

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.1.9>

УДК: 537.86, 528.88, 631.432.2

## МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫХ ПОЧВ, УЧИТЫВАЮЩАЯ МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ И СОДЕРЖАНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА

А. Ю. Каравайский, С. В. Фомин, Ю. И. Лукин

Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения РАН  
660036, Красноярск, ул. Академгородок 50, стр. 38

Статья поступила в редакцию 13 ноября 2023 г.

**Аннотация.** На основе рефракционной диэлектрической модели создана одночастотная диэлектрическая модель талых и мерзлых лесных почв корневой зоны, учитывающая влияние как минеральной, так и органической компоненты почвенной смеси. Модель разработана для частоты 435 МГц на основе диэлектрических измерений пяти почв, в которых содержание органического вещества варьировалось от 11,1 до 54,4 % и глины от 21,1 до 40,9 %. Диэлектрические измерения были проведены в диапазоне массовой влажности от сухого состояния до наименьшей влагоемкости и диапазоне температур от – 30 до 25 °С. В исследуемом диапазоне температур коэффициент детерминации между рассчитанными с использованием предложенной модели и измеренными значениями действительной ( $\epsilon'$ ) и мнимой ( $\epsilon''$ ) частями комплексной диэлектрической проницаемости составляет 0,988 – 0,997 для  $\epsilon'$  и 0,957 – 0,971 для  $\epsilon''$ . Нормированное среднеквадратическое отклонение при этом составило 6 – 5,6 % для  $\epsilon'$  и 20,2 – 21,2 % для  $\epsilon''$ . Разработанная диэлектрическая модель может быть применена в алгоритмах дистанционного зондирования при восстановлении значения влажности лесных почв корневой зоны из данных радарного и радиометрического зондирования.

**Ключевые слова:** диэлектрическая модель, влажность, температура, органическая почва, минеральная почва, мерзлая почва, талая почва.

**Финансирование:** работа выполнена в рамках научной тематики Госзадания ИФ СО РАН.

**Автор для переписки:** Каравайский Андрей Юрьевич, [rsdak@ksc.krasn.ru](mailto:rsdak@ksc.krasn.ru)

## Введение

Одной из важнейших задач современности становится определение количества воды, содержащейся в почвенном покрове Земли. Вода в почвах является составной частью водного баланса Земли и принята Всемирной метеорологической организацией в качестве одной из основных климатических переменных, требующих глобального спутникового и наземного мониторинга [1]. Основным инструментом восстановления влажности почвы из радарных и радиометрических наблюдений являются модели комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) почв  $\epsilon^* = \epsilon' + i\epsilon''$ . Здесь  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  – действительная часть КДП (далее диэлектрическая проницаемость (ДП)) и мнимая части КДП (далее коэффициент диэлектрических потерь (КП)) соответственно. На сегодняшний день существует большое разнообразие моделей КДП почв. Наибольшую популярность получили модели, предложенные в работах Добсона [2-4] и в работах Миронова [5, 6]. Кроме того, модели КДП почв в основном разрабатываются для группы почв, принадлежащих к одному типу, в которых основной компонентой являются либо минеральная составляющая, либо органическая составляющая [7, 8]. Моделей КДП почвы, в которых бы присутствовала как минеральная, так и органическая составляющая, не предлагалось. Имеются работы, в которых изучалось влияние органического вещества в минеральных почвах [9, 10]. При этом содержание органического вещества (гумуса) в исследуемых почвах не превышало 7 %. Особый интерес представляют естественные почвы, в которых присутствует как органическая, так и минеральная компоненты, поскольку данные почвы являются типичными для тундровых и лесных зон. В связи с этим, целью данного исследования

являлось улучшение существующей модели путем нахождения функциональных зависимостей параметров модели одновременно как от вариаций гранулометрического состава, так и от содержания органического вещества, при положительных и отрицательных температурах.

В качестве базовой модели для улучшения в данной работе взята рефракционная диэлектрическая модель, предложенная Мироновым с соавторами [7]. Выбранная модель, по сравнению с повсеместно используемой полуэмпирической моделью Добсона, показала более высокую точность описания влажностной зависимости КДП почв [11, 12]. Зависимость от влажности в рефракционной диэлектрической модели определяется не для КДП, а для комплексного показателя преломления (КПП)  $n_s^* = n_s + ik_s$ , где  $n_s$  и  $k_s$  – показатель преломления (ПП) и нормированный коэффициент затухания (НКЗ) электромагнитной волны в измеряемом образце соответственно. Величина КПП связана с КДП следующим соотношением:  $n_s^* = \sqrt{\epsilon_s^*} = \sqrt{\epsilon_s' + i\epsilon_s''}$ . В случае  $p$ -компонентной гетерогенной диэлектрической смеси рефракционная модель может быть записана следующим образом:

$$n_s^* = \sum_{i=1}^p n_i^* W_i, \quad (1)$$

где  $n_i^*$  – КПП  $i$ -ой компоненты смеси,  $W_i$  – относительная объемная доля  $i$ -ой компоненты смеси, которая определяется отношением объема занимаемого  $i$ -ой компоненты к объему всей смеси. В более ранних работах было показано, что в почве могут присутствовать различные типы почвенной воды, такие как прочносвязанная вода, рыхлосвязанная вода, несвязанная вода и лед. В таком случае рефракционная модель для КПП почвы может быть записана следующим образом:

$$n_s^* = n_d^* + (n_b^* - 1)W_b + (n_t^* - 1)W_t + (n_u^* - 1)W_u, \quad (2)$$

где индексы  $d$ ,  $b$ ,  $t$  и  $u$  обозначают соответственно сухую почву, прочносвязанную воду, рыхлосвязанную и несвязанную воду в почвах.

Преимущество рефракционной диэлектрической модели заключается в том, что она не только учитывает КПП всех типов почвенной воды, но и может

дать их количественную оценку, при этом опираясь не на эмпирические параметры, а на физические величины. Благодаря этому рефракционная модель и ранее использовалась в качестве базовой для разработки новых моделей КДП почв как авторами данной работы, так и сторонними исследователями [13-15]. Некоторые из таких моделей стали применяться на практике в алгоритмах обработки спутниковых данных на космических аппаратах SMOS и SMAP [16, 17]. Данные космические аппараты позволяют измерять влажность в поверхностном слое почвы глубиной до 5 см [18, 19]. С целью увеличения глубины мониторинга влажности почв, европейским космическим агентством планируется к запуску спутник BIOMAS, оснащенный радаром с рабочей частотой 435 МГц [20, 21], что создает технологическую возможность дистанционного зондирования влажности почвы глубиной до 10 см.

В тоже время в литературе слабо представлены исследования диэлектрических свойств почв на частоте 435 МГц, в частности нет таких исследований для лесных почв, в которых содержатся как минеральная, так и органическая компоненты. Ранее на частоте 435 МГц были предложены диэлектрические модели для минеральных [22, 23] и органических [24] талых и мерзлых почв, образцы которых были отобраны в тундре (Аляска, п-ов Ямал, п-ов Таймыр), а также для органических почв, отобранных в лесах Красноярской лесостепи с глубины до 10 см [25].

