

Визуально заметно, что на частоте около 4 ГГц значение Δn тем больше, чем выше в почве содержание глины и гумуса. Также заметно, что в почвах, содержащих гумус, при понижении частоты значение Δn возрастает медленнее. Это отражается в следующих регрессионных уравнениях связи значений Δn с содержанием глины C и гумуса H .

На частоте 3,75 ГГц $\Delta n = 1,36 \cdot C + 3,57 \cdot H$ при квадрате коэффициента корреляции 0,945.

На частоте 0,25 ГГц $\Delta n = 2,71 \cdot C - 3,64 \cdot H$ при квадрате коэффициента корреляции 0,80.

Если в первом уравнении знак коэффициента регрессии при H положителен, то во втором – отрицателен.

Таким образом, в результате проведенного исследования показано, что показатель преломления переходной воды зависит от частоты и в среднеглинистых почвах резко возрастает на частотах ниже 100 МГц. На частотах 10–100 МГц наличие глины приводит к возрастанию диэлектрической проницаемости почвы, а наличие гумуса – к ее уменьшению.

Библиографические ссылки

1. Бобров П. П., Галеев О. В. Динамика радиояростной температуры почв с различным содержанием гумуса // Исследование Земли из космоса. 2001. № 4. С. 74–80.
2. Bobrov P. P., Galeyev O. W. Observed Effects of Soil Humus & Salt Contents on the Microwave Emissivity of Soils // Proceedings of the 2001 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Sydney, NSW. 2001. P. 2085–2087.
3. Спектроскопическая модель диэлектрической проницаемости почв, использующая стандартизованные агрофизические показатели / П. П. Бобров, В. Л. Миронов, О. А. Ивченко, В. Н. Красноухова // Исследование Земли из космоса. 2008. № 1. С. 15–23.
4. Mironov V. L., Kosolapova L. G., Fomin S. V. Physically and Mineralogically Based Spectroscopic Di-

electric Model for Moist Soils // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2009. Vol. 47, № 7. Part 1. P. 2059–2070.

5. Бобров П. П., Кондратьева О. В., Репин А. В. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости образца в одной ячейке от десятков герц до единиц гигагерц // Известия Вузов. Физика. 2012. № 8/3. С. 23–26.

6. Data Processing Technique for Deriving Soil Water Spectroscopic Parameters in Microwave / V. L. Mironov, P. P. Bobrov, L. G. Kosolapova // Proc. of the 2006 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symp. 2006. Vol. 6. P. 2957–2961.

References

1. Bobrov P. P., Galeyev O. V. Issledovaniye Zemli iz kosmosa. 2001, no. 4, pp. 74–80.
2. Bobrov P. P., Galeyev O. W. Observed Effects of Soil Humus & Salt Contents on the Microwave Emissivity of Soils. Proceedings of the 2001 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium Sydney, NSW. 2001, pp. 2085–2087.
3. Bobrov P. P., Mironov V. L., Ivchenko O. A., Krasnoukhova V. N. Issledovaniye Zemli iz kosmosa. 2008, no. 1, pp. 15–23.
4. Mironov V. L., Kosolapova L. G., Fomin S. V. Physically and Mineralogically Based Spectroscopic Dielectric Model for Moist Soils. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2009. vol. 47, no. 7, Part 1, pp. 2059–2070.
5. Bobrov P. P., Kondrat'yeva O. V., Repin A. V. Izvestiya Vuzov. Fizika. 2012, no. 8/3, pp. 23–26.
6. Mironov V. L., Bobrov P. P., Kosolapova L. G., Mandrygina V. N., Fomin S. V. Data Processing Technique for Deriving Soil Water Spectroscopic Parameters in Microwave. Proceedings of the 2006 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Denver, USA. 2006, vol. 6, pp. 2957–2961.

© Бобров П. П., Кондратьева О. В., Мустакова М. М., 2013

УДК 621.371.3/205.2

ПРИМЕНИМОСТЬ КОНЦЕПЦИИ НЕЗАМЕРЗШЕЙ ВОДЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МЕРЗЛЫХ ПОЧВ

В. Л. Миронов^{1,2}, А. Ю. Каравайский^{1,2}, Ю. И. Лукин²

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

²Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/38. E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru

На основе измерений спектров комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) влажной почвы показано, что применение модели Добсона–Жанга в мерзлой почве дает погрешности до 100 %. Показано, что такая существенная ошибка возникает за счет присутствия в почве различных типов незамерзшей воды.

Ключевые слова: комплексная диэлектрическая проницаемость.

