

УДК 537.226.1 + 631.437.226.2

## ИЗМЕНЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВЯЗАННОЙ ВОДЫ В ПОЧВАХ ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ЕЕ КОЛИЧЕСТВА

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

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

*Выполнены измерения комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) малоувлажненных почв в диапазоне частот 1 МГц – 4 ГГц. Показано, что КДП связанной воды на частотах ниже 1–1,5 ГГц зависит от ее количества в почве. Создана модель зависимости КДП от частоты и влажности, включающая три частотные области релаксации. Показано, что учет зависимости КДП связанной воды от ее количества позволяет существенно повысить точность рефракционной модели почв при малых влажностях. Обнаружено, что в почвах с большим содержанием глины на частотах ниже 20 МГц наблюдаются отклонения от монотонности в зависимости КДП связанной воды от влажности. Полученные результаты могут быть использованы для повышения точности дистанционного определения влажности малоувлажненных почв микроволновыми методами.*

*Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, связанная вода, дисперсия, малоувлажненные почвы.*

## CHANGES OF THE BOUND WATER DIELECTRIC PROPERTIES IN SOILS AT INCREASE OF ITS QUANTITY

T. A. Belyaeva, P. P. Bobrov, O. V. Kondratieva

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

*The measurements of the complex dielectric constant (CDC) of soils with low water content at the frequencies 1 MHz – 4 GHz are performed. It is shown that the CDC of bound water at frequencies below 1–1.5 GHz depends on its quantity in the soil. A model of the frequency and moisture dependence, including three frequency areas of relaxation, is created. It is shown that account of the dependence of CDC of bound water on its quantity can significantly improve the accuracy of the refractive soil models at low moisture. It is revealed that in soils with large clay content at frequencies below 20 MHz deviations from monotonic bound water CDC dependence on moisture are observed. The results can be used for improving the accuracy of soil moisture remote determination by microwave methods.*

*Keywords: dielectric permittivity, bound water, dispersion, low moisturized soils.*

Комплексная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon''$  (КДП) влажных почв и грунтов удовлетворительно описывается рефракционной моделью. В первоначальном варианте рефракционной модели [1] предполагалось, что связанная вода имеет одну область релаксации, обусловленную ориентационной поляризацией молекул воды. Эта модель давала хорошее согласие с экспериментом на частотах выше 1–1,5 ГГц [2; 3]. В поздней версии модели [4] за счет учета еще одной области релаксации удалось довести нижнюю частотную границу справедливости модели до 40 МГц. В этих моделях КДП связанной воды считают не зависящей от ее количества в почве [1–4]. Первые исследования, показавшие зависимость КДП связанной воды от ее количества, были проведены с использованием не очень точной аппаратуры и на частотах от 0,3 до 10 ГГц [5].

Выводы настоящей работы основаны на измерениях, проведенных в широком частотном диапазоне. В диапазоне частот 42 Гц – 5 МГц использовался измеритель LCR 3532-50 фирмы НЮКИ, а в диапазоне

частот от 0,3 МГц до 4–8,5 ГГц – векторные анализаторы параметров цепей ZVRE и ZNB8 фирмы Роде и Шварц. При этом во всем диапазоне частот измерялся один и тот же образец, помещенный в коаксиальную ячейку. Методика измерений приведена в [6]. Применяемые измерительные приборы имеют низкую погрешность измерения в широком диапазоне частот, поэтому погрешность измерения КДП почв, рассчитанная по паспортным данным прибора, во всем диапазоне частот не превышала 4 %.

Для определения зависимости КДП связанной воды от влажности использовались экспериментальные данные КДП почв, измеренные при влажностях, меньших максимально возможного количества связанной воды. Комплексный показатель преломления почвы

$$n^* = n - ik = \sqrt{\epsilon^*}$$

для таких влажностей может быть представлен в виде

$$n = n_d + (n_b - 1)W, \quad (1)$$

\*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 12-05-98082-п\_сибирь\_a.

$$\kappa = \kappa_d + \kappa_b W, \quad (2)$$

где  $n_d$ ,  $\kappa_d$ ,  $n_b$ ,  $\kappa_b$  – показатели преломления и показатели поглощения сухой почвы и связанной воды, соответственно,  $W$  – объемная влажность.

В первом приближении можно считать, что плотность сухого сложения  $\rho$  измеряемых образцов влияет на показатели преломления и поглощения только сухой почвы. Из экспериментальных измерений найдено, что и для бентонита и для лугово-черноземной почвы  $n_d = 1 + 0,46\rho$  и  $\kappa_b = 0,0097\rho$ . Тогда по найденным из формул (1) и (2) значениям  $n_b$  и  $\kappa_b$  для каждой влажности можно определить значения мнимой и действительной части КДП связанной воды:  $\varepsilon'_b = n_b^2 - \kappa_b^2$ ,  $\varepsilon''_b = 2n_b \cdot \kappa_b$ . Соответствующие частотные зависимости приведены на рис. 1 и 2.

