

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 537.226.8

И.В. САВИН*, В.Л. МИРОНОВ*, **, ***

МНОГОРЕЛАКСАЦИОННАЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ЗАВИСИМАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АРКТИЧЕСКОЙ ПОЧВЫ ПРИ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Исследованы частотные спектры диэлектрической проницаемости арктической почвы Аляски с учетом дипольной и ионной релаксации молекул почвенной влаги в диапазоне частот от 40 МГц до 16 ГГц и в диапазоне температур от -5 до $+25$ °С. Предложена температурная многорелаксационная обобщенная рефракционная диэлектрическая модель влажной арктической почвы.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, влажные почвы, спектроскопические параметры, релаксация Максвелла – Вагнера.

Введение

В настоящее время микроволновое спутниковое радиозондирование дает возможность проводить мониторинг почвенного покрова в обширном Арктическом регионе. Однако для осуществления такого мониторинга состояния вечной мерзлоты должны быть известны зависимости диэлектрической постоянной почвы от влажности и температуры почвы. Предложенная ранее обобщенная рефракционная диэлектрическая модель для частотных спектров влажных почв (ОРДМВП) [1] стала эффективным инструментом для прогнозирования диэлектрических спектров влажных почв в СВЧ-диапазоне. Затем на ее основе была создана обобщенная рефракционная диэлектрическая модель влажной арктической почвы [2, 3]. Эти модели учитывают только дипольную релаксацию молекул воды в гигагерцовом диапазоне частот и может быть определена как однорелаксационная ОРДМВП. Ошибки в диэлектрических прогнозах с помощью моделей, развитых на базе однорелаксационной ОРДМВП [2–4], оказываются значительно меньше, чем у обычно используемой полупирической диэлектрической модели, предложенной в [5]. Между тем ошибки диэлектрических моделей [2–4] заметно возрастают при уменьшении частоты ниже 1.0 ГГц. Это происходит потому, что они не учитывают наблюдаемый в экспериментах [6, 7] значительный рост действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) влажных почв в мегагерцовом диапазоне частот. В работе [7] было показано, что этот рост может быть вызван ионной релаксацией Максвелла – Вагнера [8] в связанной и пленочной почвенной влаге.

В данной работе создана температурная многорелаксационная ОРДМ влажной арктической почвы с учетом как дипольной, так и ионной релаксации молекул почвенной воды для диапазона частот от 40 МГц до 16 ГГц и в диапазоне температур от -5 до $+25$ °С. Минеральный состав почвы представлен в табл. 1. Проведена оценка погрешности созданной многорелаксационной ОРДМ.

Таблица 1

Минеральный состав исследуемой почвы

Минеральный состав	Содержание, %	Минеральный состав	Содержание, %
Органика	80–90	Плагиоклаз	0.75
Кальцит	4.5	Слюда	0.75–1.5
Кварц	7.5–8.2	Смектит	0.75

Определение параметров многорелаксационной ОРДМ

Авторами [9] была разработана методика определения параметров диэлектрических спектров многорелаксационной ОРДМ на примере глинистого чернозема. В данной работе была применена та же методика для арктической почвы.

Проведены лабораторные измерения спектров КДП для влажной арктической почвы в диапазоне частот от 40 МГц до 16 ГГц при температурах от $+25$ до -5 °С в режиме охлаждения образцов. Температурный режим обеспечивался камерой тепла-холода Espec SU-241. Для измерений

КДП использовался векторный анализатор цепей ZVK фирмы «Rohde&Schwarz», который измеряет параметры матрицы рассеяния подключаемого измерительного коаксиального контейнера, содержащего образец почвы. Спектры КДП определялись с использованием параметров матрицы рассеяния. При этом в диапазонах частот от 40 МГц до 1 ГГц и от 1 до 16 ГГц применялись методики, описанные в [10, 11] соответственно.

