

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.4.11>

УДК: 537.86, 528.88, 631.432.2

ВЛИЯНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И ВЛАЖНОСТИ НА ПЕРЕСЕЧЕНИЕ СПЕКТРОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОЧВ

А.Ю. Каравайский, Ю.И. Лукин

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

Статья поступила в редакцию 16 ноября 2023 г.

Аннотация. Проведено исследование пересечений спектров вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости влажных органических почв с различным содержанием органического вещества от 11 до 54 % в диапазоне частот от 15 МГц до 15 ГГц и в диапазоне температур от 0 до 25 °С. На основании полученных экспериментальных зависимостей предложена эмпирическая модель для оценки среднего значения частот, на которых наблюдается пересечения спектров диэлектрической проницаемости почв, в диапазоне изменений значений этих частот при изменении температуры. Предложенная модель также включает формулу расчета значения объемной влажности, при которой появляется пересечение спектров диэлектрической проницаемости почв.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, органическая почва, влажность почв, пересечение частот, эффект Максвелла-Вагнера.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта № 22-27-20112.

Автор для переписки: Каравайский Андрей Юрьевич, rsdak@ksc.krasn.ru

Введение

Информация о влажности почвы является важной для большинства исследований об окружающей среде в таких областях, как сельское хозяйство, лесное хозяйство, гидрология, метеорология, строительство [1-3]. Для определения влажности почв разработаны различные методы, с обзором которых можно ознакомиться в работе [4]. Широкое применение получили электрофизические методы измерения, основанные на связи влажности почвы с комплексной диэлектрической проницаемостью (КДП) [5-8]. Данные методы могут быть контактными, с использованием диэлектрических датчиков и дистанционными, с использованием дистанционных радиоизмерительных устройств, как активного типа – радаров, так и пассивных – радиометров. Для применения электрофизических методов измерений требуется использование точных моделей, связывающих КДП почв с влажностью. Известно, что для КДП почв характерны частотная и температурная зависимости, обусловленные диэлектрическими свойствами почвенной воды, которая включает связанную и несвязанную категории воды [9]. Связанная вода состоит из молекул воды, удерживаемых за счет адсорбционных сил на поверхности твердых частиц. Молекулы несвязанной воды не удерживаются силами притяжения вблизи поверхности частиц и могут свободно перемещаться за счет капиллярных сил. Поэтому модель КДП влажных почв должна правильно описывать частотную, влажностную и температурную зависимость. Для установления таких зависимостей требуются лабораторные исследования, во время которых необходимо изучить диэлектрические свойства влажных почв.

Электрофизические методы используют частоты в достаточно широком диапазоне. К контактными можно отнести методы с использованием емкостных датчиков измерения влажности, основанные на принципе измерения времени перезарядки электродов, помещенных в почву [10, 11], при этом время перезарядки зависит от емкости почвы, а значит, в свою очередь зависит от вещественной части КДП почвы. Такие датчики работают на частотах от 50 до 100 МГц. Еще одним распространённым контактным методом

измерения влажности почвы является рефлектометрия во временной области (TDR), которая предполагает измерение времени прохождения импульса в разомкнутом отрезке двухпроводной линии, погруженной в почву [12, 13]. Нижняя граница ширины частотного спектра импульса TDR составляет 10 МГц, верхняя частота спектра зависит от диэлектрических свойств почвы: чем выше влажность (ϵ , следовательно, и выше значение КДП) тем ниже частота, до которой возможно проводить измерения, и эта частота находится в пределах от 0,4 до 3 ГГц [14]. В дистанционных методах применяются радары с использованием антенн с синтезированной апертурой, которые позволяют определять влажность верхнего слоя почвы [15]. В случае использования пассивных радиометров измеряется электромагнитный сигнал, излучаемый почвой [16]. Дистанционные методы используют, как правило, частоты в С-диапазоне (4-8 ГГц) и в L-диапазоне (1-2 ГГц) [17, 18]. С целью увеличения глубины мониторинга влажности почв в последние годы активно ведутся исследования в области разработки методов дистанционного зондирования в Р-диапазоне частот (435 МГц) [19]. Таким образом, для развития радиофизических методов измерения влажности возникает необходимость в изучении диэлектрических свойств влажных почв в мегагерцовом и гигагерцовом диапазонах частот.