В настоящей статье предложена одночастотная модель КДП органо-минеральных почв, отобранных с глубины от 10 до 20 см, преимущественно соснового, березового, осинового, елового и смешанного лесов Красноярской лесостепи, на частоте 435 МГц.

## **1. Материалы и методы.**

Почвенные образцы были отобраны в виде цилиндрических кернов диаметром 110 мм и высотой 300 мм с поверхности почвы соснового, осинового, елового, смешанного и березового лесов Красноярской лесостепи, Пировского района, Красноярского края. Для модификации рефракционной диэлектрической

модели смеси, в которой бы учитывалось влияние как минеральной, так и органической компоненты на КДП почвы, отбирался второй слой кернов с глубины от 10 до 20 см. Координаты мест отбора образцов почв и их гранулометрический состав приведены в таблице 1. Распределение по размеру частиц определялось по методике Качинского [26]. В то время как в международном научном сообществе чаще всего применяется классификация почв по USDA, где принята следующая классификация распределения по размеру частиц: глина – менее 0,002 мм; ил – от 0,002 до 0,05 мм; песок – от 0,05 до 2 мм. Для того, чтобы перейти от классификации предложенной Качинским к классификации USDA в работе [27] были предложены следующие формулы:

$$\begin{aligned} Clay &= F_{<0,001} + 0,25(F_{0,001} - F_{0,005}), \\ Sand &= F_1 + F_{0,05} \\ Silt &= 100 - Clay - Sand \end{aligned} \quad (3)$$

где  $F$  – фракция по размеру частиц,  $Clay$ ,  $Sand$  и  $Silt$  – содержание глины, песка и ила по классификации USDA, соответственно. Содержание органического вещества в почве определялось по ГОСТ 27784-88 и ГОСТ 26213-91. Гранулометрический состав по классификации USDA и содержание органического вещества в почве приведено в таблице 2.

Таблица 1. Гранулометрический состав исследуемых почв.

№	Координаты места	Тип леса	Содержание фракций, %					
			1 – 0,25 мм	0,25 – 0,05 мм	0,05 – 0,01 мм	0,01 – 0,005 мм	0,005 – 0,001 мм	< 0,001 мм
1	57°37'17,9"N 92°13'00,6"E	Сосновый	1,6	8,9	46,0	9,4	14,1	19,8
2	57°39'45,0"N 92°16'12,2"E	Березовый	1,8	3,3	36,0	13,6	17,8	27,2
3	57°37'21,1"N 92°15'03,0"E	Смешанный	1,7	3,3	29,5	14,0	17,2	34,0
4	57°37'22,8"N 92°13'01,4"E	Осиновый	2,1	2,8	28,5	14,3	15,6	37,0
5	57°37'13,2"N 92°15'02,5"E	Еловый	2,3	12,4	46,0	9,6	12,1	18,1

Таблица 2. Гранулометрический состав по классификации USDA и содержание органического вещества в почвах.

№	Песок, %	Ил, %	Глина, %	Содержание органического вещества, %
1	10,5	66,2	23,3	11,1
2	5,1	63,3	31,6	14,6
3	5,0	56,7	38,3	14,5
4	4,9	54,2	40,9	16,2
5	14,7	64,2	21,1	54,5

В данной работе исследовались образцы почв с различной влажностью – от сухой до наименьшей влагоемкости (максимальное содержание воды, удерживаемое в почве капиллярными силами). Массовая влажность образцов почвы  $m_g$  была вычислена как отношение массы воды в почве  $m_w$  к массе сухой почвы  $m_d$ :  $m_g = m_w/m_d$ . Погрешность измерения влажности составила от 3 до 5 % в зависимости от значения массовой влажности. Всего было приготовлено по 20 образцов с различной влажностью для каждой почвы. Подготовка образцов для измерения осуществлялась по методике, описанной в [13].

Измерения КДП влажных образцов проводились с использованием диэлектрического измерительного комплекса, в который входят: векторный анализатор цепей Keysight N5232, температурная камера SU-241 Espec, коаксиальный измерительный контейнер, персональный компьютер. Измеряемый образец почвы с заданной влажностью помещался в контейнер, выполненный в виде жесткой коаксиальной линии. Для измерений образцов с малой влажностью использовался контейнер длиной 37 мм, для образцов с высокой влажностью – контейнер длиной 17 мм. Радиус внешней оболочки обоих контейнеров составлял 7 мм, радиус центрального проводника – 3 мм. Измерения проводились в температурном диапазоне от -30 до 25 °С. Для поддержания стабильной заданной температуры образца использовалась температурная камера SU-241 Espec. Точность установки температуры в камере составляет 0,1 °С. С помощью векторного анализатора цепей были записаны амплитуды и фазы элемента матрицы рассеивания  $S_{12}$  влажных образцов почв на частоте электромагнитного поля 435 МГц. С помощью методики, изложенной в

[28], с использованием измеренных значений элемента матрицы рассеивания  $S_{12}$  были получены значения ПП и НКЗ влажных образцов исследуемых почв. Методика, предложенная в [28], позволяет измерять КДП с погрешностью от 1 до 10 % для вещественной части и от 6 до 30 % для мнимой части КДП в зависимости от значений этих величин и частоты электромагнитного поля.

## 2. Диэлектрическая модель.

В работах [14, 29] для использования в широком частотном диапазоне была предложена модель КДП органических почв на основе рефракционной модели диэлектрической проницаемости смеси, которая записывается в следующем виде:

$$\frac{n_s - 1}{\rho_d} = \begin{cases} \frac{n_m - 1}{\rho_m} + \frac{n_b - 1}{\rho_b} m_g & m_g \leq m_{g1}; \\ \frac{n_m - 1}{\rho_m} + \frac{n_b - 1}{\rho_b} m_{g1} + \frac{n_t - 1}{\rho_t} (m_g - m_{g1}), & m_{g1} < m_g \leq m_{g2}; \\ \frac{n_m - 1}{\rho_m} + \frac{n_b - 1}{\rho_b} m_{g1} + \frac{n_t - 1}{\rho_t} (m_{g2} - m_{g1}) + \frac{n_{u,i} - 1}{\rho_{u,i}} (m_g - m_{g1}), & m_g > m_{g2}, \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{\kappa_s}{\rho_d} = \begin{cases} \frac{\kappa_m}{\rho_m} + \frac{\kappa_b}{\rho_b} m_g & m_g \leq m_{g1}; \\ \frac{\kappa_m}{\rho_m} + \frac{\kappa_b}{\rho_b} m_{g1} + \frac{\kappa_t}{\rho_t} (m_g - m_{g1}), & m_{g1} < m_g \leq m_{g2}; \\ \frac{\kappa_m}{\rho_m} + \frac{\kappa_b}{\rho_b} m_{g1} + \frac{\kappa_t}{\rho_t} (m_{g2} - m_{g1}) + \frac{\kappa_{u,i}}{\rho_{u,i}} (m_g - m_{g1}), & m_g > m_{g2}, \end{cases} \quad (5)$$

здесь индексы  $s, d, m, b, t, u$  и  $i$  относятся к влажной почве, сухой почве, органо-минеральной компоненте, прочносвязанной воде, рыхлосвязанной воде, несвязанной воде и льду соответственно;  $m_{g1}$  – максимально возможное содержание прочносвязанной воды по весу в почве;  $m_{g2}$  – максимально возможное содержание общего количества связанной воды по весу в почве;  $m_g$  – массовая влажность образца;  $\rho_d$  – плотность сухого сложения почвы;  $\rho_{b,t,u}$  – плотности типов почвенной воды (равны  $1 \text{ г/см}^3$ );  $\rho_i$  – плотность льда.