THE APPLICABILITY OF UNFROZEN WATER CONCEPTION FOR MODELLING OF DIELECTRIC PERMITTIVITY OF FROZEN SOILS

V. L. Mironov^{1,2}, A. Yu. Karawaysky^{1,2}, Yu. I. Lukin²

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia

²Institute of Physics named after L. V. Kirenskiy of the Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
50/38 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru

From measurements of the spectra of the complex permittivity of the moist soil it is shown that the application of the concept of freezing of unfrozen water in the frozen ground gives the error of 100 % for the calculation of the index. The authors point out that such a considerable error appears because of the presence of different types of unfrozen water in the soil.

Keywords: permittivity, complex dielectric constant.

Проблема создания диэлектрической модели для мерзлых почв актуальна в связи с развитием работ по дистанционному зондированию. При этом, в ряде работ, где учитываются характеристики мерзлых почв, используется модель Добсона [1], развитая Жангом [2] для диэлектрической проницаемости (ДП) мерзлых почв. Тем не менее, точность описания модели в полной мере не изучена.

Для использования модели Добсона [1] при отрицательных температура Жанг преобразовал формулу к виду

$$\varepsilon_m^{\alpha} = 1 + (\rho_b / \rho_s)(\varepsilon_s^{\alpha} - 1) + m_{vu}^{\beta} \varepsilon_{fw}^{\alpha} - m_{vi} + m_{vi} \varepsilon_i^{\alpha}, \quad (1)$$

$$t < t_f C$$

$$\varepsilon_m^{\alpha} = m_{vu}^{\beta} \varepsilon_{fw}^{\alpha}, \quad t < t_f C \quad (2)$$

где m_{vu} – объемная масса незамерзшей воды; m_{vi} – объемная масса льда, ε_i – ДП льда.

В формуле (1) учитывается количество незамерзшей воды m_{vu} , которое выражается как

$$m_{vu} = A |t|^{-B} \rho_b / \rho_w \quad (3)$$

где ρ_w – плотность воды. Параметры A и B в формуле (3) определяются структурой почвы.

Таким образом, для того чтобы вычислить КДП в соответствии с данной модели на любой частоте, при любой влажности и температуре достаточно знать минералогический состав почвы, что является неоспоримым преимуществом модели. Однако модель не учитывает диэлектрическую проницаемость разных типов воды в почве, а также изменение соотношения между этими типами воды в процессе замораживания или оттаивания. Кроме того, для отрицательных температур предлагается использовать формулы для расчета спектроскопических параметров незамерзшей воды, полученные на основе измерений при положительных температурах, что физически не обосновано.

Экспериментальные результаты. Ранее, в работе [3], проводились расчеты КДП как для талых, так и для мерзлых почв, было определено количество незамерзшей воды различных типов. Для определения комплексной диэлектрической проницаемости применялась методика, описанная в [4]. Данная методика дает погрешность наших измерений порядка 3 %.

В качестве первой почвы для тестирования диэлектрической модели Жанга–Добсона (Ж–Д) был выбран образец бентонитовой глины. Выбор был сделан главным образом в силу того, что для него существует рефракционная модель, где учитываются присутствие связанной, переходной и свободной воды, а также диэлектрические свойства каждого типа воды [3].

Корреляция между измеренными значениями КДП и рассчитанными в соответствии с моделью Ж–Д для образцов бентонита в диапазоне температур от –10 до –30 °С приведена на рис. 1. Очевидно, что для ε' модель Ж–Д в целом дает завышенные значения, тогда как для ε'' наблюдается существенное занижение прогнозируемых значений. Интересно, отметить, что модель Ж–Д лучше описывает экспериментальные значения ε' образцов с большей влажностью, тогда как для ε'' наблюдается наибольшая ошибка.

Корреляция между измеренными значениями КДП и рассчитанными в соответствии с моделью ОРДМС для тех же образцов бентонита показана на рис. 2. Очевидно, что подход, примененный в ОРДМС, предполагающий описание диэлектрических свойств каждого типа воды в почве, позволяет разработать более адекватную модель для описания КДП влажных почв при отрицательных температурах.

По мимо бентонитовой глины, для проверки модели Ж–Д в области отрицательных температур, была рассмотрена почва «Чернозем выщелоченный слабогумусный сверхмощный среднеглинистый на лессовидных глинах». Это необходимо было чтобы сравнить, как модель Ж–Д будет описывать почвы с различным гранулометрическим составом. Измерения проводились в диапазоне температур от –30 до 0 °С для процессов заморзания и оттаивания, так как оказалось, что момент заморзания и оттаивания происходит при различных температурах.