Далее, выражая действительную n_s и мнимую κ_s части комплексного показателя преломления (КПП) влажной почвы как функцию массовой влаги M , относительно веса сухого образца, в форме рефракционной диэлектрической модели смеси [1] получим

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

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

Здесь n_s , n_m , n_b , n_t , n_u и κ_s , κ_m , κ_b , κ_t , κ_u — значения действительной и мнимой частей КПП соответственно; f и t обозначают частоту электромагнитного поля и температуру соответственно; через ρ_d выражена плотность образца сухого сложения, нормированная на плотность воды. Подстрочные индексы s , m , b , t и u в (1), (2) и в последующих выражениях обозначают влажную почву, органо-минеральную компоненту почвы, связанную (адсорбированную), рыхлосвязанную (пленочную) и свободную (капиллярную) почвенную воду соответственно. В свою очередь, M_{t1} и M_{t2} обозначают предельно возможное количество связанной воды и предельно возможное суммарное количество связанной и пленочной воды в конкретном типе почвы соответственно.

На рис. 1 показана зависимость приведенного коэффициента преломления $(n_s - 1)/\rho_d$ и приведенного коэффициента затухания κ_s/ρ_d образца от весовой влажности M на различных частотах при температуре 20 °С. Из рисунка видно, что всю совокупность точек можно разделить на три участка, а именно участок от $M = 0$ до значения $M = M_{t1}$ — связанная вода, участок от $M = M_{t1}$ до $M = M_{t2}$ — пленочная влага и участок выше $M = M_{t2}$ — свободная почвенная влага.

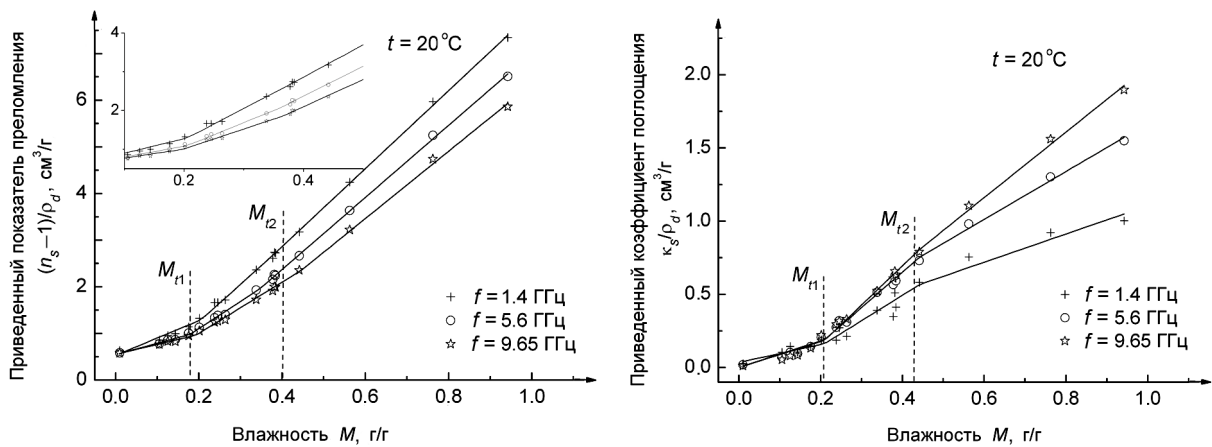


Рис. 1. Зависимости приведенного показателя преломления и приведенного коэффициента поглощения от влажности почвы при температуре 20 °С

На рис. 2 приведены зависимости максимального количества связанной (M_{t1}) и совокупности связанной и пленочной (M_{t2}) влаги в образце от температуры.

