

УДК 621.371.3/205.2

С.В. ФОМИН, В.Л. МИРОНОВ, И.В. САВИН, Л.Г. КОСОЛАПОВА

**ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТАЛЫХ И МЕРЗЛЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЧВ
НА ЧАСТОТЕ 1.4 ГГц***

Проведены диэлектрические измерения пяти образцов органических почв с различным содержанием органического вещества в диапазоне температур от -30 до 25 °С в широком диапазоне частот от 0.45 до 16 ГГц. На их основе создана простая одночастотная диэлектрическая модель талых и мерзлых органических почв, позволяющая рассчитывать комплексную диэлектрическую проницаемость талых и мерзлых органических почв в зависимости от влажности, температуры и содержания органического вещества на частоте 1.4 ГГц.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, талые и мерзлые органические почвы, одночастотная диэлектрическая модель.

Введение

Дистанционное зондирование земной поверхности из космоса в настоящее время становится эффективным инструментом мониторинга влажности и температуры почвы. Ключевым элементом алгоритмов восстановления влажности и температуры почв из данных дистанционного зондирования являются диэлектрические модели почв. Ранее авторами [1] была создана диэлектрическая модель талых минеральных почв, которая в настоящее время включена в алгоритмы восстановления влажности космических аппаратов SMOS (ESA) [2] и SMAP (NASA) наряду с диэлектрической моделью Добсона [3]. Позднее была создана одночастотная диэлектрическая модель мерзлых минеральных почв [4]. Эти две модели в совокупности позволяют рассчитывать диэлектрическую проницаемость талых и мерзлых минеральных почв в зависимости от влажности, температуры и типа почвы на частоте 1.4 ГГц. Тип минеральных почв характеризуется их гранулометрическим составом, где основное влияние на диэлектрические свойства влажных почв оказывает содержание глинистой фракции в почве. Почвы, содержащие более 30 % органического вещества по весу, классифицируются как органические и их диэлектрические свойства существенно отличаются от диэлектрических свойств минеральных почв. Ранее мы разрабатывали спектроскопические и одночастотные модели индивидуальных органических почв. В данной работе представлена общая одночастотная диэлектрическая модель талых и мерзлых органических почв. Основным параметром, характеризующим органические почвы, будет процентное весовое содержание органического вещества в почве.

Диэлектрическая модель

Для разработки диэлектрической модели были использованы четыре базовых почвенных образца, три из которых собраны на полуострове Ямал (Россия) с содержанием органики 35, 50 и 61 % соответственно и один образец с содержанием органики 80 % взят с Аляски. Также для независимой оценки точности модели был использован образец почвы с содержанием органики 38.5 %, взятый в районе г. Норильска. Основным отличием рефракционной модели органической почвы от рефракционной модели минеральной почвы является тот факт, что в органической почве диэлектрические измерения позволяют идентифицировать три компонента воды в почве: связанную воду, переходную и свободную воду (лед), в то время как в минеральных почвах мы можем с уверенностью различить только два типа почвенной влаги: связанную и свободную (лед).

Экспериментальные данные будем анализировать в виде приведенного комплексного показателя преломления (КПП) почвы. КПП почвы, $n_s^* = n_s + ik_s$, с комплексной диэлектрической проницаемостью (КДП) почвы, $\epsilon_s^* = \epsilon_s' + i\epsilon_s''$, связан следующими соотношениями:

$$\epsilon_s' = n_s^2 - \kappa_s^2, \quad \epsilon_s'' = 2n_s \kappa_s. \quad (1)$$

Рефракционную модель для приведенного КПП почвы запишем в виде

* Работа выполнена в рамках Программы П.12.1. «базовых» фундаментальных исследований СО РАН, поддержана грантами РФФИ № 16-05-00572, 16-45-242162.