Модель, записанная в виде (4), (5), является кусочно-линейной функцией величин ПП и НКЗ, особым образом нормированных на плотность сухого сложения,  $\rho_d$ , от массовой влажности с точками излома, соответствующими максимальному содержанию прочносвязанной воды и максимальному содержанию общего количества связанной воды. Значения параметров модели

(4), (5) определяются в результате аппроксимации экспериментальных зависимостей, приведенных ПП,  $(n_s - 1)/\rho_d$  и НКЗ,  $\kappa_s/\rho_d$ , от массовой влажности. Переход к форме рефракционной модели с приведенными величинами ПП и НКЗ, и записью уравнений относительно массовой влажности вместо объемной обусловлено практической необходимостью. Измеряемые образцы разной влажности могут быть с разной плотностью сухого сложения, при этом параметры максимального содержания разных типов воды по объему будут разными для каждого образца, так как зависят от плотности сухого сложения, тогда как содержания типов воды по массе от плотности не зависят и остаются постоянными для всех образцов.

В работе [29] авторы нашли параметры модели для одной конкретной почвы. В работе [14] авторы развили модель на совокупность органических почв, но при этом учитывали только зависимость параметров от температуры и органики. В настоящей же работе параметры модели (4), (5) будут найдены для совокупности органо-минеральных почв, при этом будут получены зависимости параметров модели как от содержания органического вещества, так и физической глины для частоты 435 МГц.

На рис. 1 приведены зависимости величин КПП от влажности, измеренных для почвы 5 из таблиц 1 и 2, при фиксированных температурах в диапазоне от  $-30$  до  $25$  °С. На рис. 1 видно, что данные зависимости действительно можно описать кусочно-линейной функцией с двумя изломами. Где первую точку излома влажностной зависимости приведенных ПП и НКЗ следует отнести к граничной влажности  $m_{g1}$ , разделяющей диапазоны влажностей, относящиеся к прочносвязанной и рыхлосвязанной воде, а вторую точку излома – к граничной влажности  $m_{g2}$ , разделяющей диапазоны влажностей, относящиеся к рыхлосвязанной и несвязанной воде или льду. При этом  $m_{g1}$  не зависит от температуры и для конкретной почвы имеет фиксированное значение влажности. Параметр  $m_{g2}$  в области отрицательных температур, для каждой температуры имеет свое значение, и на рис. 1 обозначен диапазон значений влажностей, которые может принимать  $m_{g2}$  при различных температурах от  $-30$  до  $-1$  °С для



конкретной почвы. В области положительных температур от 0 до 25 °С значение  $m_{g2}$  остается постоянным. В соответствии с формулами (4) и (5) тангенсы углов наклонов прямых участков зависимостей вещественной и мнимой частей КПП почв от влажности определяются КПП типов воды, присутствующих в образцах с влажностями из диапазонов, ограничивающих соответствующие участки. Так, тангенс угла наклона прямого участка до точки  $m_{g1}$  определяется КПП прочносвязанной воды, участка между точками с влажностями  $m_{g1}$  и  $m_{g2}$  – КПП рыхлосвязанной воды и участка для влажностей выше точки  $m_{g2}$  – КПП несвязанной воды.

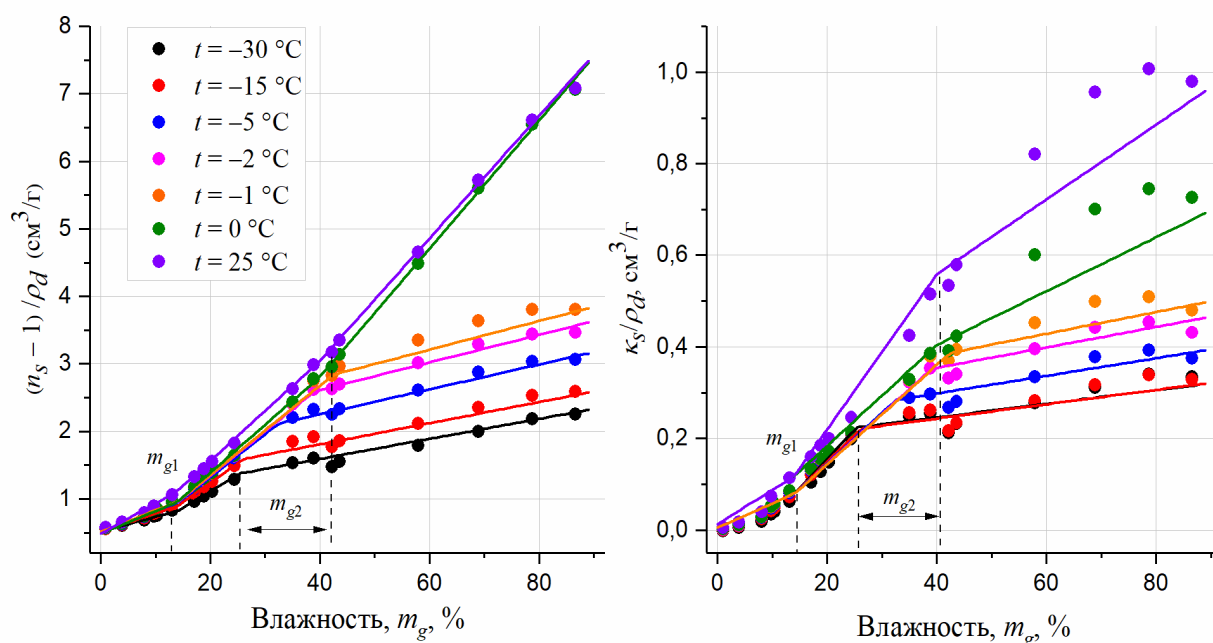


Рис. 1. Зависимости приведенных ПП  $(n_s - 1)/\rho_d$  и НКЗ  $\kappa_s/\rho_d$  для почвы 5 из таблицы 1 и 2 от влажности при фиксированных температурах от  $-30$  до  $25$  °С на частоте 435 МГц. Экспериментальные данные – символы, результат аппроксимации – линии.

На рис. 2 символами показаны экспериментальные значения приведенных КПП, полученных для пяти образцов почв из таблицы 1 при температуре  $-20$  и  $20$  °С. Линиями на рис. 2 показаны результаты аппроксимации с применением уравнений (4) и (5) в качестве теоретической модели.

