

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТАЛОЙ И МЕРЗЛОЙ
ОРГАНИЧЕСКОЙ ПОЧВЫ НА ЧАСТОТЕ РАДИОМЕТРА AMSR

© 2015 г. В. Л. Миронов, Л. Г. Косолапова*, И. В. Савин

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск

**E-mail: rsdvk@ksc.krasn.ru*

Поступила в редакцию 14.03.2014 г.

Создана простая одночастотная диэлектрическая модель талой и мерзлой арктической почвы для частоты 6.9 ГГц. Модель создана на основе лабораторных диэлектрических измерений образцов почвы, содержащей 80–90% органического вещества, в диапазоне гравиметрических влажностей от 0.01 до 0.942 г/г (объемных влажностей от 0.007 до 0.573 см³/см³), температур – от +25 до –30°С в режиме замораживания. В качестве уравнения регрессии для измеренных значений комплексного показателя преломления почвы в зависимости от влажности использовалась рефракционная модель смеси. Из регрессионного анализа были определены комплексные показатели преломления различных компонентов почвы (минерало-органической компоненты, связанной, переходной и свободной воды (льда для мерзлой почвы)), а также величины для максимально допустимого содержания связанной и переходной воды в почве при всех измеренных температурах. Получены эмпирические зависимости комплексного показателя преломления компонентов почвы и максимально допустимых содержаний различных типов воды в почве от температуры. В результате была построена модель, которая позволяет рассчитывать диэлектрическую проницаемость талой и мерзлой органической почвы в зависимости от влажности и температуры на частоте 6.9 ГГц. Среднеквадратическая ошибка для действительной части комплексной диэлектрической проницаемости почвы составила 0.20, а для мнимой – 0.22, при значениях коэффициента детерминации 0.999 и 0.995 соответственно.

Ключевые слова: органическая почва, влажность, диэлектрическая модель, талая и мерзлая почва, радиометр AMSR, 6.9 ГГц

DOI: 10.7868/S0205961415050061

ВВЕДЕНИЕ

Радиометр AMSR-E, измеряющий яркостные температуры микроволнового излучения Земли на частотах 6.9, 10.65, 18.7, 23.8, 36.5 и 89.0 ГГц на вертикальной и горизонтальной поляризациях в полосе шириной 1450 км, действовал на борту спутника Aqua с мая 2002 по октябрь 2011 г. Он был остановлен в связи с увеличением трения вращения, а в декабре 2012 г. снова запущен в эксплуатацию на более низкой скорости вращения, и информация, измеряемая им, снова доступна пользователям. Кроме того, в мае 2012 г. запущен и действует по настоящее время японский спутник GCOM-W1 с радиометром AMSR2, который проводит измерения на семи частотах (6.9, 7.3, 10.65, 18.7, 23.8, 36.5 и 89.0 ГГц) (http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_W/index.html). Для восстановления влажности поверхности суши более всего подходит самая низкая частота 6.9 ГГц, так как она наиболее чувствительна к воде. Во всех алгоритмах восстановления влажности почвы из измерений яркостной температуры земли используются диэлектрические модели влажной

почвы (Mladenova et al., 2014). В составе алгоритма обработки данных космического аппарата SMOS в настоящее время функционирует недавно разработанная В.Л. Мироновым с соавт. (Mironov, Fomin, 2009) диэлектрическая модель для влажных почв, которая позволяет рассчитывать комплексную диэлектрическую проницаемость (КДП) талых минеральных почв с различным гранулометрическим составом – в зависимости от влажности и температуры почвы в диапазоне частот от 0.3 до 26.5 ГГц.

Почвы приполярной Арктики имеют высокое содержание органики. Значительный запас мертвых растительных остатков в тундрах обусловлен замедленной минерализацией опада, бедностью бактериальной флоры, неблагоприятными почвенными температурами. Верхний, органогенный, горизонт арктической тундры содержит более 30% органического углерода (Розанов, 1975). Присутствие органики оказывает существенное влияние на диэлектрические свойства влажных почв. Известные формулы, связывающие диэлектрическую проницаемость органических почв с

Таблица 1. Плотность сухого сложения почвы, ρ_d , г/см³. Гравиметрическая влажность относительно веса сухого образца, m_g , г/г. Объемная влажность m_v , см³/см³, относительно объема сухого образца

m_g	0.01	0.106	0.126	0.144	0.176	0.202	0.237	0.245	0.263	0.339	0.377	0.385	0.382	0.441	0.562	0.763	0.942
ρ_d	0.666	0.622	0.625	0.591	0.604	0.568	0.564	0.567	0.566	0.581	0.564	0.574	0.595	0.601	0.596	0.603	0.608
m_v	0.007	0.066	0.079	0.085	0.106	0.115	0.134	0.139	0.149	0.197	0.213	0.221	0.227	0.265	0.335	0.46	0.573