Если мы рассмотрим соотношение между модельными данными КДП и измеренными (рис. 3) для процесса заморзания, то мы увидим, что для более высоких температур имеется неплохое соответствие между измеренными данными и смоделированными, но в остальных случаях модель Ж–Д завышает значения для ε' . Для ε'' ситуация является такой же критичной, мы видим занижение прогнозируемых значений и погрешность достигает 100 %.

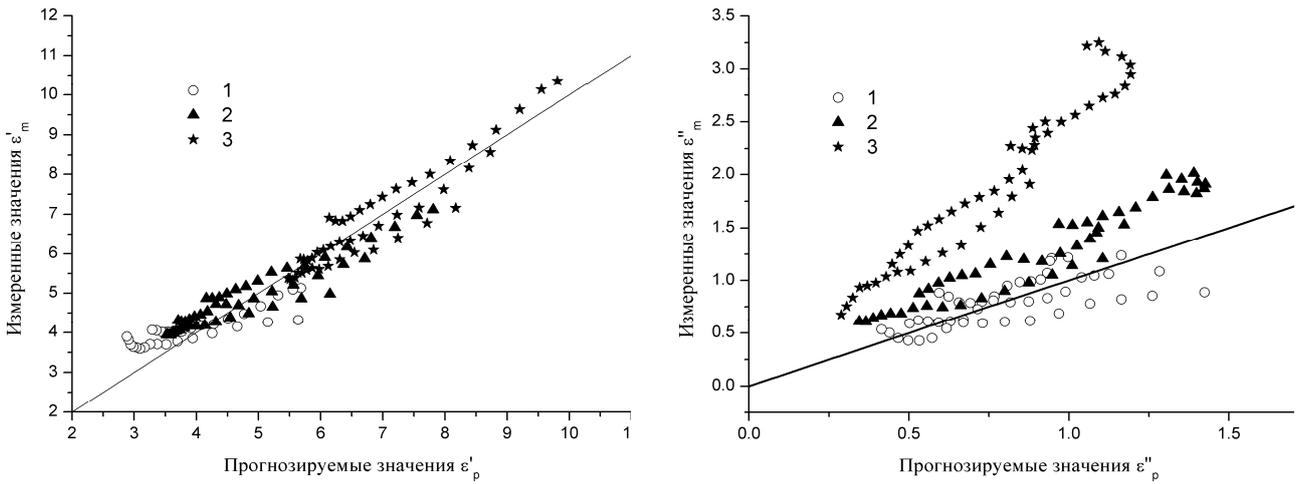


Рис. 1. Корреляция между данными КДП модели Жанга и измеренными для образцов бентонитовой глины при температурах в диапазоне от -10 до -30 °С с влажностями: $1 - m = 0,13$ м/м; $2 - m = 0,29$ м/м; $3 - m = 0,64$ м/м. Сплошной линией изображена биссектриса