$$\frac{n_s - 1}{\rho_d} = \begin{cases} \frac{n_m - 1}{\rho_m} + \frac{n_b - 1}{\rho_b} M_g, & 0 \leq M_g \leq M_{g1}, \\ \frac{n_m - 1}{\rho_m} + \frac{n_b - 1}{\rho_b} M_{g1} + \frac{n_t - 1}{\rho_t} (M_g - M_{g1}), & M_{g1} \leq M_g \leq M_{g2}, \\ \frac{n_m - 1}{\rho_m} + \frac{n_b - 1}{\rho_b} M_{g1} + \frac{n_t - 1}{\rho_t} (M_{g2} - M_{g1}) + \frac{n_{i/u} - 1}{\rho_{i/u}} (M_g - M_{g2}), & M_g \geq M_{g2}; \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{\kappa_s}{\rho_d} = \begin{cases} \frac{\kappa_m}{\rho_m} + \frac{\kappa_b}{\rho_b} M_g, & 0 \leq M_g \leq M_{g1}, \\ \frac{\kappa_m}{\rho_m} + \frac{\kappa_b}{\rho_b} M_{g1} + \frac{\kappa_t}{\rho_t} (M_g - M_{g1}), & M_{g1} \leq M_g \leq M_{g2}, \\ \frac{\kappa_m}{\rho_m} + \frac{\kappa_b}{\rho_b} M_{g1} + \frac{\kappa_t}{\rho_t} (M_{g2} - M_{g1}) + \frac{\kappa_{i/u}}{\rho_{i/u}} (M_g - M_{g2}), & M_g \geq M_{g2}, \end{cases} \quad (3)$$

где M_g – гравиметрическая влажность почвы; ρ_d – плотность сухого сложения почвы. Индексы s, d, m, b, t, l и i обозначают влажную почву, сухую почву, органо-минеральную компоненту почвы, связанную, переходную, свободную воду и лед соответственно; M_{g1} и M_{g2} – величины максимально допустимого количества связанной воды и общего максимально допустимого количества связанной и переходной воды. Используя формулы (2), (3), с помощью регрессионного анализа измеренных влажностных зависимостей приведенного КПП талой и мерзлой почвы при фиксированной температуре можно определить значения параметров $(n_q - 1)/\rho$ и κ_q/ρ , соответствующих органо-минеральной компоненте почвы ($q = m$) и всем типам воды в почве ($q = b, t, l, i$), а также значения для максимально допустимого количества связанной воды (M_{g1}) и общего максимально допустимого количества связанной и переходной (M_{g2}) воды. Параметры $M_{g1}, M_{g2}, (n_m - 1)/\rho_m, (n_b - 1)/\rho_b, (n_t - 1)/\rho_t, (n_l, i - 1)/\rho_{l, i}, \kappa_m/\rho_m, \kappa_b/\rho_b, \kappa_t/\rho_t$ и $\kappa_{l, i}/\rho_{l, i}$ были определены при температурах 0, 5, 10, 15, 20, 25 °C и -30, -25, -20, -15, -10, -5, -3, -2, -1 °C в случае талых и мерзлых почв соответственно (символы на рис. 1). После этого полученные значения параметров были аппроксимированы как функции температуры полиномами первой и второй степени (линии на рис. 1), а M_{g2} для мерзлых почв – экспоненциальной функцией. При этом оказалось, что тип почвы, а именно содержание органического вещества в почве, существенным образом влияет лишь на количество связанной и переходной воды в почве.