Впервые спектры вещественной и мнимой частей КДП в широком частотном диапазоне были получены в работе [20], авторы которой измерили спектры КДП для ряда почв в диапазоне частот от 100 МГц до 26 ГГц с помощью комбинированного метода, включающего TDR измерения и измерения с использованием прямоугольных волноводов. Впоследствии были предложены методы измерения спектров КДП в широком диапазоне частот на основе использования коаксиальных линий передач [21, 22].

Спектр КДП влажной почвы определяется в основном диэлектрическими свойствами почвенной воды, так как частотная зависимость КДП сухой почвы несущественна. Спектр КДП влажной почвы имеет сложный вид из-за влияния диэлектрических релаксаций в различных категориях почвенной воды, а также

релаксации Максвелла-Вагнера, обусловленной поляризационными процессами на границах между компонентами почвы, обладающими различными значениями КДП [23, 24].

На разных частотах характер температурных зависимостей вещественной и мнимой частей КДП влажной почвы может отличаться, что приводит к точкам пересечения спектров вещественной или мнимой частей КДП (которые в литературе также часто называют диэлектрической проницаемостью (ДП) и коэффициентом диэлектрических потерь (КП)) почв, измеренных для одной влажности образца, но разных температур. Авторами работы [25] было обнаружено повышение ДП влажной почвы на частотах ниже 100 МГц и уменьшении ДП влажной почвы на частотах выше 100 МГц при увеличении температуры. При этом на частоте 100 МГц температурная зависимость ДП влажной почвы отсутствует. Данная точка является пересечением спектров ДП, измеренных для почвенного образца одной влажности при различных положительных температурах. Авторы [25] объяснили пересечение спектров ДП на частоте 100 МГц различным характером температурных зависимостей ДП в частотных областях влияния релаксации Максвелла-Вагнера и ориентационной дипольной релаксации почвенной воды. На частотах до 100 МГц, в области релаксации Максвелла-Вагнера, ДП влажной почвы увеличивается с увеличением температуры, а на частотах выше 100 МГц, в области ориентационной дипольной релаксации, наоборот, уменьшается. В работе [26] были изучены условия пересечения спектров ДП минеральной почвы. Так было показано, что в образцах, содержащих только связанную воду, пересечений не возникает. В образцах почв, в которых присутствует несвязанная вода, пересечение спектров ДП наблюдается в диапазоне 2-4,2 ГГц, что обусловлено пересечением спектров ДП несвязанной воды. В образцах почвы, в которых содержится как связанная, так и несвязанная вода, кроме высокочастотного пересечения, появляется пересечение в диапазоне частот от 0,1 до 1,2 ГГц, обусловленное влиянием низкочастотных релаксаций Максвелла-Вагнера. В работе [27], при изучении диапазонов частот пересечения спектров ДП

на примере пяти минеральных почв с различным гранулометрическим составом, была предложена эмпирическая модель для расчета средних частот пересечения (для первой и второй области пересечения), параметрами которой являются влажность и содержание глинистой фракции.

Особый интерес представляют почвы с высоким содержанием органического вещества, поскольку данные почвы являются типичными для тундровых и лесных зон. В связи с этим цель данного исследования состояла в изучении влияния органического вещества на пересечение спектров диэлектрической проницаемости органических почв, вызванное эффектом Максвелла-Вагнера. Для этого были проведены измерения КДП пяти органических почв с содержанием органического вещества от 11,1 до 54,5 %. Диэлектрические измерения проводились в температурном диапазоне от 0 до 25 °С и частотном диапазоне от 15 МГц до 15 ГГц для образцов почв с различной объемной влажностью: от сухого состояния до наименьшей полевой влагоемкости (максимальное содержание воды, удерживаемое в почве капиллярными силами).