влажностью, разрабатывались для калибровки промышленно выпускаемых рефлектометров, предназначенных для измерения влажности талых почв в мегагерцовом диапазоне частот (Торр et al., 1989; Scierucha, 2000; Pumpanen, Pavesniemi, 2005). В гигагерцовом диапазоне частот ранее Мироновым с соавторами (Mironov et al., 2010; Миронов и др., 2010) была создана многочастотная (частота изменяется от 1.0 до 16.0 ГГц) модель богатой органикой арктической почвы в талом и мерзлом состояниях для диапазонов температур $-7^\circ\text{C} \leq T \leq 25^\circ\text{C}$ и $-30^\circ\text{C} \leq T \leq -7^\circ\text{C}$ соответственно. В этой модели влажностные зависимости описываются рефракционной моделью, частотные – уравнениями Дебая, а температурные – уравнениями Клаузиуса–Мосотти, Дебая и уравнением для температурного коэффициента ионной проводимости. В результате она содержит довольно много параметров и не очень удобна для практического использования. Кроме того, в многочастотной модели (Mironov et al., 2010; Миронов и др., 2010) вследствие выбранного способа замораживания почвы температура замерзания почвы оказалась равной -7°C , в то время как в природных условиях температура замерзания почвы может изменяться в диапазоне отрицательных температур в пределах от десятых долей градусов Цельсия до нескольких градусов.

В настоящей работе предлагается более простая одночастотная (6.9 ГГц) температурно-зависимая диэлектрическая модель для этой же арктической почвы. При этом, благодаря применению другой технологии замораживания почвенных образцов, созданная диэлектрическая модель для замерзшей почвы применима в диапазоне температур $-30^\circ\text{C} \leq T \leq -1^\circ\text{C}$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И РЕФРАКЦИОННАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СМЕСИ

Для диэлектрических измерений был выбран образец почвы (кустарниковая тундра), взятый сотрудниками Мичиганского университета вблизи оз. Тулик (Аляска) в ходе полевых работ 2004 г. (De Roo et al., 2006). Содержание органического вещества в этой почве составляет 80–90%, в минеральной составляющей доминирует кальцит

~60–70%, присутствует кварц ~20–30%, отмечаются следы слюды, плагиоклаза, каолинита. Диэлектрические свойства почвы были измерены в области частот от 1 до 16 ГГц, гравиметрическая влажность изменялась от 0.01 до 0.942 г/г (объемная влажность при этом изменялась от 0.007 до 0.573 см³/см³), температура варьировала от +25 до -30°C с шагом 5 и 2°C в зависимости от измеряемого локального диапазона. Плотность сухого сложения почвы *in vivo* равнялась 0.254, в то время как *in vitro* средняя плотность сухой почвы составляла 0.597 г/см³. Плотность сухого сложения почвы варьировала от образца к образцу, поскольку плотность наполнения измерительной ячейки зависела от влажности почвы (табл. 1).

Измерения комплексной диэлектрической проницаемости проводились с помощью векторного анализатора цепей ZVK фирмы Rohde & Schwarz. Методика измерений описана в работе (Mironov et al., 2010).

Так же, как и в работе (Mironov et al., 2010), будем анализировать комплексную диэлектрическую проницаемость почвы ε в терминах приведенного комплексного показателя преломления (КПП)

$$(n^* - 1)/\rho_d = (\sqrt{\varepsilon} - 1)/\rho_d = (n - 1)/\rho_d + ik/\rho_d, \quad (1)$$

где $n = \text{Re}\sqrt{\varepsilon}$ и $k = \text{Im}\sqrt{\varepsilon}$ – действительная и мнимая части КПП соответственно; ρ_d – плотность сухого сложения почвы, размерность г/см³.

На рис. 1 представлены результаты измерений приведенного комплексного показателя преломления в диапазонах температур $-5^\circ\text{C} \leq T \leq 25^\circ\text{C}$ и $-30^\circ\text{C} \leq T \leq 7^\circ\text{C}$ для талой и мерзлой почв соответственно. Наряду с результатами измерений приведенного комплексного показателя преломления на рис. 1 представлены линии регрессии, полученные с использованием обобщенной рефракционной диэлектрической модели смеси (2) и (3) в том виде, в каком она приведена в работе (Mironov et al., 2010).