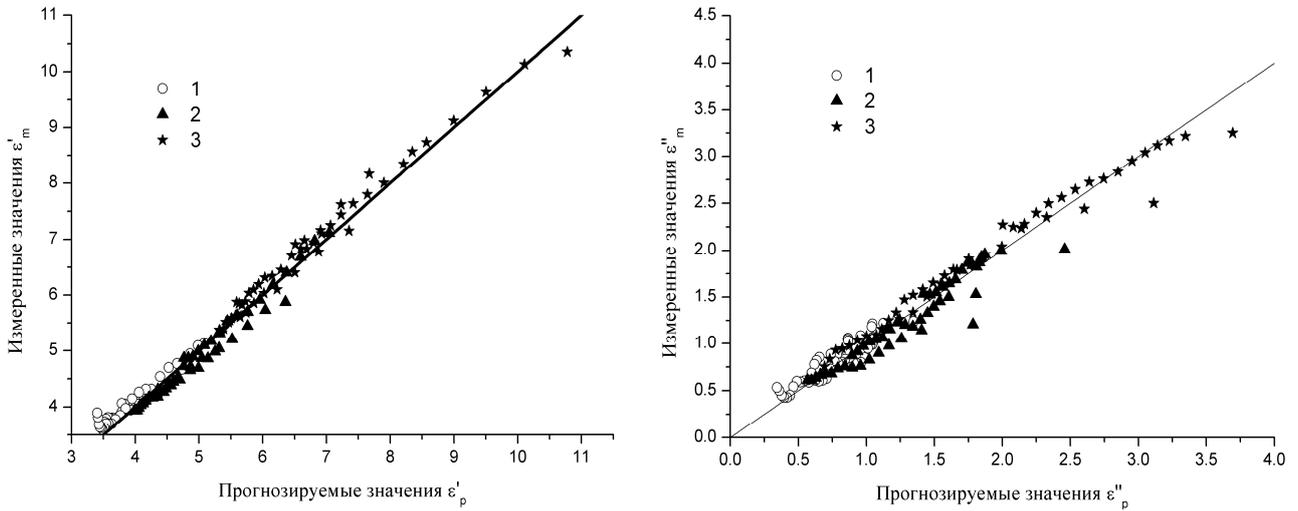


Рис. 2. Корреляция между модельными данными ОРДМС КДП и измеренными для образцов бентонитовой глины при температурах в диапазоне от -10 до -30 °С с влажностями: $1 - m = 0,64$ м/м; $2 - m = 0,29$ м/м; $3 - m = 0,13$ м/м. Сплошной линией изображена биссектриса

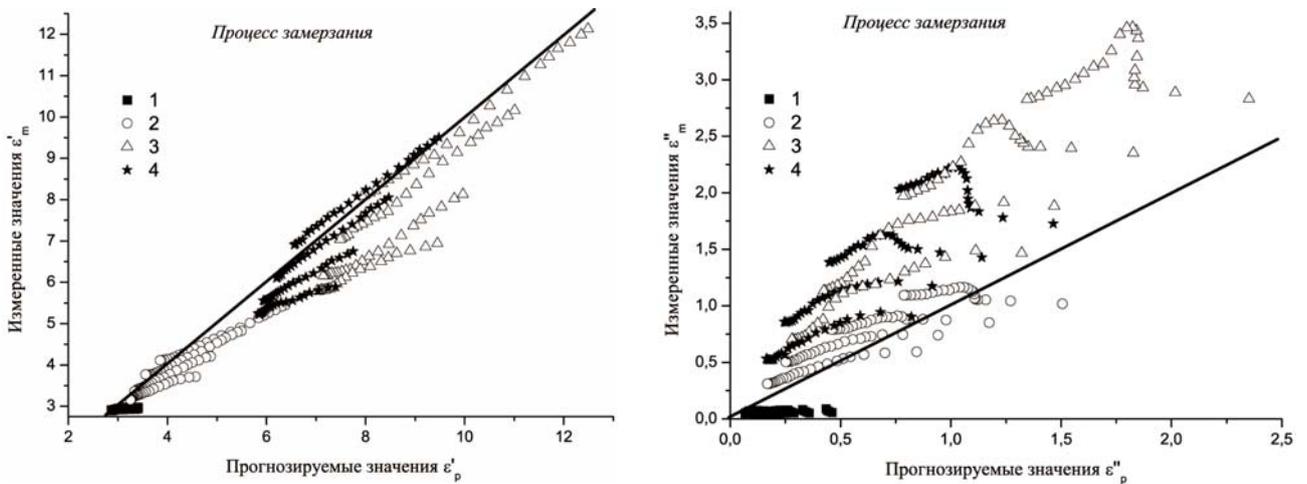


Рис. 3. Корреляция между модельными данными КДП и измеренными для процесса замерзания: $1 - m_g = 0,021$ г/г; $2 - m_g = 0,121$ г/г; $3 - m_g = 0,264$ г/г; $4 - m_g = 0,429$ г/г. Сплошная линия – биссектриса