1. Подготовка материалов

Для того чтобы исследовать влияние содержания органического вещества на пересечение спектров КДП, проведены измерения пяти органических почв. Почвенные образцы были отобраны в Красноярской лесостепи, Пировского района, Красноярского края. Для проведения исследований зависимости КДП образцов почв от содержания органического вещества отбирался верхний слой кернов (от 5 до 10 см), который преимущественно содержал в себе остатки перегнившей и неперегнившей растительности, опада, корневой системы и небольшое количество земли (преимущественно черного цвета), которое оставалось на корнях растений. Содержание органического вещества составило 11,1 %; 21,4 %; 27,7 %; 31,1 %; 54,5 %. Таким образом, почвы для измерений были выбраны так, чтобы провести исследования пересечений спектров КДП почв с широкой вариацией содержания органического вещества.

Исследование осуществлялось для образцов почв с различной объемной влажностью от сухого состояния до наименьшей влагоемкости. Диэлектрические измерения проводились в температурном диапазоне от 0 до 25 °С и частотном диапазоне от 15 МГц до 15 ГГц. Для проведения измерений было подготовлено по 20 образцов для каждой почвенной пробы с заданными влажностями. Предварительно пробы почв были высушены при комнатной температуре до гигроскопической влажности. Чтобы получить образцы с влажностью выше гигроскопической в образцы почв калиброванной пипеткой добавлялись различные порции дистиллированной воды. Подготовленные образцы хорошо перемешивались и оставлялись в герметично запечатанных бюксах на срок не менее 7 суток. Для получения образцов влажностью ниже гигроскопической образцы почв высушивались в сушильном шкафу при температуре 104 °С в течение 6 часов, после чего они сразу помещались в измерительный контейнер.

2. Метод измерения КДП

Для проведения измерений был использован измерительный комплекс, в который входят: векторный анализатор цепей Keysight N5232, температурная камера SU-241 Espes и персональный компьютер. Для измерения КДП применялся метод, предполагающий использование измерительного контейнера, схематично показанный на рис. 1, выполненного в виде отрезка жесткой коаксиальной линии. В отличие от других методов, коаксиальный метод позволяет использовать один контейнер в широком частотном диапазоне. Чтобы провести измерения, исследуемый образец почвы с заданной влажностью помещался в контейнер. При разных значениях влажности образцов использовались контейнеры разной длины, L , от 17 до 37 мм, диаметр внешней оболочки контейнеров, D , равен 14 мм, диаметр центрального проводника, d , равен 3 мм. Размеры коаксиального контейнера таковы, чтобы его волновое сопротивление согласовывалась с входным волновым сопротивлением векторного анализатора, 50 Ом. Для поддержания стабильной заданной

температуры образца использовалась температурная камера SU-241 Espec. Для автоматизации установки к векторному анализатору и температурной камере был подключен компьютер и разработана программа для управления [28].

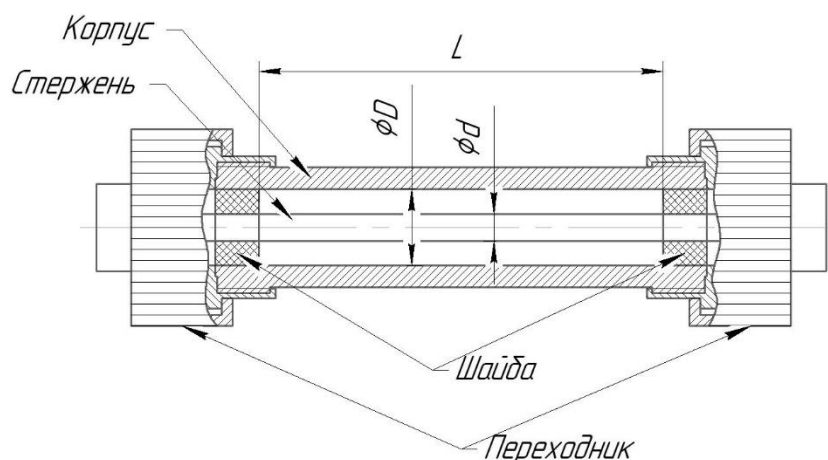


Рис. 1. Коаксиальный измерительный контейнер.