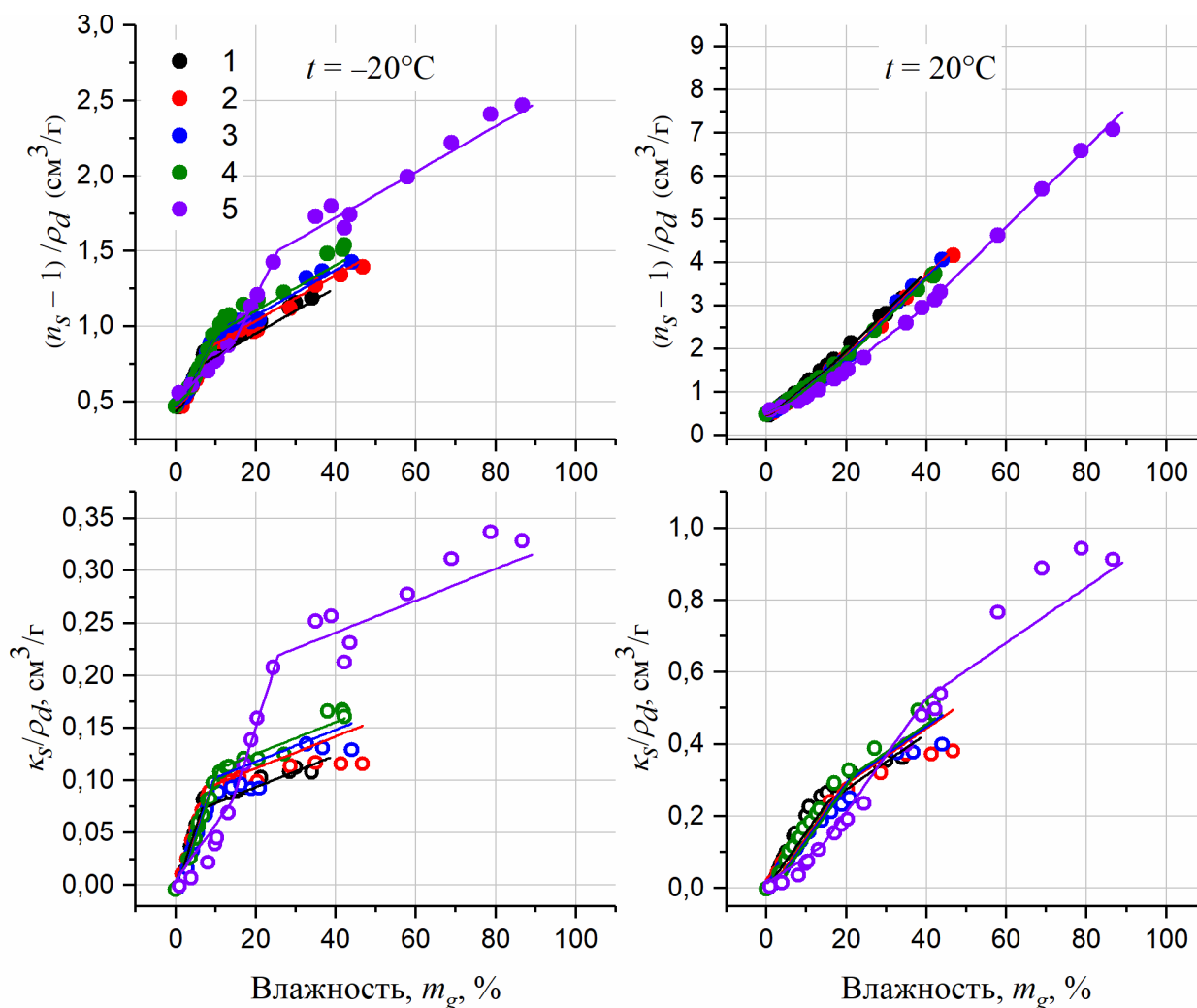


Рис. 2. Зависимости приведенных ПП  $(n_s - 1)/\rho_d$  и НКЗ  $\kappa_s/\rho_d$  почв от влажности при температурах 20 и  $-20^\circ\text{C}$  на частоте 435 МГц. Экспериментальные данные – символы, результат аппроксимации – линии. Номера соответствуют номерам почв из таблицы 1.

В работе [22] показано, что для частоты 435 МГц тангенсы углов наклона прямых участков зависимостей от влажности приведенных ПП и НКЗ для разных почв в диапазонах влажности, соответствующих присутствию одинаковых типов воды, совпадают в пределах погрешности измерений, что подтверждается и на рис. 2. Исходя из этого воспользуемся методом, апробированным в указанной работе, согласно которому процедура аппроксимации будет применяться сразу для всех пяти исследуемых почв, одновременно для вещественной и мнимой частей КПП. В результате искомые параметры модели КДП почв, характеризующие диэлектрические свойства типов воды в почвах, находились общими для всей совокупности исследуемых почв, а не индивидуально для

каждой. Таким образом в разрабатываемой модели можно выделить две группы параметров: не зависящие от типа почвы – это параметры каждого типа воды  $(n_b - 1)/\rho_b$ ,  $(n_t - 1)/\rho_t$ ,  $(n_{u,i} - 1)/\rho_{u,i}$ ,  $\kappa_b/\rho_b$ ,  $\kappa_t/\rho_t$ ,  $\kappa_{u,i}/\rho_{u,i}$  и зависящие от типа почвы – это параметры органо-минеральной компоненты почвы  $(n_m - 1)/\rho_m$ ,  $\kappa_m/\rho_m$  и граничные влажности  $m_{g1}$ ,  $m_{g2}$ . Поиск параметров модели проводился для каждой температуры из диапазона измерений почвенных образцов, найденные параметры сведены в графики температурных зависимостей параметров модели, являющиеся диэлектрическими характеристиками типов почвенной воды, (рис. 3) и граничных влажностей (рис. 4). Для ПП и НКЗ сухой почвы существенная зависимость от температуры не обнаружена.