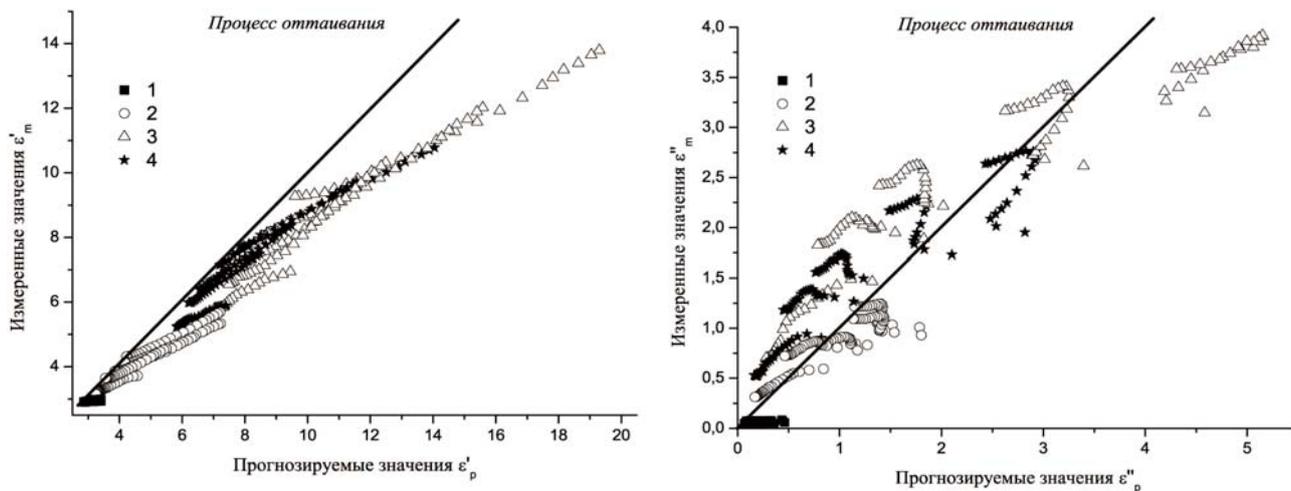


Рис. 4. Корреляция между модельными данными КДП и измеренными для процесса оттаивания:
 1 – $m_g = 0,021$ г/г; 2 – $m_g = 0,121$ г/г; 3 – $m_g = 0,264$ г/г;
 4 – $m_g = 0,429$ г/г. Сплошная линия – биссектриса

Во время процесса оттаивания (рис. 4) ситуация немного иная. Для действительной части КДП значительное отклонение от биссектрисы с повышением температуры образца. Данное отклонение показывает что с повышением температуры и влажности, а также с уменьшением частоты погрешность модельных данных увеличивается. Это может происходить из-за того, что во время оттаивания количество незамерзшей воды остается постоянным до температуры $T = 0$ °С. Концепция незамерзшей воды, во время оттаивания, немного лучше работает для мнимой части КДП. Здесь мы видим также большую погрешность, но при этом ближе к биссектрисе.

Таким образом, сравнивая концепцию незамерзшей воды с измеренными данными бентонитовой глины и среднеглинистого чернозема можно сказать, что концепция Ж-Д описывает реальные измерения с большой погрешностью. Максимальная погрешность для действительной КДП во время процесса заморозки достигает 28 %, а для мнимой части КДП 100 %. Во время процесса оттаивания 42 и 70 % для действительной и мнимой КДП соответственно. Сравнение модели Ж-Д и ОРДМС на примере бентонитовой глины показало, что большие погрешности концепции незамерзшей воды могут быть связаны с тем, что в почве присутствуют различные типы воды и ДП каждого типа воды отличается от ДП воды в незамерзшей почве. Кроме того, модель Ж-Д не учитывает то, что фазовые переходы различных типов воды в почве могут быть разными.

Для постройки модели можно воспользоваться моделями предложенными в [3]. Наши дальнейшие исследования будут направлены на изучение почв в области отрицательных температур и на создание адекватных, для описания мерзлых почв, моделей.

Библиографический список

1. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil. Part II: Dielectric Mixing Models / M. C. Dobson, F. T. Ulaby, M. T. Hallikainen, El- M. A. Rayes IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1985. Vol. 23, № 1. P. 35–45.
2. The Estimation of Dielectric Constant of Frozen Soil-water Mixture at Microwave Bands[J] / L. X. Zhang, J. C. Shi, Z. J. Zhang, K. G. Zhao // Proc. of IGRASS'03. Toulouse, France, 2003.
3. Mironov V. L., Lukin Yu. I. A Physical Model of Dielectric Spectra of Thawed and Frozen Bentonitic Clay within the Frequency Range from 1 to 15 GHz // Russian Physics J. 2011. Vol. 53, № 9. P. 956–963.
4. Komarov S. A., Mironov V. L., Lukin Yu. I. Spectral investigations of complex dielectric permittivity of moist soils // Russian Physics J. 2006. Vol. 49, № 9. P. 934–939.

References

1. Dobson M. C., Ulaby F. T., Hallikainen M. T., El-Rayes M. A. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1985. Vol. 23. No. 1. P. 35–45.
2. Zhang L. X., Shi J. C., Zhang Z. J., Zhao K. G. The Estimation of Dielectric Constant of Frozen Soil-water Mixture at Microwave Bands[J], In Proceedings of IGRASS'03, Toulouse, France, 2003.
3. Mironov V. L., and Lukin Yu. I. “A Physical Model of Dielectric Spectra of Thawed and Frozen Bentonitic Clay within the Frequency Range from 1 to 15 GHz”. Russian Physics Journal, Vol. 53, No. 9, pp. 956–963, 2011.
4. Komarov S. A., Mironov V. L., Lukin Yu. I. “Spectral investigations of complex dielectric permittivity of moist soils Russian Physics Journal”. 2006. Vol. 49. № 9. Pp. 934–939.