С помощью векторного анализатора измеряется модуль и фаза коэффициента прохождения, S_{12} , электромагнитной волны через контейнер с измеряемым веществом в качестве диэлектрического заполнения. Выражение для коэффициента прохождения электромагнитной волны через коаксиальную линию с диэлектрической проницаемостью диэлектрического заполнения ϵ_s хорошо известно и записывается в следующем виде:

$$S_{12} = \frac{1 - r^2}{1 - r^2 \exp(-2ikL)} \exp(-ikL), \quad (1)$$

где r – коэффициент отражения Френеля от полубесконечного слоя образца:

$$r = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_s^*}}{1 + \sqrt{\epsilon_s^*}}, \quad (2)$$

$\epsilon_s^* = \epsilon'_s + i\epsilon''_s$ – КДП образца, $i = \sqrt{-1}$, ϵ'_s – ДП образца, ϵ''_s – КП образца, $k = \frac{2\pi}{c} f \sqrt{\epsilon_s^*}$ – волновое число в образце, f – частота электромагнитного поля, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме. Переходные устройства, согласующие контейнер с входными разъемами векторного анализатора, и ограничивающие образец шайбы влияют на величину S_{12} , поэтому

для определения волновых параметров контейнера в границах образца требуются калибровочные измерения. В том случае, когда переотражениями от переходных устройств можно пренебречь, выражение для коэффициента прохождения всего измерительного волноводного тракта, S_{12}^m , может быть записано в следующем виде:

$$S_{12}^m = S_{12}^s S_{12}^t, \quad (3)$$

где S_{12}^s и S_{12}^t – коэффициенты прохождения электромагнитной волны через секцию измерительного тракта с измеряемым образцом и переходные устройства соответственно.

Для того чтобы вычислить значение КДП исследуемых образцов из данных, полученных с помощью векторного анализатора цепей, необходимо определить значения модуля и фазы коэффициента прохождения S_{12} в границах самого образца S_{12}^s . Для этого необходимо провести калибровочные измерения. Для этих целей используется незаполненный образцом контейнер. Измерив модуль и фазу коэффициента прохождения пустого контейнера и контейнера, заполненного измеряемым веществом, на основании формулы (3) можно вычислить модуль, $|S_{12}^s|$, и фазу, φ_s , коэффициента прохождения секции, заполненной образцом, применяя следующее выражение:

$$|S_{12}^s| = \frac{|S_{12}^m|_f}{|S_{12}^m|_e}, \quad (4)$$

где $|S_{12}^m|_f$ – модуль S_{12} контейнера с образцом, $|S_{12}^m|_e$ – модуль S_{12} – пустого контейнера,

$$\varphi_n = \varphi_f - (\varphi_e - \Delta\varphi), \quad (5)$$

где φ_f – фаза S_{12} контейнера с образцом, φ_e – фаза S_{12} пустого контейнера, $\Delta\varphi$ – это набег фаз электромагнитной волны на длине незаполненной секции контейнера, значение которого вычисляется по формуле:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi fL}{c}, \quad (6)$$

После проведения калибровочных расчетов с использованием формул (3)-(5) значение КДП образца можно получить, решая уравнение (1) при найденной величине S_{12} , соответствующей секции с веществом, относительно КДП образца ε_s^* . Однако данное уравнение трансцендентное и решение может быть получено только численными методами путем минимизации функционала, например, следующего вида:

$$\Phi(\varepsilon_s^*) = \left(|S_{12}^{exp}| - |S_{12}^{cal}|(\varepsilon_s^*) \right)^2 + \left(\varphi_{12}^{exp} - \varphi_{12}^{cal}(\varepsilon_s^*) \right)^2, \quad (7)$$

где $|S_{12}^{exp}|$ и φ_{12}^{exp} – измеренные значения модуля и фазы коэффициента S_{12} , $|S_{12}^{cal}|$ и φ_{12}^{cal} – рассчитанные значения модуля и фазы коэффициента S_{12} . Для минимизации функционала (6) использовался метод наискорейшего спуска [29].