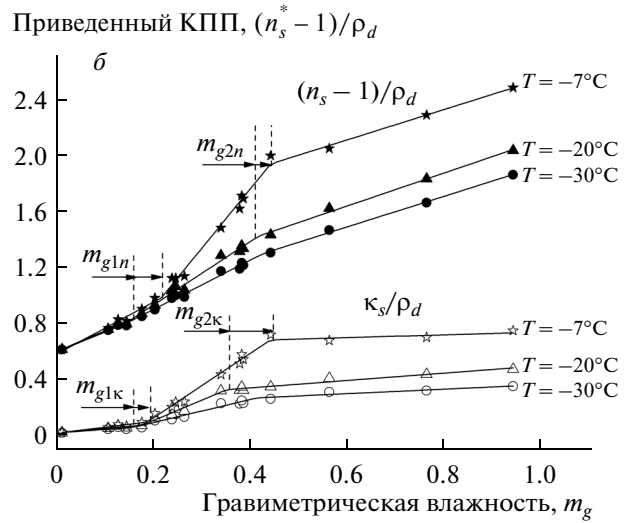
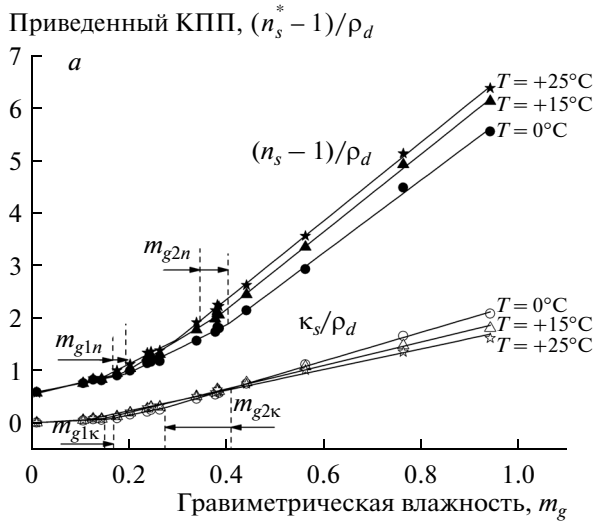


Рис. 1. Зависимости приведенного комплексного показателя преломления (КПП) почвы от гравиметрической влажности при различных температурах, T (значения указаны на графиках) на частоте 6.9 ГГц: *a* – талая почва, *б* – мерзлая почва.

$$\frac{n_s - 1}{\rho_d(m_g)} = \begin{cases} \frac{n_m - 1}{\rho_m} + \frac{(n_b - 1)}{\rho_b} m_g; & m_g \leq m_{g1n}, \\ \frac{n_m - 1}{\rho_m} + \frac{(n_b - 1)}{\rho_b} m_{g1n} + \frac{(n_t - 1)}{\rho_t} (m_g - m_{g1n}); & m_{g1n} \leq m_g \leq m_{g2n}, \\ \frac{n_m - 1}{\rho_m} + \frac{(n_b - 1)}{\rho_b} m_{g1n} + \frac{(n_t - 1)}{\rho_t} (m_{g2n} - m_{g1n}) + \frac{n_{l,i} - 1}{\rho_{l,i}} (m_g - m_{g2n}); & m_g \geq m_{g2n}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{\kappa_s}{\rho_d(m_g)} = \begin{cases} \frac{\kappa_m}{\rho_m} + \frac{\kappa_b}{\rho_b} m_g; & m_g \leq m_{g1k}, \\ \frac{\kappa_m}{\rho_m} + \frac{\kappa_b}{\rho_b} m_{g1k} + \frac{\kappa_t}{\rho_t} (m_g - m_{g1k}); & m_{g1k} \leq m_g \leq m_{g2k}, \\ \frac{\kappa_m}{\rho_m} + \frac{\kappa_b}{\rho_b} m_{g1k} + \frac{\kappa_t}{\rho_t} (m_{g2k} - m_{g1k}) + \frac{\kappa_{l,i}}{\rho_{l,i}} (m_g - m_{g2k}); & m_g \geq m_{g2k}. \end{cases} \quad (3)$$

Индексы s, d, m, b, t, l и i обозначают влажную почву, сухую почву, органико-минеральную компоненту почвы, связанную, переходную, свободную (жидкую) воду и лед соответственно; m_{g1n}, m_{g1k} и m_{g2n}, m_{g2k} – величины для максимально допустимого содержания связанной воды и общего максимально допустимого содержания связанной и переходной воды, определенные из влажностных зависимостей действительной (m_{g1n}, m_{g2n}) и мнимой (m_{g1k}, m_{g2k}) частей приведенного КПП соот-

ветственно. Согласно формулам (2) и (3), при вычислении действительной или мнимой частей КПП, когда влажность образца возрастает, учитывается присутствие в образце только связанной компоненты почвенной воды, если выполняются неравенства $m_g \leq m_{g1n}$ или $m_g \leq m_{g1k}$, двух компонент почвенной воды (связанной и переходной), если выполняются неравенства $m_{g1n} < m_g \leq m_{g2n}$ или $m_{g1k} < m_g \leq m_{g2k}$, и всех трех компонент (связанной, переходной и свободной) почвенной воды, если выполняются неравенства $m_{g2n} < m_g$ или $m_{g2k} < m_g$.