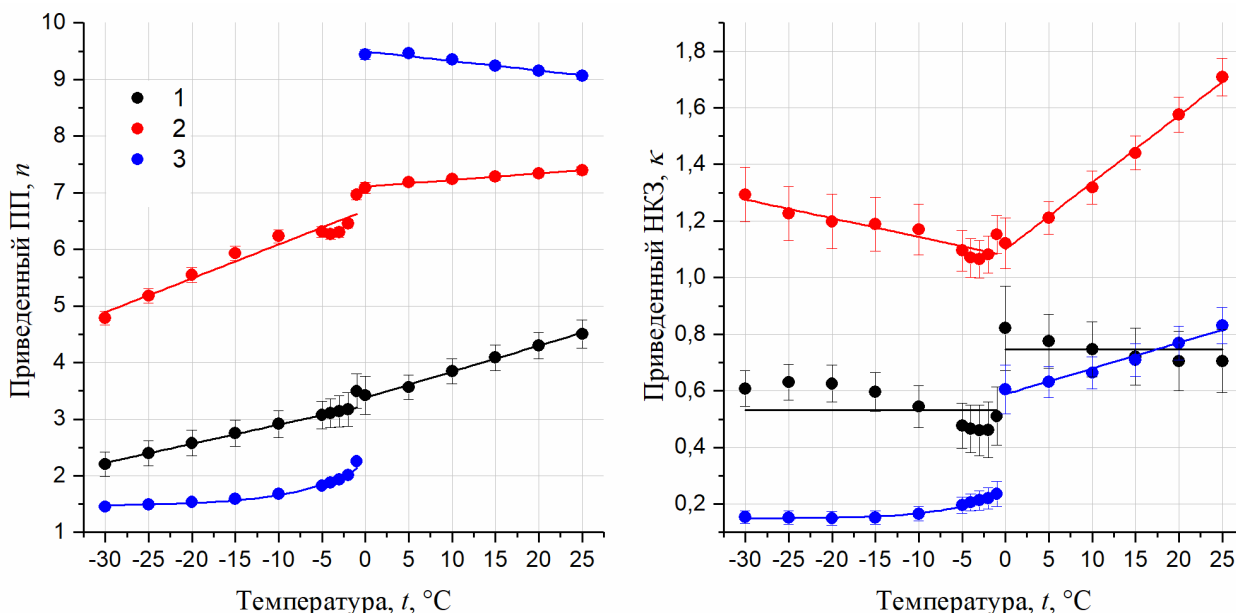


Рис. 3. Температурные зависимости параметров модели, являющихся диэлектрическими характеристиками: 1 – прочносвязанной воды, 2 – рыхлосвязанной воды, 3 – несвязанной воды на частоте 435 МГц.

Экспериментальные данные – символы, результат аппроксимации – линии.

В результате аппроксимации температурных зависимостей, изображенных на рис. 3, были найдены следующие функциональные выражения для расчета параметров модели, являющихся диэлектрическими характеристиками типов почвенной воды в органо-минеральных почвах на частоте 435 МГц:

$$\frac{n_b - 1}{\rho_b} = \begin{cases} 0,046 \cdot t + 3,38, & 0 \leq t \leq 25; \\ 0,034 \cdot t + 3,24, & -30 \leq t < 0, \end{cases} \quad (6)$$

$$\frac{n_t - 1}{\rho_t} = \begin{cases} 0,012 \cdot t + 7,11, & 0 \leq t \leq 25; \\ 0,06 \cdot t + 6,69, & -30 \leq t < 0, \end{cases} \quad (7)$$

$$\frac{n_u - 1}{\rho_u} = 9,49 - 0,017 \cdot t, \quad 0 \leq t \leq 25, \quad (8)$$

$$\frac{n_i - 1}{\rho_i} = 1,47 + 0,75 \cdot \exp(0,139 \cdot t), \quad -30 \leq t < 0; \quad (9)$$

$$\frac{\kappa_b}{\rho_b} = \begin{cases} 0,746 \pm 0,11, & 0 \leq t \leq 25; \\ 0,533 \pm 0,08, & -30 \leq t < 0, \end{cases} \quad (10)$$

$$\frac{\kappa_t}{\rho_t} = \begin{cases} 0,024 \cdot t + 1,099, & 0 \leq t \leq 25; \\ -0,007 \cdot t + 1,078, & -30 \leq t < 0, \end{cases} \quad (11)$$

$$\frac{\kappa_u}{\rho_u} = 0,588 + 0,009 \cdot t, \quad 0 \leq t \leq 25, \quad (12)$$

$$\frac{\kappa_i}{\rho_i} = 0,149 + 0,106 \cdot \exp(0,177 \cdot t), \quad -30 \leq t < 0, \quad (13)$$

где  $t$  – это температура, измеряемая в градусах Цельсия.

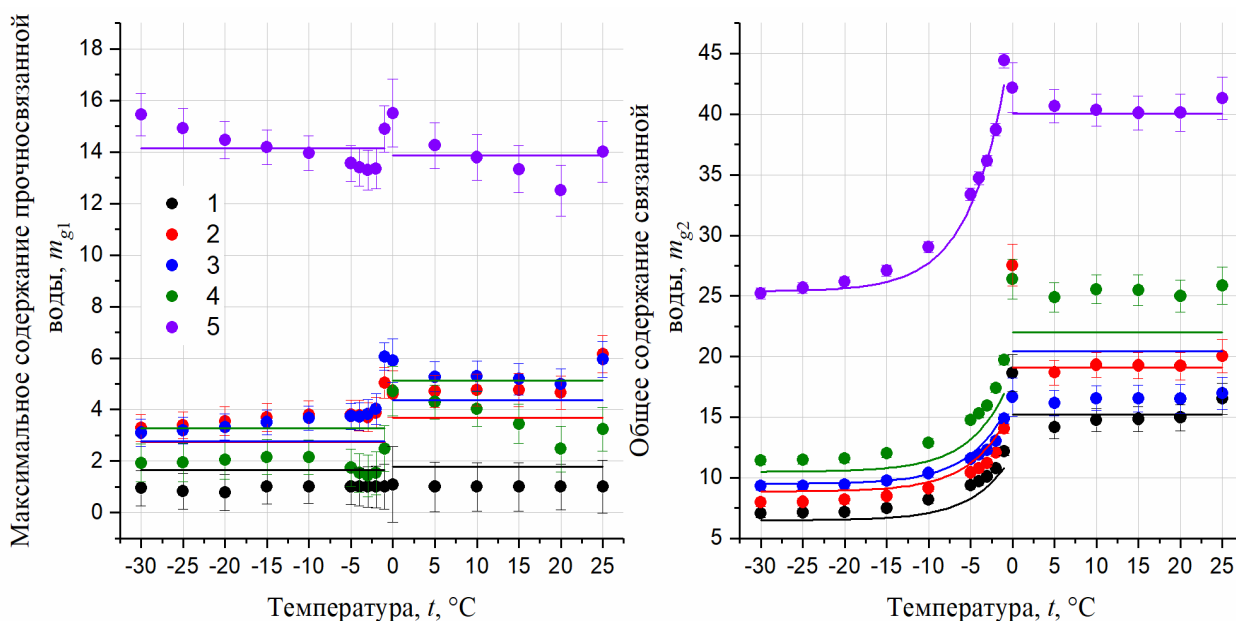


Рис. 4. Температурные зависимости  $m_{g1}$  и  $m_{g2}$  для исследуемых почв на частоте 435 МГц. Номера на графике соответствуют номеру почвы из таблицы 1. Экспериментальные данные – символы, результат аппроксимации – линии.