Чтобы оценить точность метода измерения КДП, были проведены тестовые измерения веществ с известными значениями КДП и полученные результаты сравнивались с данными, доступными в литературе. В качестве эталонного вещества со значениями КДП, близким к КДП сухой почвы, был выбран фторопласт-4 (C_2F_4)_n. В качестве эталонного вещества со значениями КДП, близкими значениям КДП влажных почв, был выбран 1-бутанол (C_4H_9OH). Измеренные при температуре $T = 25$ °С спектры КДП 1-бутанола и фторопласта показаны на рис. 2. Сплошными линиями на рисунке показаны спектры КДП, полученные с использованием предложенного метода, символами показаны значения КДП из литературных источников [30, 31]. Относительное отклонение измеренных значений ДП и КП от табличных в диапазоне частот от 15 МГц до 15 ГГц не превышает в среднем соответственно 4 % и 0,01 (по абсолютному значению) для фторопласта, 8 % и 10 % для 1-бутанола. Используя описанную методику измерения, были восстановлены спектры КДП исследуемых образцов почв.

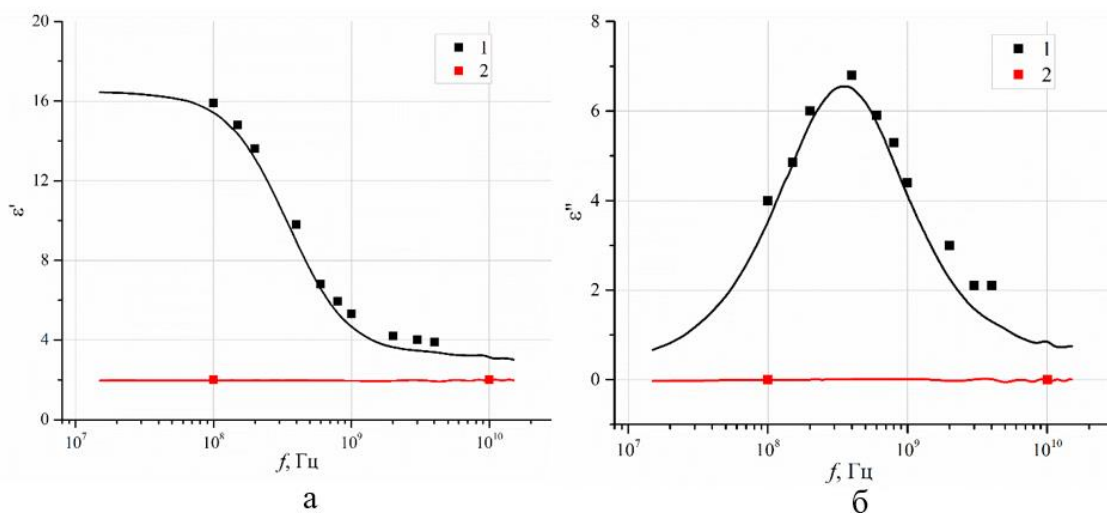


Рис. 2. Спектры ДП (а) КП (б) 1-бутанола (1) и фторопласта (2)
 Линиями обозначены результаты измерений,
 символами – данные из источников [30, 31].

2. Пересечение спектров ДП влажных почв с различным содержанием органического вещества

Спектры КДП каждой почвы были измерены для всех заданных влажностей и температур. В качестве примера на рис. 3 показаны спектры КДП почвы с содержанием органического вещества 21,4 % и влажностью 56,1 %, измеренные при разных температурах. На рис. 3 можно заметить, что частоты точек пересечения спектров ДП и КП не совпадают. Так, для спектров ДП пересечения наблюдаются вблизи частот: 110 МГц и 2,3 ГГц, а для спектров КП – вблизи частот 700 МГц и 13 ГГц. Причиной такого несовпадения является то, что функции, которые описывают ДП и КП разные. Таким образом, невозможно найти единые частоты для ДП и КП, на которых можно пренебречь температурной зависимостью. Однако, в методе TDR измеряемой величиной является время отклика сигнала, которая определяется фазовой скоростью электромагнитной волны в среде, которая в большей степени зависит от ДП, чем от КП. Поэтому в TDR методах используются модели, описывающие зависимость от влажности только вещественной части КДП [12, 13]. В связи с практической направленностью работы, дальнейшее исследование пересечений спектров в рамках данной работы будет ограничено только величиной ДП.

