

УДК 621.371.3/205.2

В.Л. МИРОНОВ,***, П.П. БОБРОВ**, С.В. ФОМИН*, А.Ю. КАРАВАЙСКИЙ*,****

ОБОБЩЕННАЯ РЕФРАКЦИОННАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛАЖНЫХ ПОЧВ, УЧИТЫВАЮЩАЯ ИОННУЮ РЕЛАКСАЦИЮ ПОЧВЕННОЙ ВОДЫ

Предложена многорелаксационная обобщенная рефракционная диэлектрическая модель влажных почв в диапазоне частот от 0,2 до 14,8 ГГц. Модель основана на данных диэлектрических измерений, проведенных в этом частотном диапазоне, при температуре 20 °С, для относительных весовых влажностей, изменяющихся в пределах от 2 до 43 %. Созданная модель расширяет частотный диапазон применимости ранее предложенной однорелаксационной модели в область мегагерцового диапазона за счет учета ионной релаксации Максвелла – Вагнера, которая существенно проявляется в связанной почвенной воде в этом диапазоне частот. Показано, что ошибка расчета с помощью предложенной модели спектров комплексной диэлектрической проницаемости влажной почвы имеет тот же порядок, что и погрешность экспериментальных данных, используемых при построении модели.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, влажные почвы, спектроскопические параметры.

Введение

В настоящее время обобщенная рефракционная диэлектрическая модель для частотных спектров влажных почв (ОРДМВП), предложенная в [1], стала эффективным инструментом для расчета диэлектрических спектров влажных почв в СВЧ-диапазоне. Эта модель учитывает только дипольную релаксацию молекул воды в гигагерцовом диапазоне частот и может быть определена как однорелаксационная ОРДМВП. Погрешности расчета комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) с помощью моделей, развитых на базе однорелаксационной ОРДМВП [2–5], оказываются значительно меньше, чем в случае широко используемой полуэмпирической диэлектрической модели, предложенной в [6]. Между тем ошибки диэлектрических моделей [2–5] заметно возрастают при уменьшении частоты ниже 1,0 ГГц. Это происходит потому, что однорелаксационная ОРДМВП не учитывает наблюдаемый в экспериментах [7–11] значительный рост действительной и мнимой частей КДП влажных глинистых почв с понижением частоты при переходе в мегагерцовый диапазон. В [11] показано, что этот рост может быть вызван ионной релаксацией Максвелла – Вагнера [12] связанной почвенной воды.

В данной работе создана многорелаксационная ОРДМВП с учетом как дипольной, так и ионной релаксации молекул почвенной воды для диапазона частот от 0,2 до 14,8 ГГц. Разработаны методики определения параметров диэлектрических спектров многорелаксационной ОРДМВП на примере глинистого чернозема, содержащего кварц ~ 50–60 %, плагиоклаз ~ 15–20 %, диоктаэдрическую слюду ~ 10 %, калиевый полевой шпат ~ 10 %, хлорит ~ 5–7 %, смектит ~ 2–3 % и органические компоненты ~ 2 %. Погрешность многорелаксационной ОРДМВП оценена через коэффициент Пирсона и стандартное отклонение между измеренными и рассчитанными с помощью модели значениями действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости.

Концепция многорелаксационной ОРДМВП

Выразим действительную n_s и мнимую κ_s части комплексного показателя преломления (КПП) влажной почвы как функцию весовой влажности M , относительно веса сухого образца, в форме рефракционной диэлектрической модели смеси [1, 3, 5]:

$$\frac{n_s(M, f) - 1}{\rho_d} = \begin{cases} \frac{n_m - 1}{\rho_m} + (n_b(f) - 1)M, & 0 \leq M \leq M_{t1}, \\ \frac{n_s(M_{t1}, f) - 1}{\rho_d} + (n_t(f) - 1)(M - M_{t1}), & M_{t1} \leq M \leq M_{t2}, \\ \frac{n_s(M_{t2}, f) - 1}{\rho_d} + (n_u(f) - 1)(M - M_{t2}), & M \geq M_{t2}; \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\kappa_s(M, f) - 1}{\rho_d} = \begin{cases} \frac{\kappa_m + \kappa_b(f)M}{\rho_m}, & 0 \leq M \leq M_{t1}, \\ \frac{\kappa_s(M_{t1}, f)}{\rho_d} + \kappa_t(f)(M - M_{t1}), & M_{t1} \leq M \leq M_{t2}, \\ \frac{\kappa_s(M_{t2}, f)}{\rho_d} + \kappa_u(f)(M - M_{t2}), & M \geq M_{t2}, \end{cases} \quad (2)$$

где n_s, n_m, n_b, n_t, n_u , и $\kappa_s, \kappa_m, \kappa_b, \kappa_t, \kappa_u$ – соответственно значения действительной и мнимой частей КПП; f обозначает частоту электромагнитного поля; через ρ_d выражена плотность образца сухого сложения. Подстрочные индексы s, m, b, t и u в (1), (2) и в последующих выражениях обозначают соответственно влажную почву, органоминеральную компоненту почвы, связанную (адсорбированную), рыхлосвязанную (пленочную) и свободную (капиллярную) почвенную воду. В свою очередь, M_{t1} и M_{t2} обозначают предельно возможное количество связанной воды и предельно возможное суммарное количество связанной и рыхлосвязанной воды в конкретном типе почвы. Значения действительной n_p и мнимой κ_p частей КПП выразим через действительную ε_p' и мнимую ε_p'' части КДП:

$$n_p \sqrt{2} = \sqrt{(\varepsilon_p')^2 + (\varepsilon_p'')^2} + \varepsilon_p', \quad \kappa_p \sqrt{2} = \sqrt{(\varepsilon_p')^2 + (\varepsilon_p'')^2} - \varepsilon_p', \quad (3)$$

где индекс p принимает значения $p = s, b, t$ и u в случае влажной почвы, связанной, рыхлосвязанной и свободной воды.

Определим действительную и мнимую части КДП для почвенной воды в формулах (3) через двухрелаксационное уравнение Дебая [13] для непроводящих жидкостей, которое учитывает только токи смещения:

$$\varepsilon_p' = \frac{\varepsilon_{0pL} - \varepsilon_{0pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pL})^2} + \frac{\varepsilon_{0pH} - \varepsilon_{\infty pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pH})^2} + \varepsilon_{\infty pH}, \quad \varepsilon_p'' = \frac{\varepsilon_{0pL} - \varepsilon_{0pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pL})^2} 2\pi f \tau_{pL} + \frac{\varepsilon_{0pH} - \varepsilon_{\infty pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pH})^2} 2\pi f \tau_{pH}. \quad (4)$$

Здесь ε_{0pL} и ε_{0pH} или ε_{0pH} и $\varepsilon_{\infty pH}$ – низкочастотный и высокочастотный пределы действительной части КДП; τ_{pL} или τ_{pH} – времена релаксации для ионной или дипольной релаксаций соответственно; все эти спектроскопические параметры должны быть отнесены к связанной ($p = b$), рыхлосвязанной ($p = t$) и свободной ($p = u$) почвенной воде; $\varepsilon_r = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума. Для определения КДП в случае свободной почвенной воды будем использовать однорелаксационное уравнение Дебая, которое следует из (5) при $\varepsilon_{0uL} = \varepsilon_{0uH}$.