Как можно видеть на рис. 1 и 4, зависимость от температуры имеет только параметр  $m_{g2}$  в отрицательной области значений. Параметры  $m_{g1}$  и  $m_{g2}$ , показанные на рис. 4, различаются для разных почв, поэтому для данных параметров следует установить зависимость от содержания в почве минеральной

и органической компоненты. В работе было [16] установлено, что для учета в модели КДП минеральных почв различного минерального и гранулометрического состава достаточно установить связь между параметрами модели и содержанием физической глины в почвах. Для описания зависимостей, показанных на рис. 1 и 4 были получены следующие эмпирические формулы для расчета  $m_{g1}$   $m_{g2}$ :

$$m_{g1} = \begin{cases} 0,001 \cdot C + 0,003 \cdot O - 0,039, & 0 \leq t \leq 25; \\ 8,7 \cdot 10^{-5} \cdot C + 0,003 \cdot O - 0,0174, & -30 \leq t < 0, \end{cases} \quad (14)$$

$$m_{g2} = \begin{cases} 0,002 \cdot C + 0,006 \cdot O + 0,037, & 0 \leq t \leq 25; \\ (C + 4,4 \cdot O + (0,445 \cdot C + 3,67 \cdot O + 2,72) \cdot \exp\left(\frac{t}{4,55}\right) - 7,2) \cdot 10^{-3}, & -30 \leq t < 0, \end{cases} \quad (15)$$

где  $C$  и  $O$  содержание глины и органического вещества в почве соответственно. Параметры органо-минеральной компоненты почвы  $(n_m - 1)/\rho_m$  и  $\kappa_m/\rho_m$  также не зависят от температуры, а зависят только от типа почвы. Эти параметры находились во время аппроксимации приведенных ПП и НКЗ исследуемых почв, показанных в зависимости от влажности на рис. 2. В результате были получены следующие эмпирические формулы для расчета параметров модели, являющихся диэлектрическими характеристиками органо-минеральной компоненты почвы:

$$\frac{n_m - 1}{\rho_m} = \begin{cases} 0,397 + 0,002 \cdot C + 0,0008 \cdot O, & 0 \leq t \leq 25; \\ 0,377 + 0,0017 \cdot C + 0,0018 \cdot O, & -30 \leq t < 0, \end{cases} \quad (16)$$

$$\frac{\kappa_m}{\rho_m} = \begin{cases} 0,013 \pm 0,007, & 0 \leq t \leq 25; \\ 0,007 \pm 0,005, & -30 \leq t < 0. \end{cases} \quad (17)$$

В результате, для исследуемых почв, которые содержат в себе как органическую, так и минеральную компоненту, были получены параметры рефракционной модели (уравнения (4) и (5)), также формулы, описывающие зависимости этих параметров от температуры, содержания глинистой фракции и органического вещества для талого и мерзлого состояния на частоте 435 МГц. Таким образом, формулы (4) – (17) составляют температурно-зависимую диэлектрическую модель органо-минеральных почв входными параметрами которой являются температура почвы,  $t$ ; ее плотность,  $\rho$ ; влажность,  $m_g$ ; минеральная,  $C$ , и органическая,  $O$ , компоненты.

Из уравнений (14) и (15) можно заключить, что на содержание прочносвязанной воды,  $m_{g1}$ , и на содержание общего количества связанной воды,  $m_{g2}$ , в органо-минеральных почвах большее влияние оказывает содержание именно органического вещества. Это видно из сравнения коэффициентов, стоящих перед параметрами  $C$  и  $O$ . Коэффициент, стоящий перед параметром  $O$  от двух до восьми раз больше, чем коэффициент, стоящий перед параметром  $C$ . Обратная картина наблюдается только для ПП органо-минеральной компоненты почвы при положительных температурах (уравнение (16)). Здесь видно, что на ПП органо-минеральной почвы большее влияние оказывает содержание глинистой фракции.

### 3. Оценка погрешности

Погрешности разработанной одночастотной рефракционной диэлектрической модели (ОРДМ) оценивались путем сравнения рассчитанных с помощью предложенной модели значений КДП с соответствующими измеренными значениями. В качестве примера на рис. 5 символами показаны результаты измерений действительной и мнимой частей КДП почвы № 1 из таблицы 1 в зависимости от температуры для нескольких влажностей. Также на рис. 5 сплошными линиями показаны результаты расчетов по предложенной диэлектрической модели как для талого, так и для мерзлого состояния органо-минерального слоя лесных почв. Как видно на рис. 5, наблюдается хорошее соответствие между расчетными и измеренными значениями КДП влажных почв во всем диапазоне температур измерений.

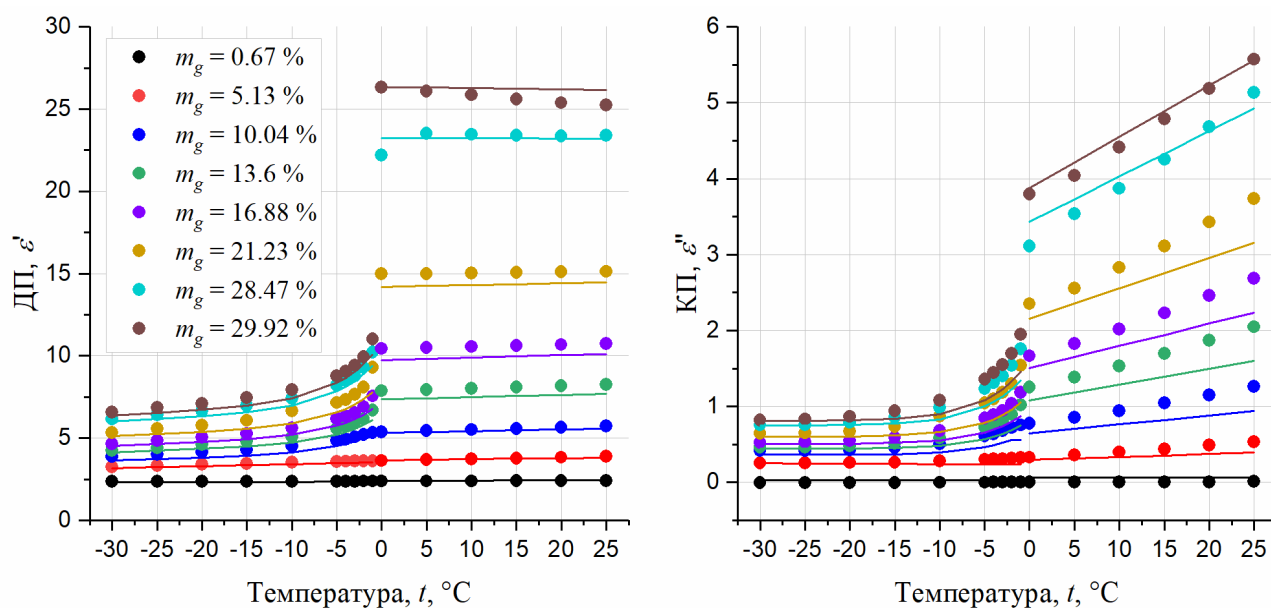


Рис. 5. Значения ДП и КП влажных образцов почвы № 1 в зависимости от температуры. Измеренные значения показаны символами, сплошные линии соответствуют значениям КДП почвы, рассчитанным с использованием предложенной диэлектрической модели.

На рис. 6 показаны вычисленные с помощью разработанной ОРДМ значения ДП и КП исследуемых почв в зависимости от их измеренных значений для положительных и отрицательных температур. Для оценки погрешности предложенной модели КДП почв для приведенных на рис. 6 данных были рассчитаны нормированное среднеквадратическое отклонение (НСКО) модельных значений от измеренных и коэффициент детерминации  $R^2$ .