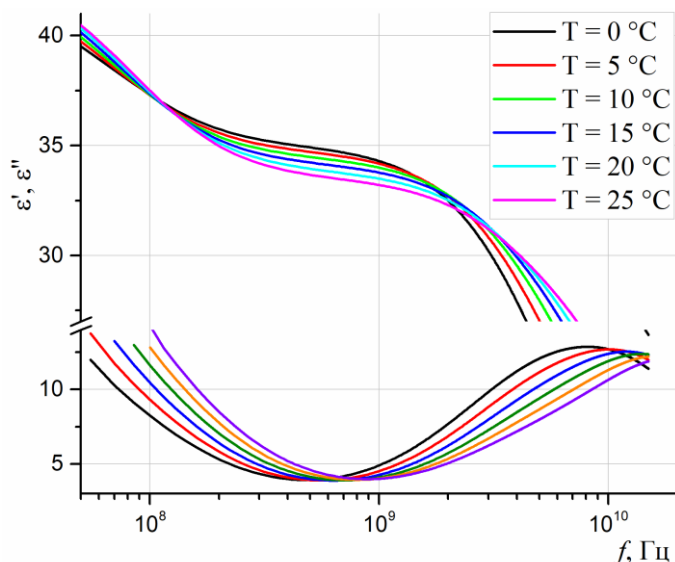


Рис. 3. Спектры ДП и КП почвы с содержанием органики 21,4 % и влажностью 51,3 %.

На рис. 4 показаны спектры ДП почвы с содержанием органического вещества 21,4 % для нескольких влажностей. Как можно видеть на рис. 4, для образцов с влажностями 15 % и 27,5 % пересечения спектров ДП почвы не наблюдаются. В то же время имеется область частот от 200 МГц до 2 ГГц, где спектры максимально сближаются друг с другом. При этом вариации значений ДП в данной частотной области не превышают 12 %.