Проведя регрессионный анализ данных на рис. 2, получим выражения для определения количества связанной и пленочной влаги в данном образце при определенной температуре:

$$M_{t1}(T) = 0.258 - 0.0003t(^\circ\text{C}), \quad -5^\circ\text{C} \leq t \leq 25^\circ\text{C};$$

$$M_{t2}(T) = 0.418 - 0.0008t(^\circ\text{C}), \quad -5^\circ\text{C} \leq t \leq 25^\circ\text{C}.$$

Значения действительной n_p и мнимой κ_p частей (КДП) выражаются через действительную ε'_p и мнимую ε''_p части КДП по следующим формулам:

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

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

Действительная и мнимая части КДП в выражениях (3) для почвенной воды определяются через уравнения Дебая [12] для непроводящих жидкостей, которые учитывают только токи смещения:

$$\begin{aligned} \varepsilon'_p &= \frac{\varepsilon_{0pL} - \varepsilon_{0pM}}{1 + (2\pi f \tau_{pL})^2} + \frac{\varepsilon_{0pM} - \varepsilon_{0pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pM})^2} + \frac{\varepsilon_{0pH} - \varepsilon_{\infty pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pH})^2} + \varepsilon_{\infty pH}, \\ \varepsilon''_p &= \frac{\varepsilon_{0pL} - \varepsilon_{0pM}}{1 + (2\pi f \tau_{pL})^2} 2\pi f \tau_{pL} + \frac{\varepsilon_{0pM} - \varepsilon_{0pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pM})^2} 2\pi f \tau_{pM} + \frac{\varepsilon_{0pH} - \varepsilon_{\infty pH}}{1 + (2\pi f \tau_{pH})^2} 2\pi f \tau_{pH}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь ε_{0pL} , ε_{0pM} , ε_{0pH} – низкочастотные пределы КДП; $\varepsilon_{\infty pH}$ – высокочастотный предел КДП; а τ_{pL} , τ_{pM} или τ_{pH} – времена релаксации для различных релаксаций соответственно; все эти параметры должны быть отнесены к связанной ($p = b$), пленочной ($p = t$) и капиллярной ($p = u$) почвенной влаге; $\varepsilon_r = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума. Для определения КДП в случае связанной почвенной влаги используется трехрелаксационное уравнение (4), в случае пленочной почвенной влаги – двухрелаксационное уравнение Дебая, которое следует из (4) при $\varepsilon_{0uL} = \varepsilon_{0uM}$, наконец, в случае капиллярной почвенной влаги – однорелаксационное уравнение Дебая, которое следует из (4) при $\varepsilon_{0uL} = \varepsilon_{0uM} = \varepsilon_{0uH}$.

Для расчета спектров КДП влажных образцов воспользуемся следующими формулами, которые учитывают как токи смещения, с помощью выражений (1) – (4), так и токи проводимости через использование в качестве параметров модели омических проводимостей почвенной воды:

$$\begin{aligned} \varepsilon'_s &= n_s^2 - \kappa_s^2, \\ \varepsilon''_s &= \begin{cases} 2n_s \kappa_s + \rho_d(M) M \sigma_b / 2\pi f \varepsilon_r, & 0 \leq M \leq M_{t1}, \\ 2n_s \kappa_s + \rho_d(M) [M_{t1} \sigma_b + (M - M_{t1}) \sigma_t] / 2\pi f \varepsilon_r, & M_{t1} \leq M \leq M_{t2}, \\ 2n_s \kappa_s + \rho_d(M) [M_{t1} \sigma_b + M_{t2} \sigma_t + (M - M_{t2}) \sigma_u] / 2\pi f \varepsilon_r, & M \geq M_{t2}. \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь σ_b , σ_t и σ_u – омические проводимости связанной, пленочной и капиллярной почвенной воды.

При определении параметров модели оказалось, что достаточно использовать только несколько спектров для влажностей из 17 имеющихся. Для этого необходимо, чтобы измеренные спектры КДП для выбранных значений влажности соответствовали присутствию в образце только связанной воды, связанной и пленочной, а также всех трех типов почвенной влаги. Ранее в [2] были определены необходимые для создания модели приведенные действительная и мнимая части КДП для органоминеральной компоненты почвы $(n_m - 1)/\rho_m = 0.47$ и $\kappa_m/\rho_m = 0.006$.