При моделировании КДП связанной воды в частотном диапазоне 100 кГц – 4 ГГц были выделены три области релаксации – в первой, высокочастотной области ( $10^9$ – $10^{10}$  Гц) КДП связанной воды была выражена через параметры модели Дебая, поскольку здесь преобладает ориентационно-дипольная поляризация; во второй ( $10^9$  –  $10^8$  Гц) и третьей ( $10^8$  –  $10^5$  Гц) областях использовалась модель Коула–Коула.

КДП  $\varepsilon_b = \varepsilon'_b - \varepsilon''_b$  связанной воды определялась как сумма вкладов всех областей:

$$\varepsilon_b = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_{s1} - \varepsilon_\infty}{1 + i\omega\tau_1} + \frac{\varepsilon_{s2}}{(1 + i\omega\tau_2)^{1-\alpha_2}} + \frac{\varepsilon_{s3}}{(1 + i\omega\tau_3)^{1-\alpha_3}} + i \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_\infty$  – высокочастотная диэлектрическая проницаемость, значение которой принималось равным 4,9;  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая постоянная;  $\varepsilon_{s1}$ ,  $\varepsilon_{s2}$ ,  $\varepsilon_{s3}$  – статические диэлектрические проницаемости;  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  – времена релаксации для 1, 2, 3-й областей релаксации, соответственно;  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  – коэффициенты распределения времен релаксации для 2-й и 3-й областей;  $\sigma_3$  – ионная удельная проводимость;  $\omega$  – циклическая частота;  $i$  – мнимая единица.

Параметры первой области релаксации принимались независимыми от влажности, так как на частотах выше 1–2 ГГц КДП связанной воды от влажности зависит слабо, и выбирались равными для бентонита  $\varepsilon_{s1} = 25,7$ ;  $\tau_1 = 12,6$  пс, а для лугово-черноземной почвы  $\varepsilon_{s1} = 35,5$ ;  $\tau_1 = 12,1$  пс.

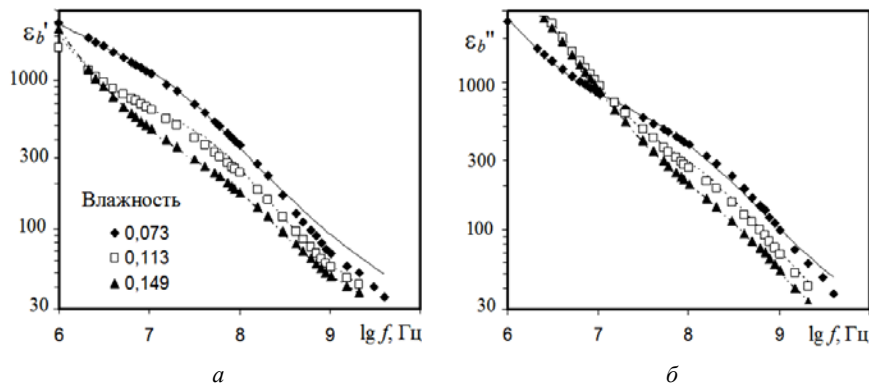


Рис. 1. Частотные зависимости действительной (а) и мнимой (б) частей КДП связанной воды в бентоните (линиями показаны результаты расчета по модели)

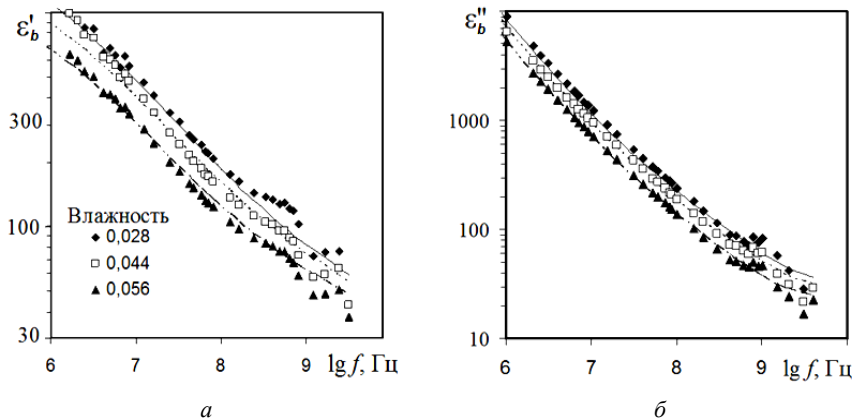


Рис. 2. Частотные зависимости действительной (а) и мнимой (б) частей КДП связанной воды в лугово-черноземной почве (линиями показаны результаты расчета)

Таблица 1

Параметры модели диэлектрической проницаемости связанной в бентоните воды

$W$	$\rho$ , г/см	$\epsilon_{s2} \cdot 10$	$\tau_2$ , нс	$\alpha_2$	$\epsilon_{s3} \cdot 10$	$\tau_3$ , мкс	$\alpha_3$	$\sigma$ , См/м
0,073	1,18	10,9	3,4	0,233	6,64	222	0,250	4,4 · 10
0,076	1,18	8,88	4,5	0,284	4,73	265	0,327	0
0,094	1,16	7,10	3,9	0,277	2,86	25,7	0,203	0
0,113	1,15	6,16	3,7	0,307	1,86	5,93	0,091	6,0 · 10
0,140	1,13	2,87	1,9	0,253	1,72	0,78	0,194	0
0,149	1,07	1,96	1,3	0,205	0,967	4,44	0,174	0