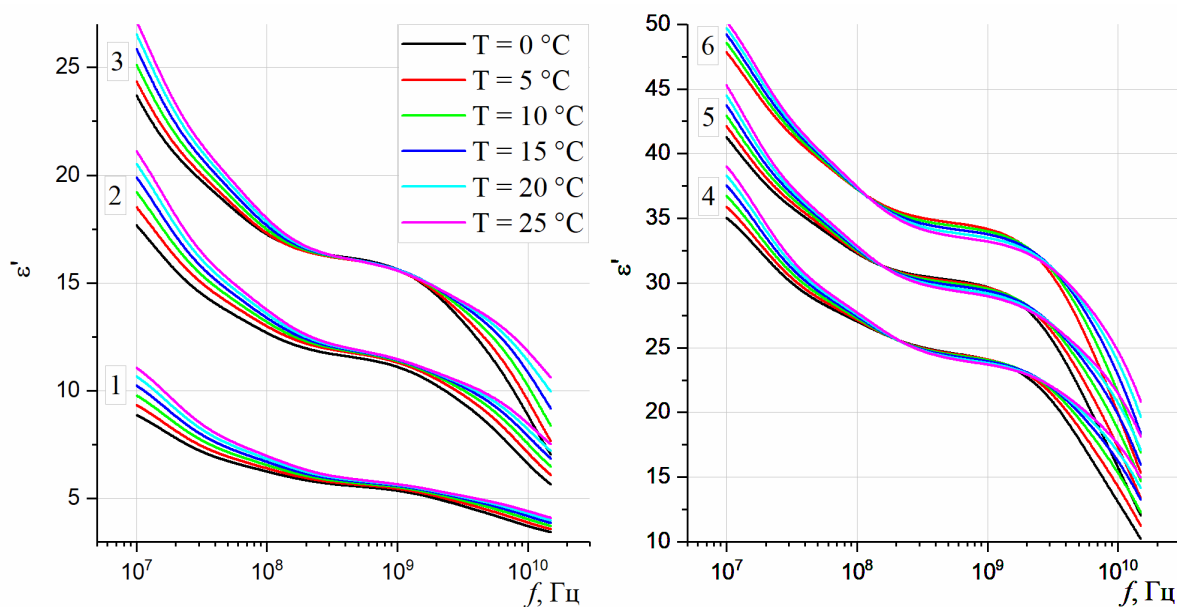


Рис. 4. Измеренные спектры диэлектрической проницаемости почвы с содержанием органического вещества 21,4 %, при следующих значениях объемной влажности: 1 – 15 %, 2 – 27,5 %, 3 – 33,8 %, 4 – 45 %, 5 – 51,3 %, 6 – 56,1 %.

Начиная с некоторой влажности, появляются две области пересечения спектров ДП почвы: одна – в мегагерцовом диапазоне частот, другая – в гигагерцовом. На частотах, при которых наблюдается пересечение спектров меняется характер температурной зависимости. До частоты первой точки пересечения, в мегагерцовом диапазоне частот (далее первая точка пересечения), и после частоты второй точки пересечения, в гигагерцовом диапазоне частот (далее вторая точка пересечения), при увеличении температуры ДП влажной почвы увеличивается. В частотной области между точками пересечения ДП влажной почвы уменьшается с увеличением температуры, однако в этой области температурная зависимость проявляется слабее по сравнению с остальными частотами спектра ДП почвы. Вариации значений ДП образцов почв, для которых характерны две области пересечения спектров ДП почвы, в частотном диапазоне между точками пересечения не превышают 8 % относительно средних значений. В соответствии с утверждением в [25], данные пересечения вызваны несколькими релаксационными процессами в отдельных категориях почвенной воды (связанная и несвязанная вода). Как было показано в [26], к возникновению точки пересечения в низкочастотной области приводит разный характер температурных зависимостей низкочастотных пределов ориентационной дипольной релаксации и релаксации Максвелла-Вагнера: низкочастотный предел ориентационной релаксации уменьшается, а релаксации Максвелла-Вагнера, наоборот, увеличивается с увеличением температуры.

Вторая точка пересечения появляется из-за уменьшения низкочастотного предела ДП и уменьшения времени ориентационной дипольной релаксации с увеличением температуры [26]. На рис. 4 видно, что с увеличением влажности первая и вторая точки пересечения расходятся относительно друг друга, вследствие чего увеличивается область частот между ними.

В работе [26] было показано, что пересечения спектров ДП возникают при влажности образцов, превышающей значение максимального содержания связанной воды. В органических почвах основное влияние на диэлектрические

свойства и максимальное содержание связанной воды оказывает содержание органического вещества. Поэтому, для того чтобы изучить влияние содержания органического вещества в почве и влажности на частоты пересечения, были исследованы зависимости частоты первой и второй точек пересечений спектров ДП от влажности для каждой почвы. Из рис. 4 можно увидеть, что положение точек пересечений отдельных пар спектров ДП почвы, измеренных при различных интервалах положительных температур, отличается, в результате чего, при изменении температуры от 0 до 25 °С наблюдается область частот пересечения спектров ДП некоторой ширины. В связи с этим, с целью упрощения, дальнейший анализ будет проведен для средней величины в интервалах изменения значений отдельно первой и второй частоты пересечения, $\overline{f_{c1,2}}$.

