическая модель, которая в настоящее время функционирует на спутнике SMOS. Исключение частотной зависимости позволило создать простую диэлектрическую модель влажной почвы, которая рассчитывает комплексную диэлектрическую проницаемость на частоте 6,9 ГГц в зависимости от влажности, температуры и содержания глинистой фракции в почве.

**Ключевые слова:** 6,9 ГГц, диэлектрическая модель, влажность почвы.

AQUA – совместный проект между Соединёнными Штатами, Японией и Бразилией. Космический аппарат AQUA запущен на орбиту земли в 2002 г. Радиометр AMSR-E (частота 6,9 ГГц), установленный на его борту, направлен на исследование влажности почвы, повышение достоверности прогноза погоды и изменений климата. Во всех алгоритмах восстановления влажности почвы из измерений яркостной температуры Земли используются диэлектрические модели влажной почвы. В космическом аппарате SMOS в настоящее время функционирует недавно разработанная В.Л. Мироновым и С.В. Фоминым [1] физическая диэлектрическая модель влажных почв, которая позволяет рассчитывать комплексную диэлектрическую проницаемость (КДП) почв в зависимости от влажности, гранулометрического состава и температуры почвы в диапазоне частот от 0,3 до 26,5 ГГц. На основе спектроскопической модели [1] в данной работе создана простая диэлектрическая модель, которая позволяет рассчитывать КДП почвы в зависимости от влажности, температуры и гранулометрического состава почв на одной частоте 6,9 ГГц.

**Описание модели.** Влажностные зависимости действительной ( $\epsilon'_s$ ) и мнимой ( $\epsilon''_s$ ) частей КДП почвы были представлены в форме обобщенной рефракционной модели смеси [2]:

$$\epsilon'_s = n_s^2 - \kappa_s^2, \epsilon''_s = 2n_s \kappa_s; \quad (1)$$

$$n_s = \begin{cases} n_d + (n_b - 1)W, & W \leq W_t, \\ n_d + (n_b - 1)W_t + (n_u - 1)(W - W_t), & W \geq W_t; \end{cases} \quad (2)$$

$$\kappa_s = \begin{cases} \kappa_d + \kappa_b W, & W \leq W_t, \\ \kappa_d + \kappa_b W_t + \kappa_u (W - W_t), & W \geq W_t, \end{cases} \quad (3)$$

где  $n_s$ ,  $n_d$ ,  $n_b$ ,  $n_u$  и  $\kappa_s$ ,  $\kappa_d$ ,  $\kappa_b$ ,  $\kappa_u$  – значения коэффициентов преломления и приведенного коэффициента затухания, который понимается как отношение коэффициента затухания к постоянной распространения волны в свободном пространстве. Индексы  $s$  и  $d$ ,  $b$  и  $u$  в (1) – (3) и далее относятся к влажной и сухой почве, связанной и свободной влаге в почве соответственно;  $W_t$  – предельное содержание связанной влаги в почве.

Параметры  $W_t$ ,  $n_d$  и  $\kappa_d$  в выражениях (2), (3) не зависят от температуры, а их зависимости от содержания глинистой фракции были определены в работе [1]:

$$W_t = 0,0286 + 0,307C; \quad n_d = 1,634 - 0,539 C + 0,275C^2; \quad \kappa_d = 0,0395 - 0,04038C. \quad (4)$$

Затем мы использовали модель [1] и рассчитали параметры  $n_b$ ,  $\kappa_b$ ,  $n_u$ ,  $\kappa_u$  на частоте 6,9 ГГц для почв с различным минеральным составом (содержание глинистой фракции в почве принимало значения 0; 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70) и для набора температур (10, 20, 30 и 40 °С). Рассчитанные параметры  $n_b$ ,  $\kappa_b$ ,  $n_u$ ,  $\kappa_u$  были аппроксимированы полиномами второго порядка как функции от содержания глинистой фракции при фиксированных значениях температуры. Коэффициенты в найденных полиномах второго порядка были, в свою очередь, аппроксимированы полиномами перво-

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках базовой программы П. 10.1: Радиофизические методы диагностики окружающей среды СО РАН.