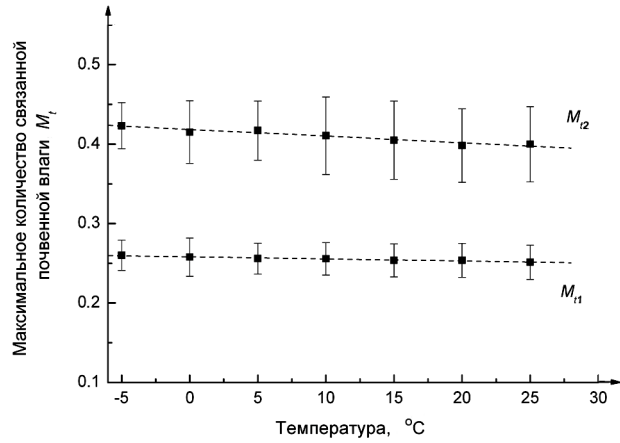


Рис. 2. Зависимости максимального количества прочносвязанной M_{t1} и связанной M_{t2} влаги в почве от температуры

Далее, применяя вышеописанную методику, развитую в [9], с помощью измеренных диэлектрических спектров, показанных на рис. 3, определялись спектроскопические параметры связанной, пленочной и капиллярной почвенной влаги. Температурные зависимости спектроскопических параметров приведены на рис. 4–6.

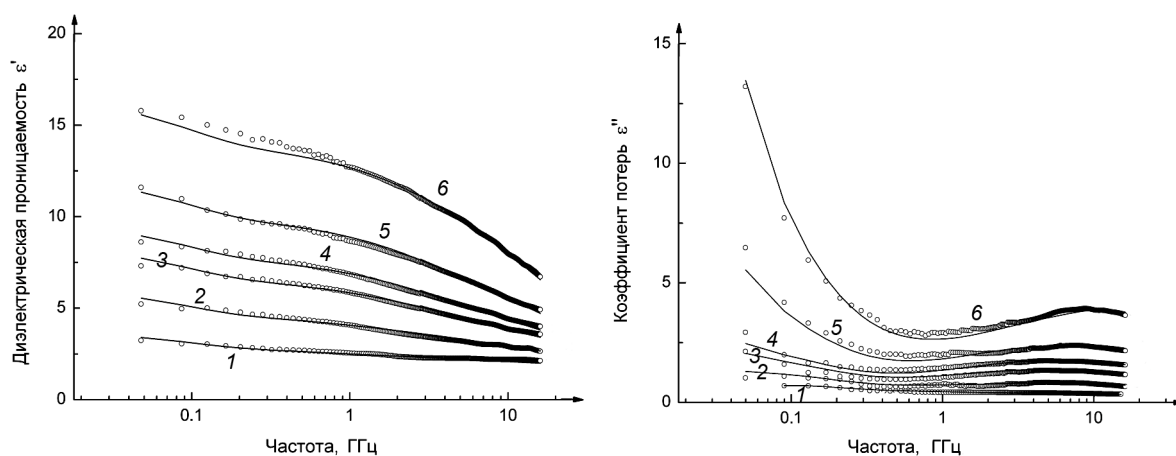


Рис. 3. Экспериментальные спектры действительной и мнимой частей КДП (символы) и их расчеты с применением ОРДМ (линии). Данные соответствуют массовым влажностям M ($\text{см}^3/\text{см}^3$): кр. 1 – 0.144, кр. 2 – 0.1764, кр. 3 – 0.264, кр. 4 – 0.338, кр. 5 – 0.442, кр. 6 – 0.563

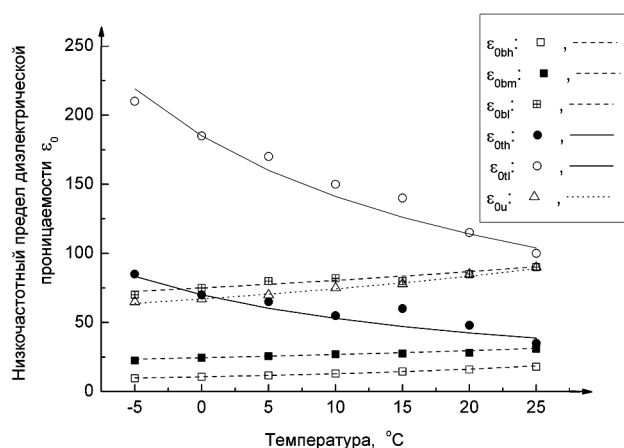


Рис. 4. Зависимость низкочастотного предела диэлектрической проницаемости для различных типов почвенной влаги от температуры