На рис. 1 вертикальные линии показывают границы изменения m_{g1n}, m_{g2n} и m_{g1k}, m_{g2k} в зависимости от температуры. При этом оказывается, что границы, определенные по измерениям действительной (m_{g1n}, m_{g2n}) и мнимой (m_{g1k}, m_{g2k}) частей комплексного показателя преломления, не совпадают. Это явление может быть результатом различного влияния дипольной поляризации и ионной проводимости почвенной влаги на значения действительной и мнимой частей КПП почвы.

Как видно из рис. 1, линии регрессии, определенные с использованием формул (2), (3), очень хорошо описывают измеренные значения. Эти зависимости имеют вид кусочно-ломаных линий, каждый сегмент которых соответствует присутствию определенной комбинации компонентов почвенной воды. При этом изменение влажности в каждом сегменте может происходить только за счет одного компонента почвенной воды. Согласно формулам (2), (3), с помощью регрессионного анализа можно определить значения параметров $(n_q - 1)/\rho_q$ и κ_q/ρ_q , соответствующих минерало-органической компоненте почвы ($q = m$) и

всем типам воды в почве ($q = b, t, l, i$), а также значения для максимально допустимого содержания связанной воды ($m_{g1n}, m_{g1к}$) и общего максимально допустимого содержания связанной и переходной ($m_{g2n}, m_{g2к}$) воды как функции температуры.

Параметры $m_{g1n}, m_{g2n}, (n_m - 1)/\rho_m, (n_b - 1)/\rho_b, (n_t - 1)/\rho_t, (n_{l,i} - 1)/\rho_{l,i}, m_{g1к}, m_{g2к}, \kappa_m/\rho_m, \kappa_b/\rho_b, \kappa_t/\rho_t$ и $\kappa_{l,i}/\rho_{l,i}$ были определены при температурах $-5, 0, 5, 10, 15, 20, 25^\circ\text{C}$ и $-30, -25, -20, -15, -10, -7^\circ\text{C}$ в случае талых и мерзлых почв соответственно. После этого полученные значения параметров были аппроксимированы как функции температуры полиномами первой, второй и третьей степени отдельно для талых и мерзлых почв.

А) Талая почва ($-5^\circ\text{C} \leq T \leq 25^\circ\text{C}$)

$$\begin{aligned}
 m_{g1n} &= 0.214 + 2.77 \times 10^{-4}T - \\
 &- 1.952 \times 10^{-4}T^2 + 5.111 \times 10^{-6}T^3; \\
 m_{g2n} &= 0.405 + 7.524 \times 10^{-4}T - 1.276 \times 10^{-4}T^2; \\
 (n_m - 1)/\rho_m &= 0.56 - 0.0017T + 3.076 \times 10^{-5}T^2; \\
 (n_b - 1)/\rho_b &= 2.067 + 0.02566T - \\
 &- 0.0013T^2 + 3.571 \times 10^{-5}T^3; \\
 (n_t - 1)/\rho_t &= \\
 &= 4.566 + 0.11T - 0.0012T^2 - 5.715 \times 10^{-5}T^3; \quad (4) \\
 (n_{l,i} - 1)/\rho_{l,i} &= 6.82 + 0.0648T - 0.00155T^2; \\
 m_{g1к} &= 0.163 + 3.286 \times 10^{-4}T - 3.429 \times 10^{-5}T^2; \\
 m_{g2к} &= 0.44; \\
 \kappa_m/\rho_m &= 0.00923 - 5.214 \times 10^{-5}T; \\
 \kappa_b/\rho_b &= 0.455 + 0.00664T; \\
 \kappa_t/\rho_t &= 2.0461 + 0.0483T - 0.00165T^2; \\
 \kappa_{l,i}/\rho_{l,i} &= 2.724 - 0.0503T.
 \end{aligned}$$

Формулы (1)–(4) представляют собой рефракционную модель комплексной диэлектрической проницаемости талой органической почвы на частоте 6.9 ГГц.