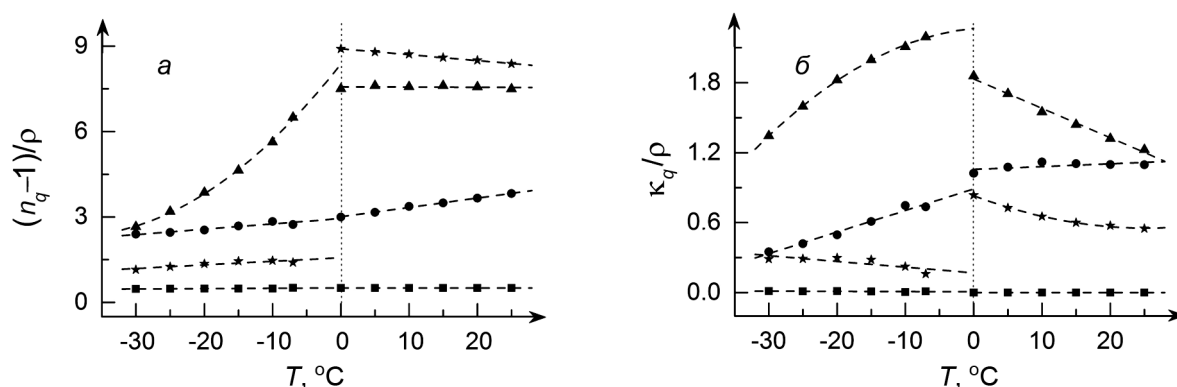


Рис. 1. Температурные зависимости параметров модели: а – $(n-1)/\rho$ и б – κ/ρ для почвы сухого сложения (■), связанной (●), переходной (▲) и свободной/льда (★) почвенной влаги

Параметры модели, определенные путем регрессионного анализа данных измерений КПП четырех органических почв с содержанием органического вещества от 35 до 80 % для талых ($0 \geq T \geq 25$ °C) и мерзлых почв ($-30 \geq T \geq -1$ °C), представлены в таблице.

Параметры модели как функции температуры (T , °C) и содержания органического вещества (O %) в почве

Мерзлые почвы	Талые почвы
$M_{g1} = 0.114 + 9.516 \cdot 10^{-4} \cdot O + 1.23 \cdot 10^{-3} \cdot T$	$M_{g1} = 0.118 + 8.695 \cdot 10^{-4} \cdot O - 9.6 \cdot 10^{-4} \cdot T$
$M_{g2} = 0.205 + 1.43 \cdot 10^{-3} \cdot O + 0.187 \cdot \exp(T/6.6)$	$M_{g2} = 0.382 + 9.208 \cdot 10^{-4} \cdot O - 1.91 \cdot 10^{-3} \cdot T$
$(n_m - 1) / \rho_m = 0.507 + 1.24 \cdot 10^{-3} \cdot T$	$(n_m - 1) / \rho_m = 0.504 + 8.75 \cdot 10^{-7} \cdot T$
$(n_b - 1) / \rho_b = 2.941 + 0.0188 \cdot T$	$(n_b - 1) / \rho_b = 3.010 + 0.0328 \cdot T$
$(n_f - 1) / \rho_f = 8.371 + 0.304 \cdot T + 3.81 \cdot 10^{-3} \cdot T^2$	$(n_f - 1) / \rho_f = 7.572 - 8.33 \cdot 10^{-4} \cdot T$
$(n_i - 1) / \rho_i = 1.567 + 0.01263 \cdot T$	$(n_u - 1) / \rho_i = 8.906 - 0.0207 \cdot T$
$\kappa_m / \rho_m = 7.65 \cdot 10^{-3} - 1.81 \cdot 10^{-4} \cdot T$	$\kappa_m / \rho_m = 0$
$\kappa_b / \rho_b = 0.89 + 0.0185 \cdot T$	$\kappa_b / \rho_b = 1.057 + 2.39 \cdot 10^{-3} \cdot T$
$\kappa_f / \rho_f = 2.263 + 5.65 \cdot 10^{-3} \cdot T - 8.32 \cdot 10^{-4} \cdot T^2$	$\kappa_f / \rho_f = 1.831 - 0.0252 \cdot T$
$\kappa_i / \rho_i = 0.169 - 4.93 \cdot 10^{-3} \cdot T$	$\kappa_u / \rho_u = 0.832 - 2.21 \cdot 10^{-2} \cdot T + 4.37 \cdot 10^{-4} \cdot T^2$

Формулы (1) – (3) с параметрами, определенными в таблице, представляют собой общую модель талых и мерзлых органических почв.

Верификация модели

На рис. 2 представлены результаты сравнения измеренных и рассчитанных значений комплексной диэлектрической проницаемости для независимой почвы в зависимости от температуры при трех фиксированных объемных влажностях (W). Диэлектрическую проницаемость почвы обычно представляют в виде зависимости от объемной влажности. Объемная влажность почвы W с гравиметрической влажностью M_g связана следующей зависимостью: $W = M_g \cdot \rho_d$.