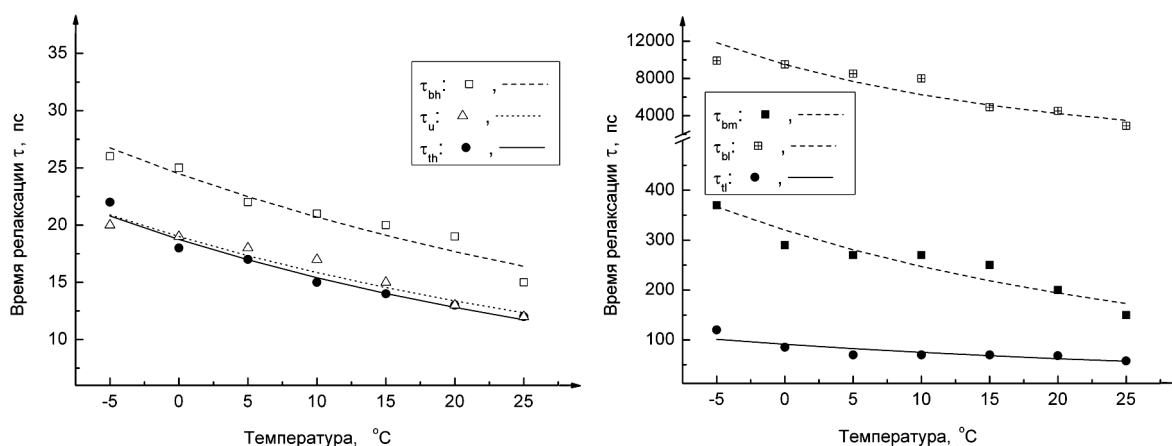


Рис. 5. Зависимость времен релаксации для различных типов почвенной влаги от температуры

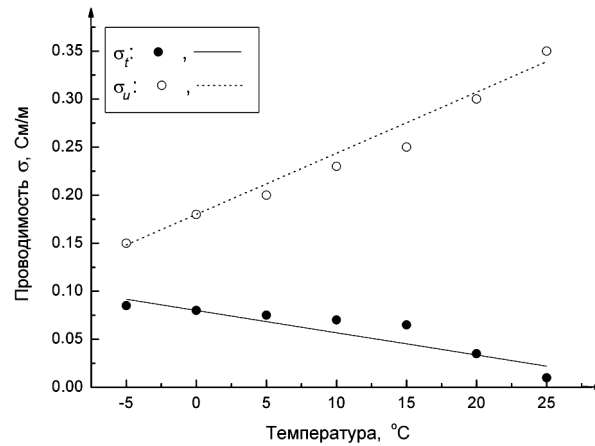


Рис. 6. Проводимости для различных типов почвенной влаги от температуры

Значения найденных параметров многорелаксационной модели приведены в табл. 2. В дополнение к данным табл. 2 использовались известные [1] значения $\varepsilon_{срН} = 4.9$. Рассчитанные с помощью этих параметров и формул (1) – (5) диэлектрические спектры показаны линиями на рис. 3. Как следует из табл. 2, связанная вода в данном случае имеет три релаксации, а не две, как описано ранее в работе [9]. Это можно объяснить наличием в области связанной воды, для данной почвы, двух слоев, т.е. двух типов влаги, отличающихся по диэлектрическим свойствам, так как низкочастотная релаксация (релаксация Максвелла – Вагнера) возникает в неоднородных диэлектриках, когда носители заряда захватываются на границах диэлектрических слоев, существующих на поверхностях пленок воды различного типа.