Б) Мерзлая почва ($-30^\circ\text{C} \leq T \leq -7^\circ\text{C}$)

$$\begin{aligned}
 m_{g1n} &= 0.2 + 0.0037T + 6 \times 10^{-5}T^2; \\
 m_{g2n} &= 0.461 + 0.00244T + 4.147 \times 10^{-5}T^2; \\
 (n_m - 1)/\rho_m &= 0.5554 - 0.00365T - 8.412 \times 10^{-5}T^2; \\
 (n_b - 1)/\rho_b &= 2.208 + 0.063T + 0.00124T^2; \\
 (n_t - 1)/\rho_t &= 5.839 + 0.2805T + 0.0049T^2; \\
 (n_{l,i} - 1)/\rho_{l,i} &= 1.0923 - 0.00126T; \quad (5) \\
 m_{g1к} &= 0.194 + 0.00126T;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m_{g2к} &= 0.499 + 0.01T + 2.365 \times 10^{-4}T^2; \\
 \kappa_m/\rho_m &= 0.00926 + 2.872 \times 10^{-5}T; \\
 \kappa_b/\rho_b &= 0.467 + 0.00724T; \\
 \kappa_t/\rho_t &= 2.783 + 0.0689T; \\
 \kappa_{l,i}/\rho_{l,i} &= 0.32 + 0.00516T.
 \end{aligned}$$

Формулы (1)–(5) представляют собой рефракционную модель КДП талой и мерзлой органической почвы на частоте 6.9 ГГц. Чтобы рассчитать комплексную диэлектрическую проницаемость органической почвы, нам достаточно задать гравиметрическую влажность, плотность сухого сложения почвы и температуру. Следует заметить, что в измерениях (Migonov et al., 2010) образец почвы замерзал при температуре -7°C . Такая задержка в температуре замерзания возникала из-за того, что образец почвы помещался в закрытом коаксиальном контейнере. По этой причине диэлектрическая модель (1)–(5) может быть использована для описания мерзлых и талых почв только в диапазонах температур $-30^\circ\text{C} \leq T \leq -7^\circ\text{C}$ и $-7^\circ\text{C} \leq T \leq 25^\circ\text{C}$ соответственно. Однако в природе температура замерзания почвы определяется многими факторами. В зависимости от содержания солей, кислот, капиллярной структуры почвы температура замерзания может изменяться в диапазоне отрицательных температур в пределах от десятых долей градусов Цельсия до нескольких градусов. Нами проведен дополнительный цикл измерений, в котором было отмечено замерзание исследуемой почвы при температуре -1°C . Это достигалось путем индуцирования первоначальных ядер кристаллизации при температуре -7°C , с осуществлением последующего процесса замораживания при температуре -1°C .

В следующем разделе с помощью этих данных будет показано, что формулы (5) и модель в целом могут быть использованы для мерзлой почвы в диапазоне температур $-30^\circ\text{C} \leq T \leq -1^\circ\text{C}$ для случая, когда почва замерзала при температуре -1°C .

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Были проведены расчеты комплексной диэлектрической проницаемости исследуемой органической почвы. Модельные расчеты КДП почвы в зависимости от объемной влажности были сопоставлены с измеренными значениями действительной, $\epsilon' = n^2 - \kappa^2$, и мнимой, $\epsilon'' = 2\kappa$, частей КДП для талой (рис. 2а) и мерзлой (рис. 2б) почвы. При этом на рис. 2 приведены измеренные значения, которые были использованы, чтобы получить формулы (5) и (6), представляющие диэлектрическую модель.

Из рис. 2 следует, что модель очень хорошо описывает как действительную, так и мнимую части комплексной диэлектрической проницаемо-