Поскольку формулы (4) учитывают только токи смещения, то рассчитанные с помощью (1) – (4) значения КПП влажной почвы будут отличаться от наблюдаемых в эксперименте при измерении влажных образцов почвы, обладающих электропроводностью на постоянном токе. Однако формулы (1) – (4) можно применить для расчета действительной части КДП образца влажной почвы

$$\varepsilon_s' = n_s^2 - \kappa_s^2, \quad (5)$$

так как эта величина определяется только токами смещения. В то же время мнимую часть КДП влажной почвы можно выразить в виде суммы вкладов, возникающих, во-первых, за счет токов смещения, $2n_s \kappa_s$, и, во-вторых, за счет постоянного тока, протекающего через влажный образец, $\sigma_s / 2\pi f \varepsilon_r$, где σ_s – удельная электропроводность влажного образца, ε_r – диэлектрическая проницаемость свободного пространства. При этом удельную электропроводность влажного образца представим в виде суммы удельных электропроводностей всех типов воды, присутствующих в почве при заданной влажности образца, с учетом их относительного объемного содержания, $\sigma_s = W_b \sigma_b + W_t \sigma_t + W_u \sigma_u$, где $W_p = M_p \rho_d$ – объемное содержание отдельных типов воды в почве ($p = b, t, u$). В результате выражение для мнимой части КДП влажного образца может быть записано в следующем виде:

$$\varepsilon_s'' = \begin{cases} 2n_s \kappa_s + \rho_d(M) M \sigma_b(M) / 2\pi f \varepsilon_r, & 0 \leq M \leq M_{t1}, \\ 2n_s \kappa_s + \rho_d(M) [M_{t1} \sigma_b(M_{t1}) + (M - M_{t1}) \sigma_t(M)] / 2\pi f \varepsilon_r, & M_{t1} \leq M \leq M_{t2}, \\ 2n_s \kappa_s + \rho_d(M) [M_{t1} \sigma_b(M_{t1}) + (M_{t2} - M_{t1}) \sigma_t(M_{t2}) + (M - M_{t2}) \sigma_u(M)] / 2\pi f \varepsilon_r, & M \geq M_{t2}. \end{cases} \quad (6)$$

В формуле (6) удельные электропроводности связанной, рыхлосвязанной и свободной почвенной воды в общем случае зависят от влажности образца, так как с добавлением в образец воды может происходить разбавление почвенного раствора. Однако, как показано ниже, в случае измеряемой почвы эти зависимости являются слабыми, и можно было считать проводимости каждого типа воды постоянными величинами во всем диапазоне изменения содержания соответствующих типов почвенной воды.

Как видно из уравнений (1) – (6), в рамках предложенной многорелаксационной ОРДМВП спектр КДП для конкретной почвы при заданной влажности M и частоте электромагнитного поля f может быть рассчитан с помощью следующего набора параметров:

- 1) приведенные действительные и мнимые части КПП для органико-минеральной компоненты: $(n_m - 1) / \rho_m$ и κ_m / ρ_m ;
- 2) плотность сухого сложения почвы ρ_d ;
- 2) максимальное количество связанной (M_{t1}) и рыхлосвязанной ($M_{t2} - M_{t1}$) воды в данном типе почвы;
- 3) низкочастотные ε_{0pL} , ε_{0pH} и высокочастотные $\varepsilon_{\infty pH}$ пределы действительной части КДП для ионной и дипольной релаксаций в случае связанной ($p = b$), рыхлосвязанной ($p = t$) и свободной ($p = u$) почвенной воды;
- 4) времена ионной τ_{pL} и дипольной τ_{pH} релаксаций связанной ($p = b$), рыхлосвязанной ($p = t$) и свободной ($p = u$) почвенной воды;
- 5) удельные электропроводности связанной σ_b , рыхлосвязанной σ_t и свободной σ_u почвенной воды.

Все эти параметры могут быть получены для конкретного типа почвы с помощью обычных диэлектрических измерений влажной почвы, как это было сделано в [14] для однорелаксационной ОРДМВП. Предложенная в [14] методика определения параметров спектроскопической модели основана на многомерном регрессионном анализе измеренных спектров КДП влажной почвы с использованием в качестве теоретической модели регрессии уравнений (1) – (6). Далее изложены результаты проведенного регрессионного анализа.