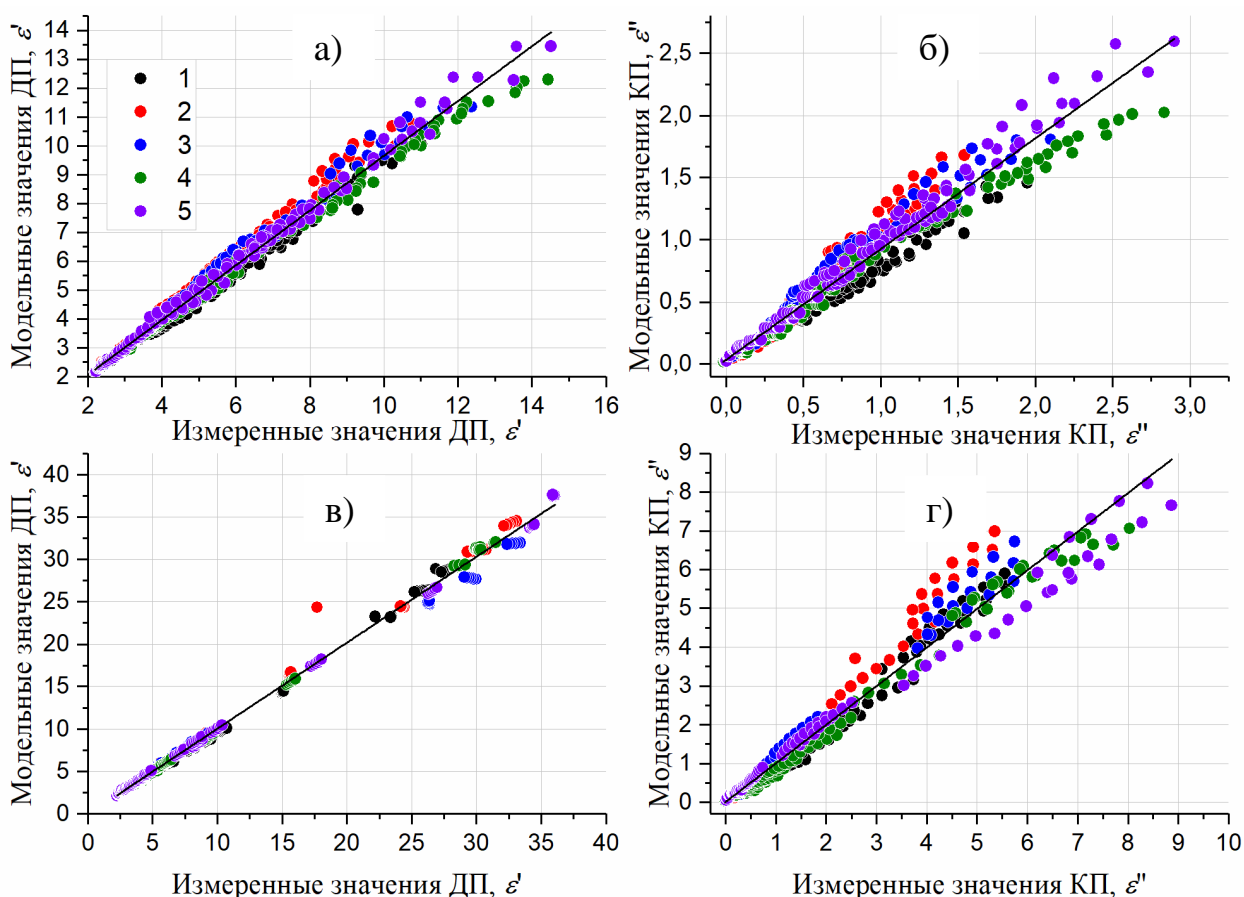


Рис. 6. Вычисленные с помощью разработанной диэлектрической модели значения ДП (а, в) и КП (б, г) исследуемых почв в зависимости от их измеренных значений при отрицательных (а, б) и положительных (в, г) температурах. Номера соответствуют номерам почв из таблицы 1.

Формулы для вычисления НСКО и  $R^2$  имеют следующий вид:

$$\text{НСКО} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_j - y_j)^2}{n}}}{\bar{x}} \cdot 100 \%, \quad (18)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (x_j - y_j)^2}{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}, \quad (19)$$

где  $x_j, y_j, \bar{x}$  – измеренные значения, рассчитанные с помощью модели значения и среднее измеренное значение соответственно,  $n$  – число измерений. Значения полученных ошибок ДП и КП при положительных и отрицательных температурах приведены в таблице 3. Анализируя погрешности, представленные в таблице 3, можно сделать вывод, что точность предложенной модели сопоставима с точностью измерения КДП. Если сравнить погрешности ранее



разработанной диэлектрической модели, но для верхнего слоя этих же лесных почв [25] с моделью КДП органо-минеральных почв, предложенной в данном исследовании, можно заметить, что погрешности диэлектрической модели, которая учитывает как содержание органического вещества, так и содержание глинистой фракции в почве имеет меньшую ошибку для ДП. Значение НСКО для ДП с 16 % уменьшилось до 6 %. В то же время погрешности, относящиеся к КП, остались в тех же пределах, в районе 21 % для НСКО. Предложенная одночастотная модель КДП влажных органо-минеральных почв имеет минимальное число входных параметров по сравнению со спектроскопической моделью [14, 29], что является преимуществом для прикладных задач дистанционного зондирования. Сравнительно невысокая погрешность описания ДП позволяет применять данную модель в задачах определения влажности дистанционными методами, в частности с использованием радаров, где в первую очередь важна отражательная способность поверхности почвы, которая выражается через ДП.

Таблица 3. Погрешности предложенной диэлектрической модели.

	НСКО, %		$R^2$	
	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\epsilon'$	$\epsilon''$
$-30\text{ }^\circ\text{C} \leq t \leq -1\text{ }^\circ\text{C}$	6,0	20,2	0,988	0,957
$0\text{ }^\circ\text{C} \leq t \leq 25\text{ }^\circ\text{C}$	5,6	21,2	0,997	0,971

## Заключение

В данной работе предложена одночастотная диэлектрическая модель талых и мерзлых лесных органо-минеральных почв, учитывающая как гранулометрический состав, так и содержание органического вещества, разработанная на основе рефракционной диэлектрической модели смеси для частоты 435 МГц. Разработанная диэлектрическая модель применима для прогнозирования КДП верхнего слоя почв соснового, осинового, елового, смешанного и березового лесов Красноярской лесостепи с содержанием глины

от 21,1 до 40,9 % и органического вещества от 11,1 до 54,5 %, с массовой влажностью от сухого состояния до наименьшей влагоемкости и в диапазоне температур от  $-30$  до  $25$  °С. По сравнению с ранее предложенной диэлектрической моделью, разработанной для того же региона Красноярской лесостепи [25], которая учитывала только содержание органического вещества в почве, использование данной модели позволило уменьшить ошибки прогнозирования с 16 до 6 % для  $\epsilon'$ , для  $\epsilon''$  ошибки остались в тех же пределах. Обнаружено, что в лесных почвах, в которых присутствуют как органическая, так и минеральная компоненты, на содержание прочносвязанной воды и на содержание общего количества связанной воды оказывает большее влияние именно органическая составляющая.