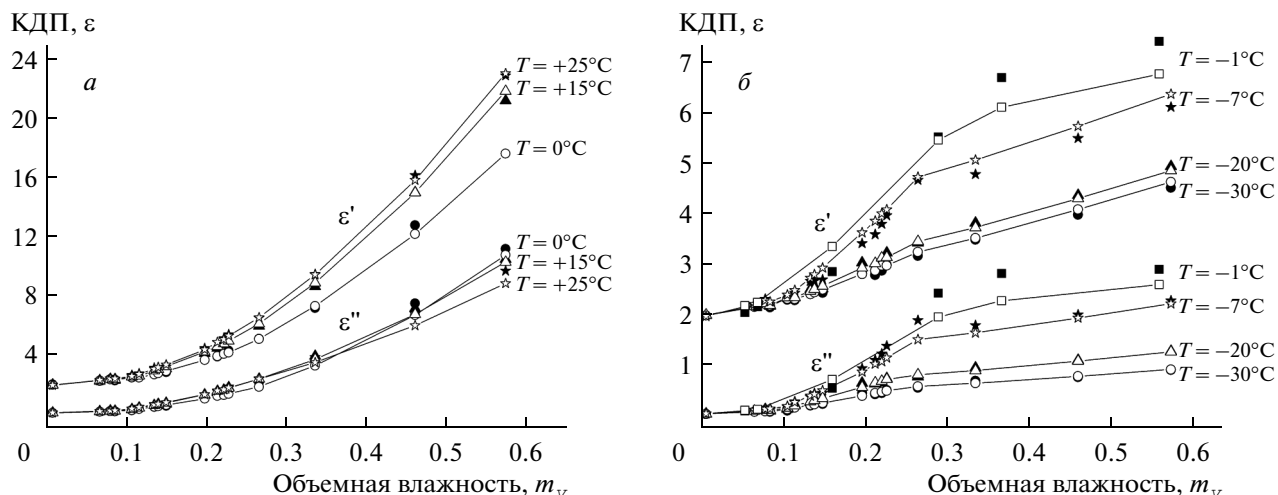


Рис. 2. Зависимости измеренной (заполненные символы) и рассчитанной по модели КДП (пустые символы) почвы от объемной влажности при различных температурах, T (значения указаны на графиках) и различных плотностях почвы (значения указаны в табл. 1): *a* – талая почва, *б* – мерзлая почва. Точки, соответствующие расчету, соединены отрезками прямой линии.

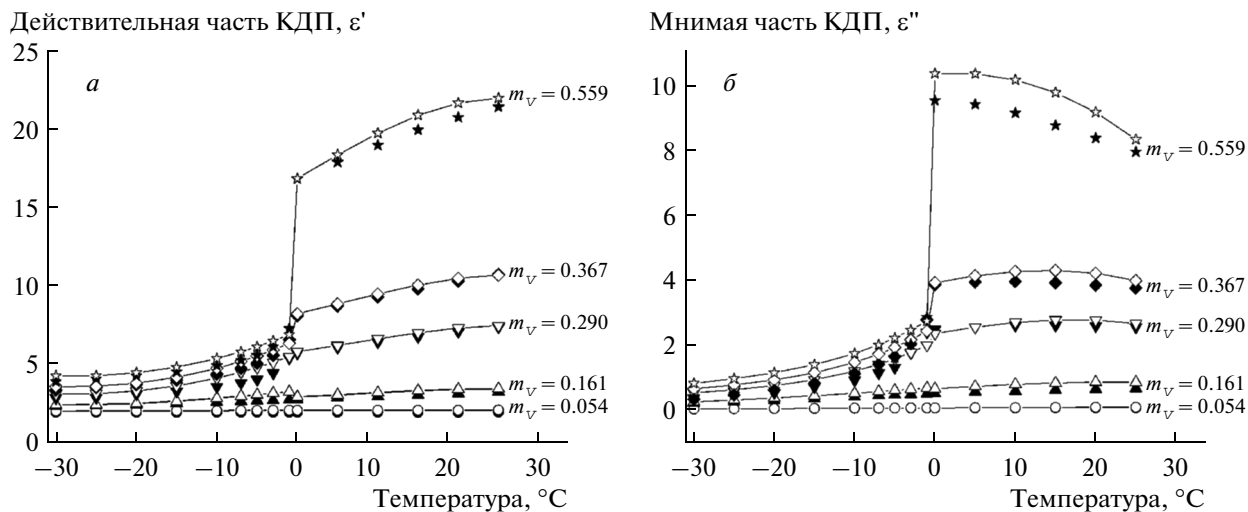


Рис. 3. Зависимости измеренной (заполненные символы) и рассчитанной (линии + пустые символы) комплексной диэлектрической проницаемости почвы от температуры при различных значениях объемной влажности m_v (значения указаны на графике): *a* – действительная часть КДП, *б* – мнимая часть КДП.

сти почвы в зависимости от ее влажности в диапазонах температур $-30^{\circ}\text{C} \leq T \leq -7^{\circ}\text{C}$ в случае мерзлой почвы и $0^{\circ}\text{C} \leq T \leq 25^{\circ}\text{C}$ в случае талой почвы.

Для того чтобы верифицировать предлагаемую диэлектрическую модель в расширенном диапазоне температур $-30^{\circ}\text{C} \leq T \leq -1^{\circ}\text{C}$, были проведены дополнительные измерения образцов почвы с различными влажностями при температуре замерзания почвы -1°C . Это достигалось путем индустрирования первоначальных ядер кристаллизации при температуре -7°C и последующем замораживании образца при температуре -1°C . В табл. 2 представлены гравиметрические влажности m_g , плотности сухого сложения ρ_d и объем-

ные влажности m_v образцов почвы, использованных в дополнительных измерениях.