Определение параметров многорелаксационной ОРДМВП

Для определения параметров многорелаксационной модели были проведены лабораторные измерения при температуре 20 °С спектров КДП для влажного глинистого чернозема, минеральный состав которого приведен выше. При этом использовалась установка и метод измерений, описанные в [5]. Измерения проводились в диапазоне частот от 200 МГц до 14,8 ГГц. Весовые влажности образцов изменялись в диапазоне от 0 до 43 %. В общей сложности были получены данные для 13 влажных образцов. Кроме того, для каждой влажности определялась плотность сухого сложения $\rho_d(M)$. Используя измеренные влажностные зависимости КПП, формулы (1), (2) и предложенную в [3] методику регрессионного анализа, мы определили вначале приведенные значения действительной, $(n_m - 1) / \rho_m = 0,45$, и мнимой, $\kappa_m / \rho_m = 0,001$, частей КПП органикоминеральной компоненты почвы, значения максимального содержания связанной воды ($M_{t1} = 0,176$) и суммарного максимального содержания связанной и рыхлосвязанной воды ($M_{t2} = 0,31$).

Далее были использованы измеренные спектры, показанные символами на рис. 1, которые соответствуют присутствию в образце только связанной воды (кривые 1 и 2), связанной и рыхлосвязанной (кривые 3, 4, 5) и связанной, рыхлосвязанной и свободной воды (кривая 6). Затем, применяя методику регрессионного анализа, предложенную в [14], и формулы (1) – (6), с помощью измеренных диэлектрических спектров, показанных на рис. 1, мы определяли спектроскопические параметры связанной, рыхлосвязанной и свободной почвенной воды. Значения найденных таким образом параметров многорелаксационной модели приведены в таблице, из которой следует, что разность $\varepsilon_{0tL} - \varepsilon_{0tH}$ не равна нулю, а это указывает на присутствие ионной релаксации в рыхлосвязанной воде. Ранее мы наблюдали присутствие этой релаксации только в связанной воде [11]. Следует отметить также, что в таблице приведены усредненные значения проводимостей связанной, рыхлосвязанной и свободной воды. В дополнение к данным таблицы использовано известное [1] значение $\varepsilon_{\infty pH} = 4,9$. Рассчитанные с помощью найденных параметров многорелаксационной ОРДМВП и формул (1) – (6) диэлектрические спектры иллюстрируются сплошными линиями на рис. 1. Сравнение рассчитанных спектров с измененными показывает их хорошее количественное

соответствие. Для определения ошибки расчета спектров с помощью многорелаксационной ОРДМВП проведен корреляционный анализ, результаты которого изложены далее.

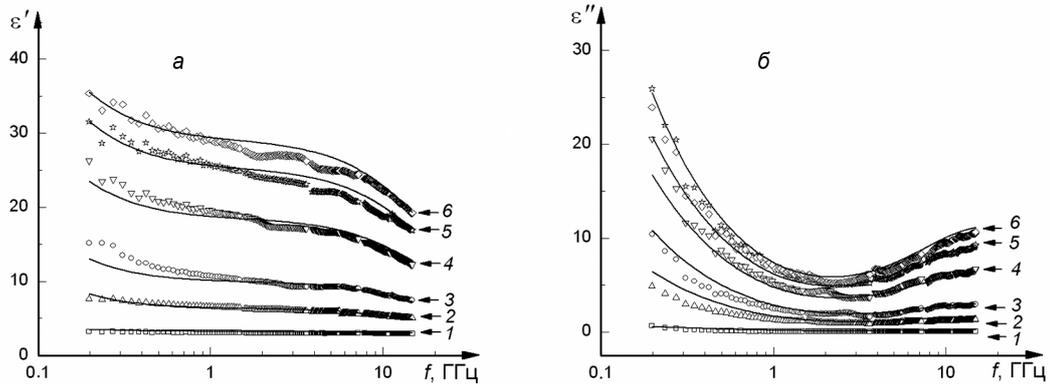


Рис. 1. Экспериментальные спектры действительной ε' и мнимой ε'' частей КДП (символы) влажной почвы и их расчеты с применением формул (1) – (6) и данных из таблицы (сплошные линии). Весовые влажности M (г/г): 0,021 (кр. 1), 0,168 (кр. 2), 0,190 (кр. 3), 0,248 (кр. 4), 0,292 (кр. 5) и 0,335 (кр. 6)