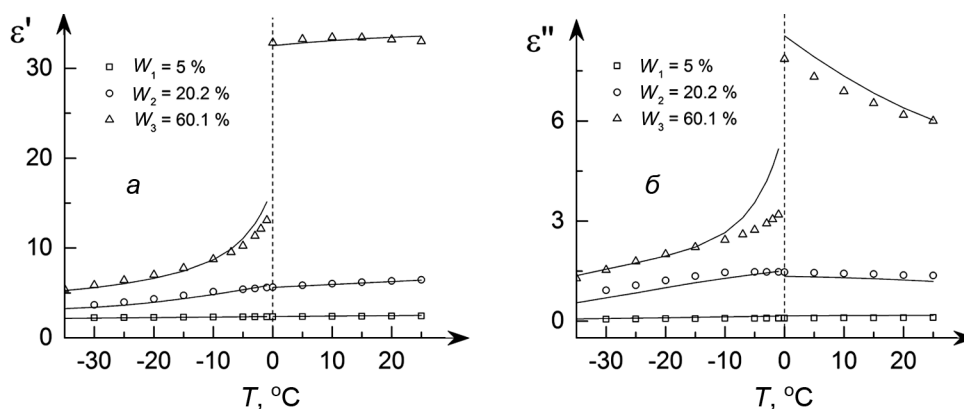


Рис. 2. График зависимости ϵ' (а) и ϵ'' (б) от температуры почвы T для независимой почвы при объемных влажностях $W = 5, 20.2$ и 60.1 %. Точками обозначены данные измерений, сплошной линией – модель

Как видно из рис. 2, модель довольно хорошо описывает экспериментальные данные даже для независимой почвы, т.е. для почвы, измеренные значения которой не использовались для построения модели. На рис. 3 показана ошибка расчетных значений КДП почв относительно измеренных значений: а, б – для базовых почв (которые использовались для построения модели); в, г – для одной независимой почвы. Отклонение от биссектрисы отражает величину отклонения расчетного значения КДП почвы от измеренного. Количественная оценка точности модели производится через коэффициент детерминации (R^2) и среднеквадратическую ошибку (СКО), которые для базовых почв равны: $R^2_{\epsilon'} = 0.996$, $R^2_{\epsilon''} = 0.955$, СКО $\epsilon' = 0.37$, СКО $\epsilon'' = 0.29$, а для независимой почвы равны: $R^2_{\epsilon'} = 0.994$, $R^2_{\epsilon''} = 0.931$, СКО $\epsilon' = 0.47$, СКО $\epsilon'' = 0.36$.

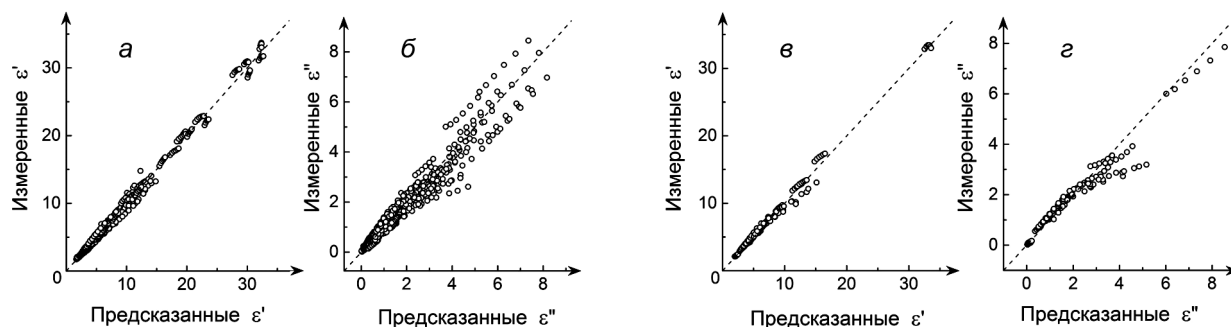


Рис. 3. Корреляция предсказанных и измеренных значений ϵ' и ϵ'' для образцов 1–4, участвовавших в разработке модели (а, б) и для независимого образца 5 (в, з). Биссектриса изображена пунктирной линией