Таблица 2

Регрессионные уравнения для параметров модели для второй и третьей областей релаксации

Образец	Область	$\epsilon_s$	$\tau$ , с	$\alpha$
Бентонит	2-я	$-9477W + 1\ 670$	$-3,06 \cdot 10^{-8} W + 6,47 \cdot 10^{-9}$	$-0,175 \cdot W + 0,283$
	3-я	$1,21 \cdot 10^8 W - 3,38 \cdot 10^7 W + 2,42 \cdot 10^6$	$0,012 \exp(-59,49W)$	$-1,6 \cdot W + 0,376$
Лугово-черноземная почва	2-я	$-29\ 620W + 2\ 830$	$-1,12 \cdot 10^{-6} \cdot W + 1,40 \cdot 10^{-7}$	$0,092W + 0,495$
	3-я	$1,24 \cdot 10^9 W - 1,43 \cdot 10^8 W + 6,92 \cdot 10^6$	$-3,38 \cdot 10^{-4} \cdot W + 8,61 \cdot 10^{-5}$	$-0,032W + 0,003$

Найденные путем фиттирования параметры для 2-й и 3-й областей релаксации для бентонита приведены в табл. 1. С использованием этих данных построены регрессионные уравнения зависимостей параметров модели (3) от объемной влажности. Эти уравнения приведены в табл. 2.

Результаты модельных расчетов с использованием значений параметров, найденных по регрессионным уравнениям, показаны на рис. 1 и 2 линиями. Видно, что с увеличением влажности действительная и мнимая части КДП уменьшаются, то есть в уравнениях (1) и (2)  $n_b$  и  $\kappa_b$  не являются константами. Кроме того, зависимость от влажности мнимой части КДП связанной воды в бентоните (рис. 1, а) на частотах ниже 20 МГц изменяется на противоположную.

Расчеты показывают, что если КДП связанной воды считать не зависящей от влажности, то погрешность модели (отклонение от экспериментальных значений КДП почв) при малых влажностях в диапазоне частот 1–100 МГц как для  $\epsilon'$ , так и для  $\epsilon''$  у бентонита может достигать 35–40 %, а у лугово-черноземной почвы 11–12 %. Учет зависимости КДП связанной воды от влажности позволяет уменьшить погрешность до 5–10 %

Таким образом, КДП связанной воды в малоувлажненных почвах в широком диапазоне частот имеет три области дисперсии, причем параметры модели КДП для каждой области дисперсии зависят от влажности почв. Учет этой зависимости приводит к существенному уменьшению погрешности модели КДП почвы при малой влажности, особенно в диапазоне частот от  $10^6$  до  $10^8$  Гц.

#### Библиографические ссылки

1. Generalized Refractive Mixing Dielectric Mode for Moist Soils / V. L. Mironov, M. C. Dobson, V. H. Kaupp et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2004. Vol. 42, №. 4. P. 773–785.

2. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости различных форм почвенной влаги в мик-

роволновом диапазоне / В. Л. Миронов, П. П. Бобров, О. В. Кондратьева, А. В. Репин // Зондирование земных покровов радарными с синтезированной апертурой : материалы Рос. науч. конф. (6–10 сент. 2010, г. Улан-Удэ). С. 344–355.

3. Определение параметров моделей диэлектрической проницаемости почв с различной плотностью и различным содержанием гумуса по данным экспериментальных измерений в частотном диапазоне 0,1–20 ГГц / Т. А. Беляева, А. П. Бобров, П. П. Бобров // Исследование Земли из космоса. 2003. № 5. P. 28–34.

4. Mironov V. L., Bobrov P. P., Fomin S. V. Multi-Relaxation Generalized Refractive Mixing Dielectric Model of Moist Soil // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2013. Vol. 10, № 3. P. 603–606.

5. Зависимость диэлектрической проницаемости связанной воды в почвах от ее количества / Т. А. Беляева, П. П. Бобров, О. А. Ивченко, В. Н. Мандрыгина // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов : сб. науч. ст. 2006. Вып. 3. Т. II. С. 281–286.

6. 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.

#### References

1. Mironov V. L., Dobson M. C., Kaupp V. H., Komarov S. A., Kleshchenko V. N. Generalized refractive mixing dielectric mode for moist soils. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2004, vol. 42, no. 4, pp. 773–785.

2. Mironov V. L., Bobrov P. P., Kondratieva O. V., Repin A. V. Russian scientific conference “Sensing of Earth covers by synthetic aperture radars”, Ulan-Ude, 06.09–10.09.2010, Elektronnyy sbornik dokladov, pp. 344–355.

3. Belyaeva T. A., Bobrov A. P., Bobrov P. P., Galeev O. V., Mandrygina V. N. Issledovaniye Zemli iz kosmosa. 2003, no.5, pp. 28–34.

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.