Спектроскопические параметры и погрешности многорелаксационной диэлектрической модели

Физические характеристики		Спектроскопические параметры						Оценки погрешности	
M	ρ_d	Связанная вода		Рыхлосвязанная вода		Свободная вода		Лин. регрессия ε'	$\varepsilon'_m = 0,009 + 0,969 \cdot \varepsilon'_p$
0,021	1,413	ε_{0bL}	750	ε_{0rL}	150	-	-	ρ	0,998
0,168	1,123	ε_{0bH}	40	ε_{0rH}	140	ε_{0uH}	100	σ	0,454
0,190	1,389	τ_{bL} (ns)	5,5	τ_{rL} (ns)	0,06	-	-	Лин. регрессия ε''	$\varepsilon''_m = -0,125 + 0,994 \cdot \varepsilon''_p$
0,248	1,499	τ_{bH} (ps)	12,5	τ_{rH} (ps)	8	τ_{uH} (ps)	10,6	ρ	0,995
0,292	1,555	σ_b (S/m)	0,001	σ_r (S/m)	0,18	σ_u (S/m)	0,4	σ	0,361
0,335	1,408								

Погрешность многорелаксационной ОРДМВП

На рис. 2 представлены зависимости измеренных КДП от рассчитанных значений этой величины. Если бы рассчитанные величины не отклонялись от измеренных, то зависимости, показанные на рис. 2 символами, совпали бы с биссектрисами, которые показаны пунктирными линиями. Оценим статистическую погрешность расчетов КДП через коэффициент Пирсона ρ и стандартное отклонение σ , соответствующие линейной регрессии для данных на рис. 2. Линейная регрессия

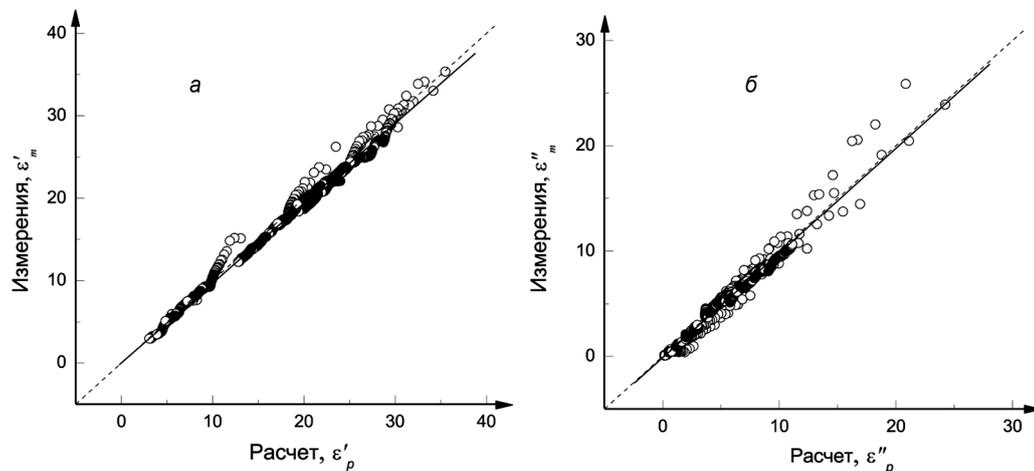


Рис. 2. Корреляция рассчитанных ε'_p и ε''_p и измеренных ε'_m и ε''_m значений действительной и мнимой частей КДП (показаны символами). Пунктирная линия – биссектриса. Сплошная линия – линейная регрессия

показана на рис. 2 сплошными линиями. Значения коэффициентов Пирсона и стандартных отклонений σ приведены в таблице. Здесь же даны уравнения линейной регрессии, которые позволяют оценить систематическую погрешность (отклонение линии регрессии от биссектрисы). Приведенные в таблице погрешности многорелаксационной модели в виде стандартных отклонений равных 0,454 и 0,361 для действительной и мнимой частей КДП соответственно сравнимы с ошибками самих диэлектрических измерений [15].