Таблица 2

Спектроскопические параметры многорелаксационной диэлектрической модели для исследуемого образца

Параметр	Единицы	Связанная вода			Капиллярная вода	Пленочная вода	
p	Индексы	b			u	t	
Релаксация		1	2	3	1	1	2
$\varepsilon_{0p}(T_{св0p})$	-	75	24.5	10.7	67	185	70
β_{v0p}	1/K	$+2.68 \cdot 10^{-3}$	$+1.03 \cdot 10^{-3}$	$+4.53 \cdot 10^{-3}$	$-5.93 \cdot 10^{-3}$	$-5.21 \cdot 10^{-4}$	$-1.36 \cdot 10^{-3}$
$T_{св0p}$	°C	0	0	0	0	0	0
$\Delta H_p/R$	K	2957	1719	1020	1120	1234	1242
$\Delta S_p/R$	-	0.06	1.21	1.2	0.58	1.73	0.12
$\sigma_p(T_{свp})$	См/м	0			$+6.36 \cdot 10^{-3}$	$-2.32 \cdot 10^{-3}$	
$\beta_{свp}$	(См/м)/K	0			0.18	0.08	
$T_{свp}$	°C	0			0	0	

Отдельный интерес представляет проводимость σ (см. рис. 6 и табл. 2). Для связанной воды она близка к нулю, и это может означать, что соли, содержащиеся в образце, не растворимы в связанной воде. В пленочной воде появляется проводимость, но достаточно низкая. В капиллярной же воде наблюдается высокая проводимость из-за растворения различных органических веществ, содержащихся в данной почве.

Погрешность многорелаксационной ОРДМВП

На рис. 7 представлены зависимости измеренных значений КДП от рассчитанных значений этой величины. Оценка статистической погрешности расчетов КДП проводилась через коэффициент Пирсона ρ и стандартное отклонение σ , соответствующие линейной регрессии (сплошные линии) для данных на рис. 7. Значения коэффициентов ρ и σ приведены в табл. 3. Здесь же даны уравнения линейной регрессии, которые позволяют оценить систематическую погрешность (отклонение линии регрессии от биссектрисы). Как видно из сравнения представленных результатов с анализом погрешности в [2, 3], созданная многорелаксационная ОРДМ обеспечивает возмож-

ность проводить расчеты КДП в ближнем гигагерцовом и дальнем мегагерцовом диапазонах частот с меньшей погрешностью, чем однорелаксационная модель.

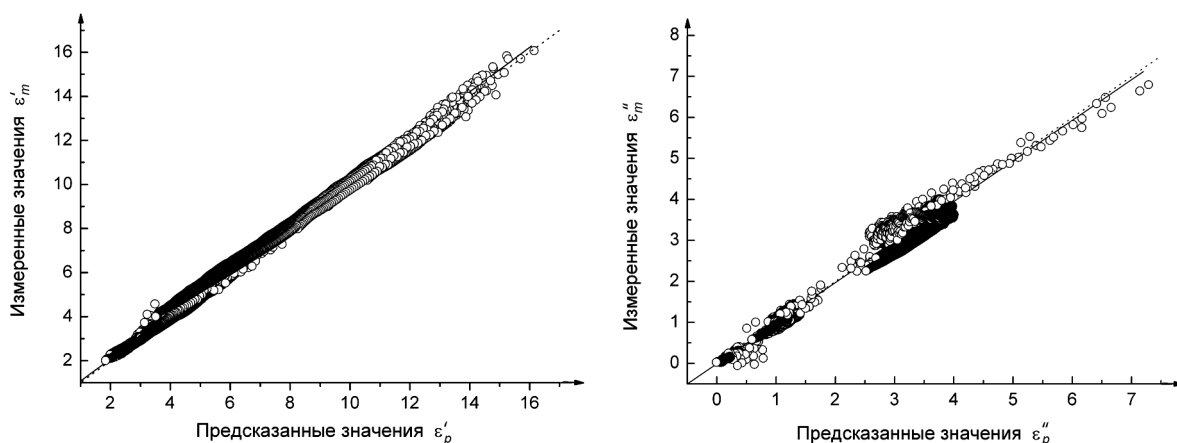


Рис. 7. Корреляция предсказанных ε'_p , ε''_p и измеренных ε'_m , ε''_m значений ДП и КП (точки). Пунктирная линия – биссектриса (идеальный случай, прогнозы не имеют ошибок). Сплошная линия – линейная регрессия

