

4. Mironov V. L., Bobrov P. P., Fomin S. V. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2013, vol. 10, no. 3. pp. 603–606.

5. Belyaeva T. A., Bobrov P. P., Ivchenko O. A., Mandrygina V. N. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa: Fizicheskiye osnovy, metody i tekhnologii monitoringa okruzhayushchey sredy, potentsial'no opasnykh yavleniy i ob'yektov (Modern

problems of remote sensing of the Earth from space: Physical principles, methods and technologies for monitoring the environment, potentially hazardous events and objects). A collection of scientific articles. Issue 3, vol. II. Moscow, IKI RAN, OOO "Azbuka-2000", 2006, pp. 281–286.

6. Bobrov P. P., Kondrat'yeva O. V., Repin A. V. Izvestiya Vuzov. Fizika. 2012, no. 8/3, pp. 23–26.

© Беляева Т. А., Бобров П. П., Кондратьева О. В., 2013

УДК 537.226.1 + 631.437.226.2

### **ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ПОЧВАХ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 10 кГц – 8,5 ГГц**

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

Омский государственный педагогический университет  
644099, Омск, наб. Тухачевского, 14. E-mail: bobrov@omgpu.ru

*Приведены результаты измерений диэлектрической проницаемости почв и грунтов с различным содержанием глины и органического вещества (гумуса). Показано, что увеличение содержания гумуса, как и содержания глины, приводит к увеличению максимального количества связанной воды. На частотах выше 1 ГГц это приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости почвы при больших влажностях. На частотах 10–100 МГц наличие глины приводит к возрастанию диэлектрической проницаемости почвы, а наличие гумуса – к ее уменьшению. Показано также, что диэлектрическая проницаемость переходной воды зависит от частоты и резко возрастает на частотах ниже 100 МГц. Полученные результаты могут быть использованы при построении диэлектрических моделей почв.*

*Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, влажные почвы, гумус, связанная вода.*

### **EFFECT OF SOIL ORGANIC MATTER ON THE DIELECTRIC PERMITTIVITY AT THE FREQUENCIES 10 kHz – 8.5 GHz**

P. P. Bobrov, O. V. Kondratieva, M. M. Mustakova

Omsk State Pedagogical University  
14 Tukhachevskiy st., Omsk, 644099, Russia. E-mail: bobrov@omgpu.ru

*The results of measurements of the soils dielectric constant with different amounts of clay and organic matter (humus) are presented. It is shown that the growth of humus and the clay content increases the maximum amount of bound water. At frequencies above 1 GHz this leads to a decrease in the soil dielectric constant at high moistures. At frequencies 10–100 MHz the presence of clay leads to an increase of the soil dielectric constant, and the presence of humus leads to its reduction. It is also shown that the dielectric constant of transitional water depends on the frequency and increases rapidly at frequencies below 100 MHz. The results can be used to construct models of dielectric soil.*

*Keywords: dielectric permittivity, moist soils, humus, bound water.*

Одним из важных показателей качества почвы является содержание гумуса. Его наличие в почвах необходимо учитывать при обработке данных дистанционного микроволнового зондирования. В работах [1; 2] показано, что присутствие гумуса проявляется в разной динамике коэффициента излучения почв в процессе высыхания.

Для прогнозирования диэлектрических характеристик разрабатываются диэлектрические модели, вход-

ными параметрами которых являются физические и гидрологические характеристики почв [3; 4]. Благодаря развитию методики измерений [5] появилась возможность измерять спектры КДП в широком диапазоне частот. При этом диэлектрическая модель почвы может быть построена с использованием спектров, найденных для ограниченного числа значений влажности [6]. Для распространения моделей на широкий класс почв необходимо выяснить влияние гумуса на КДП.

\* Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки в части проведения НИР.

**Физические характеристики исследованных почв и грунтов**

| Наименование                    | Массовая доля физической глины | Содержание гумуса, % | $\rho$ | $M_t$  |
|---------------------------------|--------------------------------|----------------------|--------|--------|
| Бентонит                        | 0,72                           | 0                    | 1,1    | 0,22   |
| Чернозем слабогумусный          | 0,60                           | 4,2                  | 1,33   | 0,15   |
| Лугово-черноземная почва (г. А) | 0,36                           | 6,6                  | 1,35   | 0,09   |
| Лугово-черноземная почва (г. С) | 0,44                           | 0,6                  | 1,67   | 0,05   |
| Смесь песка с бентонитом        | 0,26                           | 0                    | 1,28   | 0,07   |
| Кварцевые гранулы               | 0,08                           | 0                    | 1,5    | 0,0016 |

По методике, изложенной в [5], нами были проведены измерения спектров КДП почв, характеристики которых приведены в таблице, в диапазоне частот 10 кГц – 8,5 ГГц. Было установлено, что на частотах ниже 20–25 МГц при возрастании влажности может наблюдаться уменьшение действительной части КДП. Рефракционная модель на этих частотах не работает, поэтому для выявления влияния гумуса мы сравнивали диэлектрические характеристики почв на частотах выше 10 Гц.