Заключение

В данной работе была разработана методика построения многорелаксационной ОРДМВП для расчета спектров КДП в диапазоне частот от 0,2 до 14,5 ГГц в случае конкретного типа влажной почвы при заданной температуре. Разработанная методика основана на данных диэлектрических измерений влажной почвы. В предлагаемой диэлектрической модели используются двухрелаксационные спектры для комплексной диэлектрической проницаемости связанной и рыхлосвязанной воды в почве. Ошибки расчета КДП при использовании многорелаксационной ОРДМВП оказались сравнимы с ошибками диэлектрических измерений почв. В работе впервые показано, что рыхлосвязанная вода в почве обладает ионной релаксацией. Многорелаксационная ОРДМВП будет использована далее с целью создания диэлектрических моделей, учитывающих также зависимости от гранулометрического состава почвы и температуры, как это делается в [2–5]. Такие диэлектрические модели необходимы в радарном и радиометрическом дистанционном зондировании поверхности суши в гигагерцовом и мегагерцовом диапазонах частот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mironov V.L., Dobson M.C., Kaupp V.H., et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2004. – V. 42 – No. 4 – P. 773–785.
2. Mironov V.L., Kosolapova L.G., and Fomin S.V. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2009. – V. 47 – No. 7 – P. 2059–2070.
3. Mironov V.L., De Roo R.D., and Savin I.V. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2010. – V. 48. – No. 6 – P. 2544–2556.
4. Mironov V.L. and Fomin S.V. // PERS Online. – 2009. – V. 5 – No. 5. – P. 411–415.
5. Mironov V.L. and Lukin Yu.I. // Russ. Phys. J. – 2011. – V. 53. – No. 9. – P. 956–963.
6. 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.
7. Curtis J.O., Weiss C.A., Jr., and Everett J.B. // Technical Report EL-95-34, U.S. Army Corps Eng. Waterways Exp. Station – Vicksburg MS. – Dec. 1995.
8. Kelleners T.J., Robinson D.A., Shouse P.J., et al. // Soil Sci. Soc. Am. J. – 2005. – V. 69. – No. 1. – P. 67–76.
9. Lukin Yu.I. and Komarov S.A. // Proc. IGARSS. – 2007. – P. 735–737.
10. Wagner N., Emmerich K., Bonitz F., and Kupfer K. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2011. – V. 49. – No. 7. – P. 2518–2530.
11. Bobrov P.P., Mironov V.L., Kondratieva O.V., and Repin A.V. // Proc. the XII International Conference «Physics of Dielectrics» (Dielectrics-2011), Sankt Petersburg RUSSIAN, 23–26 May, 2011. – V. 1. – P. 207–209.
12. Kremer F., Schonhals A., and Luck W. Broadband Dielectric Spectroscopy. – Springer Verlag, 2002.
13. Ахадов Я. Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 410 с.
14. Mironov V.L., Bobrov P.P., Kosolapova L.G., et al. // Proc. IGARSS'06. – 2006. – V. 6. – P. 2957–2961.
15. Миронов В.Л., Комаров С.А., Лукин Ю.И., Шатов Д.С. // Радиотехника и электроника. – 2010. – Т. 55. – № 12. – С. 1465–1470.

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

Поступила в редакцию 15.06.12.

**Омский государственный педагогический университет, г. Омск, Россия

***Сибирский государственный аэрокосмический университет

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

E-mail: rsd@ksc.krasn.ru

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

Бобров Павел Петрович, д.ф.-м.н., профессор;

Фомин Сергей Викторович, мл. науч. сотр.;

Каравайский Андрей Юрьевич, аспирант.