Заключение

Впервые создана общая одночастотная диэлектрическая модель талых и мерзлых органических почв, которая позволяет рассчитывать КДП органических почв (с различным содержанием органического вещества) в зависимости от влажности, в диапазоне температур от -30 до $+25$ °С на частоте 1.4 ГГц. Для того чтобы рассчитать КДП произвольной органической почвы при определенной влажности и температуре, нужно знать ее плотность сухого сложения и содержание органического вещества в процентах по весу. На практике те базы данных, которые содержат сведения о гранулометрическом составе почв, содержат также сведения о содержании органического вещества в почве и об их плотности сухого сложения (например, [6]). Данная модель может быть использована для определения количества незамерзшей воды в мерзлых органических почвах, восстановления влажности и температуры органических почв из данных дистанционного зондирования радиометрическими и радарными методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mironov V.L. and Fomin S.V // PERS Online. – 2009. – V. 5. – No. 5. – P. 411–415.
2. Mialon A., Richaume P., Leroux D., et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2015. – V. 53. – No. 6. – P. 3084–3094.
3. Dobson M.C., Ulaby F.T., Hallikainen M.T., and El-Rayes M.A. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1985. – V. 23. – No. 1. – P. 35–46.
4. Mironov V.L., Kerr Y., Wigneron J.-P., et al. // IEEE Geosc. Remote Sens. Lett. – 2013. – V. 10. – No. 3. – P. 419–423.
5. Mironov V.L., Kosolapova L.G., Lukin Y.I., et al. // PERS. – 2016. – P. 2518–2522.
6. FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2012. Harmonized World Soil Database (version 1.2). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.

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

Поступила в редакцию 12.10.17.

Фомин Сергей Викторович, мл. науч. сотр., e-mail: rsd@ksc.krasn.ru;

Миронов Валерий Леонидович, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН;

Савин Игорь Викторович, мл. науч. сотр.;

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

S.V. FOMIN, V.L. MIRONOV, I.V. SAVIN, L.G. KOSOLAPOVA

A DIELECTRIC MODEL OF THAWED AND FROZEN ORGANIC SOILS AT 1.4 GHz

Dielectric measurements were conducted for five organic soil samples with different contents of organic matter in the temperature range from -30 to 25 °C over a wide frequency range from 0.45 to 16 GHz. On this basis, a simple single-frequency dielectric model for thawed and frozen organic soils was created. The model allows to calculate the complex dielectric constant of thawed and frozen organic soils depending on the moisture, temperature, and organic matter content at a frequency of 1.4 GHz.

Keywords: dielectric constant, thawed and frozen organic soils, single-frequency dielectric model.

REFERENCES

1. Mironov V.L. and Fomin S.V. *PIERS Online*, 2009, vol. 5, no. 5, pp. 411–415.
2. Mialon A., Richaume P., Leroux D., Bircher S., Bitar A.Al., Pellarin T., Wigneron J.-P., and Kerr Ya.H. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2015, vol. 53, no. 6, pp. 3084–3094.
3. Dobson M.C., Ulaby F.T., Hallikainen M.T., and El-Rayes M.A. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1985, vol. 23, no. 1, pp. 35–46.
4. Mironov V.L., Kerr Y., Wigneron J.-P., Kosolapova L.G., and Demontoux F. *IEEE Geosc. Remote Sens. Letters*, 2013, vol. 10, no. 3, pp. 419–423.
5. Mironov V.L., Kosolapova L.G., Lukin Y.I., Karavaysky A.Y., and Molostov I.P. *PIERS*. 2016, pp. 2518–2522.
6. FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2012. Harmonized World Soil Database (version 1.2). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.

Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

Fomin Sergey Viktorovich, Junior Researcher, e-mail: rsd@ksc.krasn.ru;
Mironov Valery Leonidovich, Dr.Sc., Corresponding Member RAS;
Savin Igor Viktorovich, Junior Researcher;
Kosolapova Lyudmila Georgievna, Ph.D., Senior Researcher.