Полученные таким образом данные диэлектрических измерений можно считать независи-

Таблица 2. Плотность сухой почвы, ρ_d , гравиметрическая, m_g , и объемная, m_v , влажности, наблюдаемые в дополнительном эксперименте с точкой замерзания, близкой к нулю

m_g	0.086	0.114	0.299	0.516	0.602	0.992
ρ_d	0.633	0.611	0.538	0.541	0.570	0.531
m_v	0.054	0.070	0.161	0.290	0.367	0.559

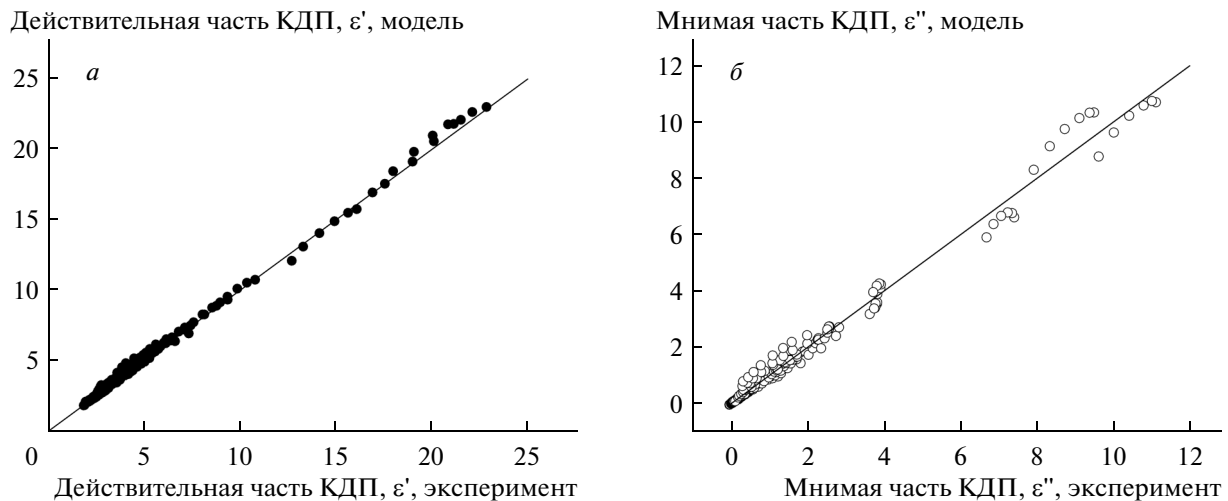


Рис. 4. Зависимость рассчитанных по модели значений комплексной диэлектрической проницаемости почвы от измеренных значений КДП почвы: *a* – для действительной части КДП, *б* – для мнимой части КДП. Сплошная линия – биссектриса.

мыми при тестировании созданной диэлектрической модели (2)–(5), включая интервал температур $-7^{\circ}\text{C} \leq T \leq -1^{\circ}\text{C}$.

На рис. 3 представлены зависимости измеренной и рассчитанной комплексной диэлектрической проницаемости почвы от температуры при различных влажностях (0.054, 0.161, 0.290, 0.367 и $0.599 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$). Как видно из рис. 3, значения комплексной и мнимой частей диэлектрической проницаемости почвы, измеренные и рассчитанные с помощью созданной диэлектрической модели, удовлетворительно согласуются друг с другом, включая интервал температур $-7^{\circ}\text{C} \leq T \leq -1^{\circ}\text{C}$.

Для оценки погрешности моделирования были использованы как результаты измерений, использованные для построения модели, так и результаты независимых измерений при температуре заморзания почвы -1°C при всех влажностях и температурах. На рис. 4 представлены расчетные значения действительной, ϵ' , и мнимой, ϵ'' частей КДП в зависимости от измеренных значений. Погрешности модели, рассчитанные как среднеквадратические отклонения расчетных значений от измеренных (RMSE), оказались равными 0.20 и 0.22 для действительной и мнимой частей КДП. При этом значения коэффициентов детерминации (R^2) были равны 0.999 и 0.995 соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе лабораторных диэлектрических измерений создана одночастотная диэлектрическая модель органической тундровой почвы, которая позволяет рассчитывать комплексную диэлектрическую проницаемость талой и мерзлой почвы в зависимости от влажности на частоте 6.9 ГГц в

диапазонах температур $-30^{\circ}\text{C} \leq T \leq -1^{\circ}\text{C}$ и $0^{\circ}\text{C} \leq T \leq 25^{\circ}\text{C}$. Для описания зависимости комплексного показателя преломления почвы от влажности использовалась рефракционная диэлектрическая модель смеси. Почва рассматривается как пятикомпонентная система, состоящая из минерало-органической компоненты, воздуха и трех типов воды (связанной, переходной и свободной). Параметрами рефракционной модели являются комплексные показатели преломления и величины максимально допустимого содержания различных типов воды в почве, определенные по результатам измерений комплексного показателя преломления почвенных образцов.