го или второго порядка как функции от температуры. В итоге, параметры  $n_b$ ,  $\kappa_b$ ,  $n_u$ ,  $\kappa_u$  в формулах (1) – (3) были выражены как степенные функции от температуры и содержания глинистой фракции в виде

$$n_b = (7,8 + 0,03T - 3,1 \cdot 10^{-4} T^2) + (-0,06 + 7,35 \cdot 10^{-4} T)C + (1,97 \cdot 10^{-4} - 8,3 \cdot 10^{-6} T)C^2; \quad (5)$$

$$\kappa_b = (2,3 - 0,03 T + 1,7 \cdot 10^{-4} T^2) + (-0,01 - 6,4 \cdot 10^{-5} T + 2,2 \cdot 10^{-6} T^2)C + (9,8 \cdot 10^{-5} + 1,07 \cdot 10^{-6} T - 2,8 \cdot 10^{-8} T^2)C^2; \quad (6)$$

$$n_u = (9,16 + 0,03T - 5,27 \cdot 10^{-4} T^2) + (0,001 + 1,3 \cdot 10^{-6} T + 2,5 \cdot 10^{-7} T^2)C + (-9,5 \cdot 10^{-6} + 2,1 \cdot 10^{-8} T - 2,2 \cdot 10^{-9} T^2)C^2; \quad (7)$$

$$\kappa_u = (2,7 - 0,06 T + 4,9 \cdot 10^{-4} T^2) + (0,003 + 1,63 \cdot 10^{-4} T)C + (-2,7 \cdot 10^{-5} - 1,43 \cdot 10^{-6} T)C^2, \quad (8)$$

где температура  $T$  выражена в градусах Цельсия, содержание глины в почве  $C$  в процентах (согласно классификации Американского департамента сельского хозяйства). Для перевода содержания физической глины в почве по классификации Качинского в процентное содержание глины по американской классификации можно воспользоваться формулой

$$C_{\text{am}} = -0,00576 + 0,5981 C_{\text{rus}}.$$

Совокупность уравнений (1) – (8) представляет собой простую диэлектрическую модель почвы на частоте 6,9 ГГц, позволяющую рассчитывать КДП почвы в зависимости от влажности и температуры.

**Верификация модели.** Вновь созданная модель была протестирована на диэлектрических измерениях различных типов почв на частоте 6,9 ГГц, проведенных в работе [3]. На рис. 1 представлены измеренные и рассчитанные значения действительной  $\epsilon'$  и мнимой  $\epsilon''$  частей КДП в зависимости от объемной влажности для песка и легкой глины. Расчеты проведены как с использованием простой одночастотной модели (1) – (8), так и с помощью более сложной спектроскопической модели [1]. Как видно из рисунков, рассчитанные значения хорошо согласуются между собой и с экспериментальными данными. Для проведения корреляционного анализа были использованы диэлектрические измерения 12 типов почв с содержанием глинистой фракции от 0 до 76 %, при температурах 10, 20, 30 и 40 °С, влажностях от 0 до 40 % на частоте 6,9 ГГц, взятых из работы [3]. Корреляция рассчитанных по моделям значений действительной (а) и мнимой (б) частей КДП с измеренными величинами показана на рис. 2. Для простой одночастотной модели коэффициент корреляции и стандартное отклонение для действительной части КДП составляют:  $R_{\epsilon'} = 0,99$  и  $SD_{\epsilon'} = 0,89$ , а для мнимой части –  $R_{\epsilon''} = 0,98$  и  $SD_{\epsilon''} = 0,37$ . При этом уравнения линейной регрессии для  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  имеют вид  $\epsilon'_{\text{mod}} = -0,1 + 1,06\epsilon'_{\text{exp}}$  и  $\epsilon''_{\text{mod}} = 0,18 + 0,88\epsilon''_{\text{exp}}$  соответственно. Эти статистические оценки совпадают с теми, которые соответствуют расчетам с помощью более сложной модели [1].

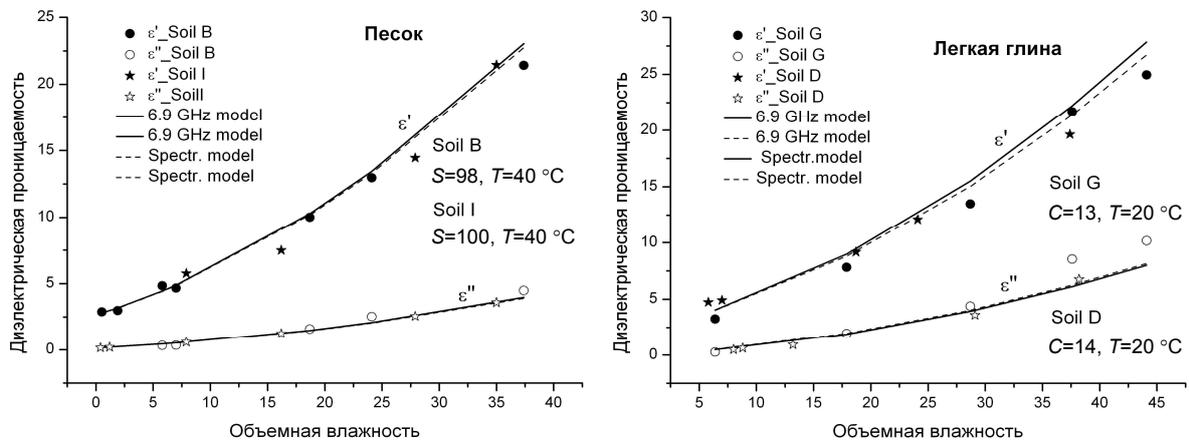


Рис. 1. Экспериментальные и расчетные зависимости действительной  $\epsilon'$  и мнимой  $\epsilon''$  частей комплексной диэлектрической проницаемости влажных почв с различным содержанием песка  $S$  и глины  $C$  при различных температурах  $T$