В соответствии с моделью [4] действительную  $n$  (показатель преломления) и мнимую  $\kappa$  (показатель поглощения) части комплексного показателя преломления влажной почвы

$$n_S^* = n_S + i\kappa_S = \sqrt{\epsilon^*}$$

можно представить в виде

$$n_S = n_d + (n_b - 1)M_t\rho + (n_u - 1)(M - M_t)\rho, \quad (1)$$

$$\kappa_S = \kappa_d + \kappa_b M_t\rho + \kappa_u (M - M_t)\rho, \quad (2)$$

где  $n_d, \kappa_d, n_b, \kappa_b, n_u, \kappa_u$  – показатели преломления и поглощения сухой почвы, связанной и переходной воды, соответственно;  $M_t$  – максимальное количество связанной воды (массовая доля);  $M$  – общая влажность почвы (массовая доля);  $\rho$  – отношение плотности сухого сложения почвы к плотности воды. Формулы (1), (2) справедливы при влажностях  $M > M_t$ . Параметры  $n_b, \kappa_b, n_u, \kappa_u$  являются частотно-зависимыми, а  $n_d$  и  $\kappa_d$  от частоты практически не зависят. Связь показателя преломления сухой почвы с плотностью сухого сложения можно представить в виде  $n_d = 1 + A\rho$ , где  $A$  – коэффициент, принимающий

значения 0,42–0,55 в зависимости от диэлектрической проницаемости и плотности монокристаллического минерала.

С учетом вышесказанного из (1) и (2) можно получить параметры  $\Delta n$  и  $\Delta \kappa$ , не зависящие от влажности и в первом приближении – от плотности:

$$\Delta n = (n_b - 1)M_t = \frac{n'_S - 1}{\rho} - (n_u - 1)(M - M_t) - A,$$

$$\Delta \kappa = \kappa_b M_t + \frac{\kappa_d}{\rho} = \frac{\kappa'_S}{\rho} - \kappa_u (M - M_t),$$

где  $n'_S$  и  $\kappa'_S$  – экспериментально измеренные значения при  $M > M_t$ . Для определения частотных зависимостей  $\Delta n$  и  $\Delta \kappa$  достаточно произвести измерения  $n'_S$  и  $\kappa'_S$  при 3-х или 4-х значениях влажности, так чтобы максимальные значения  $M$  не выходили бы за пределы диапазона влажностей переходной воды. Поскольку в этом диапазоне влажностей значения  $n_u$  и  $\kappa_u$  не зависят от влажности, последние можно найти путем фиттирования так, чтобы частотные зависимости  $\Delta n$  и  $\Delta \kappa$  были бы одинаковыми для всех значений  $M$ , для которых произведены измерения  $n'_S$  и  $\kappa'_S$ .

Частотные зависимости подобранных таким образом значений  $n_u$  и  $\kappa_u$  для почв, указанных в таблице под номерами 1, 2, 4, приведены на рис. 1. Видно, что для образцов 2 и 4 значения  $n_u$  в диапазоне частот 0,1–4 ГГц остаются практически постоянными, а на частотах ниже 0,1 ГГц возрастают. При этом значения  $\kappa_u$  около 1 ГГц имеют минимум, тогда как для бентонита значения  $n_u$  и  $\kappa_u$  непрерывно возрастают при уменьшении частоты. Частотные зависимости величины  $\Delta n = (n_b - 1)M_t$  для почв, приведенных в таблице под номерами 1–6, приведены на рис. 2.

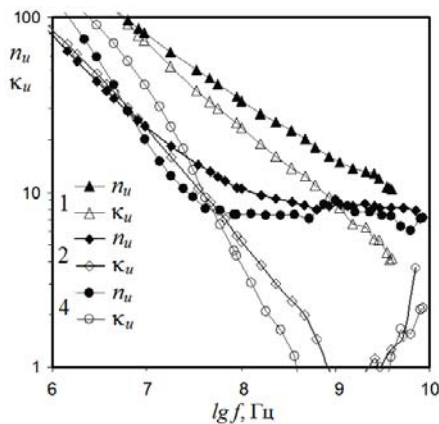


Рис. 1

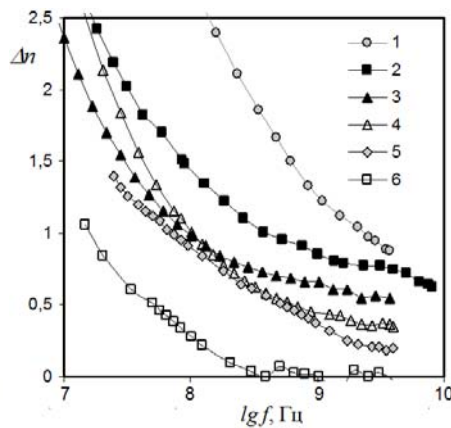


Рис. 2

Визуально заметно, что на частоте около 4 ГГц значение  $\Delta n$  тем больше, чем выше в почве содержание глины и гумуса. Также заметно, что в почвах, содержащих гумус, при понижении частоты значение  $\Delta n$  возрастает медленнее. Это отражается в следующих регрессионных уравнениях связи значений  $\Delta n$  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<sup>1,2</sup>, А. Ю. Каравайский<sup>1,2</sup>, Ю. И. Лукин<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Институт 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.