В результате сравнения рассчитанных по модели значений комплексной диэлектрической проницаемости с измеренными значениями получены оценки среднеквадратической ошибки, RMSE, для действительной ($\text{RMSE}_{\epsilon'} = 0.2$) и мнимой ($\text{RMSE}_{\epsilon''} = 0.22$) частей комплексной диэлектрической проницаемости при значениях коэффициента детерминации, равных 0.999 и 0.995 соответственно. Эта ошибка сравнима с погрешностями исходных измерений комплексной диэлектрической проницаемости влажной почвы. В дальнейшем мы предполагаем создать диэлектрическую модель арктических почв с различными пропорциями содержания органической и минеральной компонент.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Миронов В.Л., Савин И.В. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости тундровой почвы при заморзании воды в почвенных капиллярах // Изв. вузов. Физика. 2010. Т. 53. Т. 9. № 3. С. 241–246.

- Розанов Б.Г.* Генетическая морфология почв. М.: МГУ, 1975. 294 с.
- De Roo R.D., England A.W., Gu H., Pham H., Elsaadi H.* Groundbased radiobrightness observations of the active layer growth on the north slope near Toolik Lake, Alaska // Proc. IEEE IGARSS. Denver, CO. Jul. 31–Aug. 4, 2006. P. 2708–2711.
http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_W/index.html
- Kerr Ya.H., Waldteufel P., Richaume P., Wigneron J.-P., Ferrazzoli P., Mahmoodi A., Al Bitar A., Cabot F., Gruhier C., Juglea S.E., Leroux D., Mialon A., Delwart S.* The SMOS soil moisture retrieval algorithm // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2012. V. 50. № 5. P. 1384–1400.
- Mironov V.L., De Roo R.D., Savin I.V.* Temperature-dependent microwave dielectric model for an arctic soil // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2010. V. 48. № 6. P. 2544–2556.
- Mironov V.L., Fomin S.V.* Temperature and mineralogy dependent model for microwave dielectric spectra of moist soils // PIERS Proc. August 18–21. Moscow, 2009. P. 938–942.
- Mladenova I.E., Jackson T.J., Njoku E., Bindlish R., Chan S., Cosh M.H., Holme T.R.H., De Jeud R.A.M., Jones L., Kimball J., Paloscia S., Santi E.* Remote monitoring of soil moisture using passive microwave-based techniques – Theoretical basis and overview of selected algorithms for AMSR-E // Rem. Sens. Environ. 2014. V. 144. P. 197–213.
- Pumpanen J., Iivesniemi H.* Calibration of time domain reflectometry for forest humus soil layers // Boreal Environ. Res. 2005. V. 10. P. 589–595.
- Scierucha W.* Accuracy of soil moisture measurement by TDR technique // Int. Agrophysics. 2000. V. 14. P. 417–426.
- Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P.* Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines // Water Resour. Res. 1980. V. 16. № 3. P. 574–582.

Dielectric Model of Thawed and Frozen Organic Soil at the Frequency of AMSR Radiometer

V. L. Mironov, L. G. Kosolapova, I. V. Savin

Kirensky Institute of Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk

A simple single-frequency dielectric model of thawed and frozen arctic soil is created. The model is based on dielectric measurements of soil sample containing organic matter of 80–90%, gravity moistures ranging from 0.01 to 0.942 g/g, in the temperatures range from –30 to 25°C at the frequency of 6.9 GHz. The refractive mixture model is used as the regression equation to the measured values of the complex refractive index (CRI), depending on soil moisture. The CRIs of the various soil components (mineral-organic component, bound, transition and free water) and the maximum amount of bound water and the transition in the soil at all measured temperatures were determined from regression analysis. Then the empirical dependences of soil components CRIs and the maximum quantities of the various types of water on temperature were obtained. As a result, the model was constructed which allows to calculate the complex dielectric permittivity of the frozen and thawed organic soil, depending on the moisture and temperature at the frequency of 6.9 GHz. For the real and imaginary parts of CRP, the following estimates of the coefficient of determination, R^2 , and the root mean square error, RMSE, were obtained: $R^2 = 0.999$, RMSE = 0.20 (real part) and $R^2 = 0.995$, RMSE = 0.22 (imaginary part).

Keywords: organic soil, moisture, the dielectric model, thawed and frozen soil, radiometer AMSR, 6.9 GHz