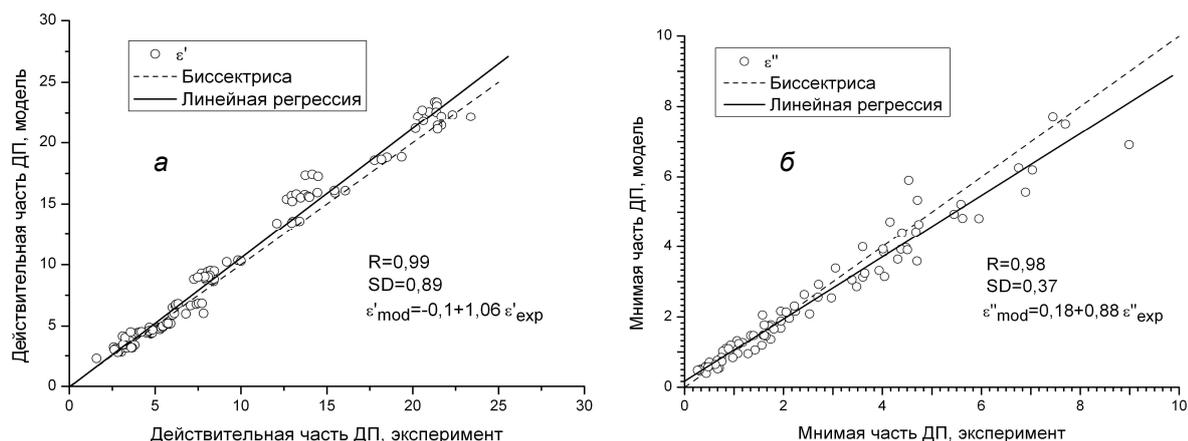


Рис. 2. Корреляция между измеренными и рассчитанными по модели на частоте 6,9 ГГц значениями: *a* – действительной части и *б* – мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) совокупности почв из [4]

Создана простая экспериментальная диэлектрическая модель влажных почв на частоте 6,9 ГГц. Модель наилучшим образом соответствует минеральным почвам, содержащим смектитовые (разбухающие) глины. Модель имеет такую же точность прогнозирования КДП почв, как и более сложная спектроскопическая модель [1]. Ранее в [4] было показано, что ошибка восстановления влажности почвы из измерений яркостной температуры Земли, возникающая за счет погрешности данной диэлектрической модели, составляет  $\pm 0,02$ – $0,06$  см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mironov V.L. and Fomin S.V. // Proc. PIERS. – 2009. – P. 938–942.
2. Mironov V.L., Dobson M.C., Kaupp V.H., et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2004. – V. 42. – No. 4. – P. 773–785.
3. Curtis J.O., Weiss C.A., Jr., and Everett J.B. // Tech. Report EL-95-34. – Dec. 1995.
4. Mironov V.L., Kosolapova L.G., and Demontoux F. // PIERS Proceedings. – 2011. – P. 709–711.

\*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, г. Красноярск, Россия

Поступила в редакцию 15.07.13.

\*\*Сибирский государственный аэрокосмический университет

им. акад. М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия

E-mail: rsdvk@ksc.krasn.ru

Мионов Валерий Леонидович, д.ф.-м.н., чл.-кор. РАН, зав. лабораторией;

Косолапова Людмила Георгиевна, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;

Рудакова Екатерина Александровна, магистр.

V.L. MIRONOV, L.G. KOSOLAPOVA, E.A. RUDAKOVA

### SOIL MOISTURE DIELECTRIC MODEL FOR AQUA SPACECRAFT RADIOMETER (AMSR-E)

It is proposed soil moisture dielectric model at a frequency of 6.9 GHz, which is often used to measure the humidity of the land. The prototype of this model is the previously created by V.L. Mironov and S.V. Fomin spectroscopic dielectric model, which is now operating on the SMOS satellite. Exclusion of the frequency dependence allowed us to create a simple model of wet soil, which calculates the complex dielectric constant at a frequency of 6.9 GHz, depending on the moisture, temperature, and the content of the clay fraction in the soil.

**Keywords:** 6.9 GHz, the dielectric model, soil moisture.