Разработанная диэлектрическая модель может быть использована для интерпретации данных дистанционного зондирования на частоте 435 МГц, а также в задачах измерения влажности, определения талого-мерзлого состояния лесных органико-минеральных почв.

**Финансирование:** работа выполнена в рамках научной тематики Госзадания ИФ СО РАН.

### Литература

1. Depledge J., Lamb R., Lawler C. Caring for climate: a guide to the climate change convention and the Kyoto protocol //Climate Change Secretariat (UNFCCC): Bonn, Germany. – 2005.
2. Hallikainen M. T. et al. Microwave dielectric behavior of wet soil-part 1: Empirical models and experimental observations //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1985. – №. 1. – P. 25-34.
3. Dobson M. C. et al. Microwave dielectric behavior of wet soil-Part II: Dielectric mixing models //IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. – 1985. – №. 1. – P. 35-46.

4. Peplinski N. R., Ulaby F. T., Dobson M. C. Dielectric properties of soils in the 0.3-1.3-GHz range //IEEE transactions on Geoscience and Remote sensing. – 1995. – Vol. 33. – №. 3. – P. 803-807.
5. Mironov V. L., Kosolapova L. G., Fomin S. V. Physically and mineralogically based spectroscopic dielectric model for moist soils //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2009. – Vol. 47. – №. 7. – P. 2059-2070.
6. Mironov V.L., Fomin S. V. Temperature dependable microwave dielectric model for moist soils // Progress in Electromagnetics Research Symposium. Electromagnetics Academy – 2009. – Vol. 1. P. 817–821.
7. Mironov V. L. et al. Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils //IEEE transactions on Geoscience and Remote sensing. – 2004. – Vol. 42. – №. 4. – P. 773-785.
8. Фомин С. В. и др. Диэлектрическая модель талых и мерзлых органических почв на частоте 1.4 ГГц //Известия высших учебных заведений. – 2017. – Т. 60. – №. 12/2.
9. Бобров П. П., Кондратьева О. В., Мустакова М. М. Влияние содержания органического вещества в почвах на диэлектрическую проницаемость в диапазоне частот 10 кГц 8, 5 ГГц //Сибирский аэрокосмический журнал. – 2013. – №. 5 (51). – С. 95-97.
10. Бобров П. П. и др. Диэлько-влажностные характеристики почвенных образцов с различным содержанием гумуса в сантиметровом и дециметровом диапазонах //Естественные науки и экология. Ежегодник ОмГПУ. – 2001. – С. 3-7.
11. Mironov V. L., Kosolapova L. G., Fomin S. V. Validation of the soil dielectric spectroscopic models with input parameters based on soil composition //2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – IEEE, 2007. – P. 749-753.
12. Mialon A. et al. Comparison of Dobson and Mironov dielectric models in the SMOS soil moisture retrieval algorithm //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2015. – Vol. 53. – №. 6. – P. 3084-3094.

13. Mironov V. L. et al. Temperature-and texture-dependent dielectric model for frozen and thawed mineral soils at a frequency of 1.4 GHz //Remote Sensing of Environment. – 2017. – Vol. 200. – P. 240-249.
14. Миронов В. Л., Савин И. В. Спектроскопическая многорелаксационная диэлектрическая модель талых и мерзлых арктических почв, учитывающая зависимости от температуры и содержания органического вещества //Исследование Земли из космоса. – 2019. – №. 1. – С. 62-73.
15. Бобров П. П. и др. Спектроскопическая модель диэлектрической проницаемости почв, использующая стандартизованные агрофизические показатели //Исследование Земли из космоса. – 2008. – №. 1. – С. 15-23.
16. Mironov V. L., Kosolapova L. G., Fomin S. V. Physically and mineralogically based spectroscopic dielectric model for moist soils //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2009. – Vol. 47. – №. 7. – P. 2059-2070.
17. Wigneron J. P. et al. Modelling the passive microwave signature from land surfaces: A review of recent results and application to the L-band SMOS & SMAP soil moisture retrieval algorithms //Remote Sensing of Environment. – 2017. – Vol. 192. – P. 238-262.
18. Escorihuela M. J. et al. Effective soil moisture sampling depth of L-band radiometry: A case study //Remote Sensing of Environment. – 2010. – Vol. 114. – №. 5. – P. 995-1001.
19. Monerris A. et al. Soil moisture retrieval using L-band radiometry: Dependence on soil type and moisture profiles //2006 IEEE MicroRad. – IEEE, 2006. – P. 171-175.
20. Alemohammad S. H. et al. Characterization of vegetation and soil scattering mechanisms across different biomes using P-band SAR polarimetry //Remote Sensing of Environment. – 2018. – Vol. 209. – P. 107-117.
21. Carreiras J. M. B. et al. Coverage of high biomass forests by the ESA BIOMASS mission under defense restrictions //Remote Sensing of Environment. – 2017. – Vol. 196. – P. 154-162.

22. Fomin S. V., Muzalevskiy K. Dielectric Model for Thawed Mineral Soils at a Frequency of 435 MHz //IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2020. – Vol. 18. – №. 2. – P. 222-225.
23. Fomin S., Muzalevskiy K. A dielectric model for frozen mineral soils at a frequency of 435 MHz //Remote Sensing Letters. – 2021. – Vol. 12. – №. 9. – P. 944-950.
24. Savin I. V., Muzalevskiy K. V., Mironov V. L. A dielectric model of thawed and frozen Arctic organic soils at 435 MHz //Remote Sensing Letters. – 2022. – Vol. 13. – №. 5. – P. 452-459.
25. Каравайский А.Ю., Лукин Ю.И. Диэлектрическая модель верхнего органического слоя лесных почв для частоты 435 МГц // Исследование Земли из космоса. 2023. Т. 2023, № 3. С. 81–96.
26. Агрохимические методы исследования почв / ред. Соколов А. В. М.: Наука, 1975. 656 с.
27. Sadovski A., Ivanova M. Transformation of soil texture schemes and determination of water-physical properties of soils //Eurasian Journal of Soil Science. – 2020. – Vol. 9. – №. 4. – P. 306-313.
28. Mironov V. L. et al. Method of retrieving permittivity from S12 element of the waveguide scattering matrix //2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – IEEE, 2013. – P. 1-3.
29. Mironov V. L., De Roo R. D., Savin I. V. Temperature-dependable microwave dielectric model for an Arctic soil //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2010. – Vol. 48. – №. 6. – P. 2544-2556.

**Для цитирования:**

Каравайский А.Ю., Фомин С.В., Лукин Ю.И. Модель комплексной диэлектрической проницаемости органо-минеральных почв, учитывающая минеральный состав и содержание органического вещества. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.1.9>