Таблица 3

Оценки погрешности полученной многорелаксационной диэлектрической модели

Линейная регрессия ε'	$\varepsilon'_m = -0.048 + 1.02 \cdot \varepsilon'_p$	Линейная регрессия ε''	$\varepsilon''_m = -0.022 + 1.015 \cdot \varepsilon''_p$
ρ	0.999	ρ	0.997
σ	0.144	σ	0.151

Заключение

В данной работе была построена температурная многорелаксационная ОРДМ арктической почвы для расчета спектров КДП в диапазоне частот от 0.04 до 16 ГГц при температурах от -5 до $+25$ °С, т.е. частотный диапазон модели расширен почти на два порядка по сравнению с однорелаксационной моделью, полученной в [2]. Применение модели с одной релаксацией ограничено диапазоном 1–16 ГГц, так как на частотах ниже 1 ГГц погрешности модели достигают, как показывают оценки экспериментальных данных, 300–400 %. Погрешности же предлагаемой диэлектрической модели, использующей двух- и трехрелаксационные спектры для комплексной диэлектрической проницаемости пленочной и связанной воды в почве, не превышают погрешностей экспериментальных измерений во всем диапазоне частот. Кроме того, в работе показано, что в связанной почвенной влаге присутствуют три релаксации, что может означать присутствие двух типов межслоевой релаксации Максвелла – Вагнера, т.е. наличия в данном типе почвы еще одного типа влаги. В дальнейшем планируется расширение созданной температурной многорелаксационной ОРДМВП в сторону отрицательных температур, так же, как в работе [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mironov V.L., Dobson M.C., Kaupp V.H., et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. – 2004. – V. 42. – No. 4. – P. 773–785.
2. Mironov V.L., De Roo R.D., and Savin I.V. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – Jun. 2010. – V. 48. – No. 6. – P. 2544–2556.
3. Миронов В.Л., Савин И.В. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 9/3. – С. 241–246.
4. Mironov V.L., Kosolapova L.G., and Fomin S.V. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – Jul. 2009. – V. 47. – No. 7. – Part 1. – P. 2059–2070.
5. Dobson M.C., Ulaby F.T., Hallikainen M.T., and El-Raies M.A. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. – 1985. – V. 23. – No. 1. – P. 35–46.
6. 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.
7. Бобров П.П., Миронов В.Л., Кондратьева О.В., Репин А.В. // XII Междунар. конф. «Физика диэлектриков». Санкт-Петербург, Россия, 23–26 мая 2011. – СПб., 2011. – Т. 1. – С. 207–209.
8. Kremer F., Schonhals A., and Luck W. Broadband Dielectric Spectroscopy. – Springer Verlag, 2002.

9. Миронов В.Л., Бобров П.П., Фомин С.В., Каравайский А.Ю. // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 3. – С. 75–79.
10. Эпов М.И., Бобров П.П., Миронов В.Л. и др. // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50. – № 5. – С. 613–618.
11. Комаров С.А., Миронов В.Л., Лукин Ю.И. // Изв. вузов. Физика. – 2006. – Т. 49. – № 9. – С. 29–34.
12. Ахатов Я.Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 412 с.
13. Mironov V.L., Bobrov P.P., Kosolapova L.G., et al. // Proc. IGARSS'06. – Denver, USA, 2006. – V. 6. – P. 2957–2961.

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

Поступила в редакцию 30.12.13.

**Сибирский государственный аэрокосмический университет

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

***Национальный исследовательский Томский государственный университет,

г. Томск, Россия

E-mail: rsd@ksc.krasn.ru