Введение средних частот пересечений в интервале положительных температур исключает из рассмотрения температурную зависимость положения точек пересечения спектров ДП почв. Значения средних частот пересечения в зависимости от объемной влажности показаны на рис. 5 символами, «усами» показаны диапазоны изменения средних частот точек пересечений пар спектров ДП образцов влажных почв, измеренных при любых неравных значениях температур из интервала от 0 до 25 °С. Для первой точки пересечения вариации средних значений частот составляют от 20 до 70 МГц для образцов разных влажностей, для средней частоты второй точки пересечения интервалы вариаций шире – от 290 МГц до 1,5 ГГц. На рис. 5 видно, что при некоторой влажности частоты обеих точек пересечения спектров ДП почв совпадают. При дальнейшем увеличении объемной влажности в каждой из почв средняя частота пересечения первой точки $\overline{f_{c1}}$ монотонно уменьшается и, в своем пределе, стремится к нулю. Средняя частота пересечения второй точки $\overline{f_{c2}}$ увеличивается с увеличением объемной влажности и стремится к некоторому постоянному значению. На рис. 5 видно, что средние величины частот точек пересечения обладают нелинейной зависимостью от влажности. Для почвы с максимальным содержанием органического вещества, равным 54,5 % (рис. 5, почва 5),

наблюдается только одна точка пересечения при влажности, соответствующей наименьшей влагоемкости.

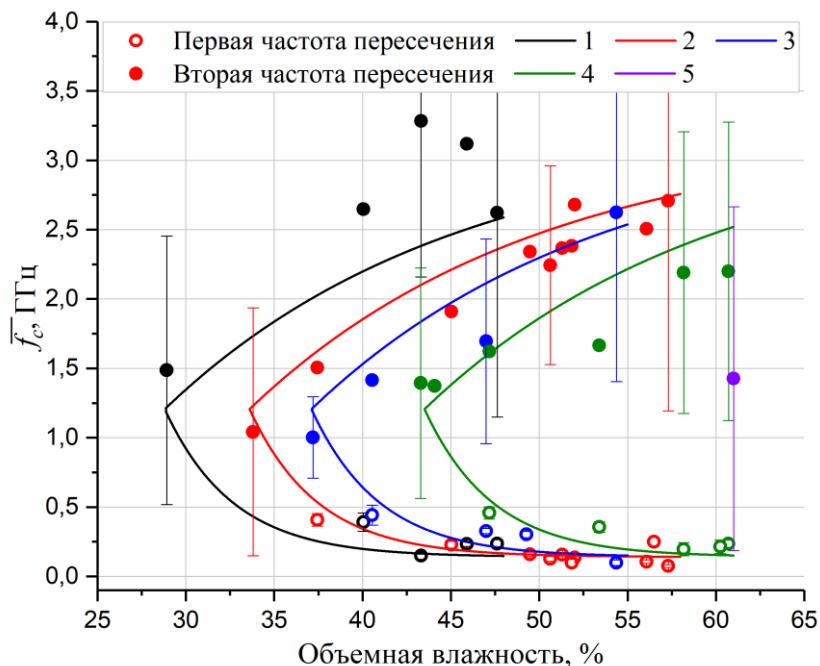


Рис. 5. Средние частоты первой и второй точек пересечения спектров ДП образцов почв в диапазоне температур от 0 до 25 °С в зависимости от объемной влажности при содержании органического вещества: 1 – 11,1 %, 2 – 21,4 %, 3 – 27,7 %, 4 – 31,1 %, 5 – 54,5 %. Символами показаны экспериментальные данные, линиями – результаты расчета по модели (1) с параметрами, приведенными в таблице 1.

Для описания полученных влажностных зависимостей средних частот точек пересечений была предложена следующая функция:

$$\overline{f_{c1,2}} = A_{1,2} e^{k_{1,2} \cdot (w - w_c)} + f_{01,2}, \quad (8)$$

для:

$$w \geq w_c,$$

где w – объемная влажность почвы, w_c – минимальное значение объемной влажности, при которой наблюдаются пересечения спектров ДП почвы, A , k и f_0 – эмпирические коэффициенты, индексы 1 и 2 при A , k и f_0 относятся к первой и второй точкам пересечения спектров ДП почвы соответственно. Для того, чтобы найти параметры влажностных зависимостей средних частот точек пересечения с использованием формулы (6), частоты пересечения

исследуемых почв, показанные на рис. 5, были построены в зависимости от разности ($w - w_c$). Данные зависимости показаны на рис. 6.

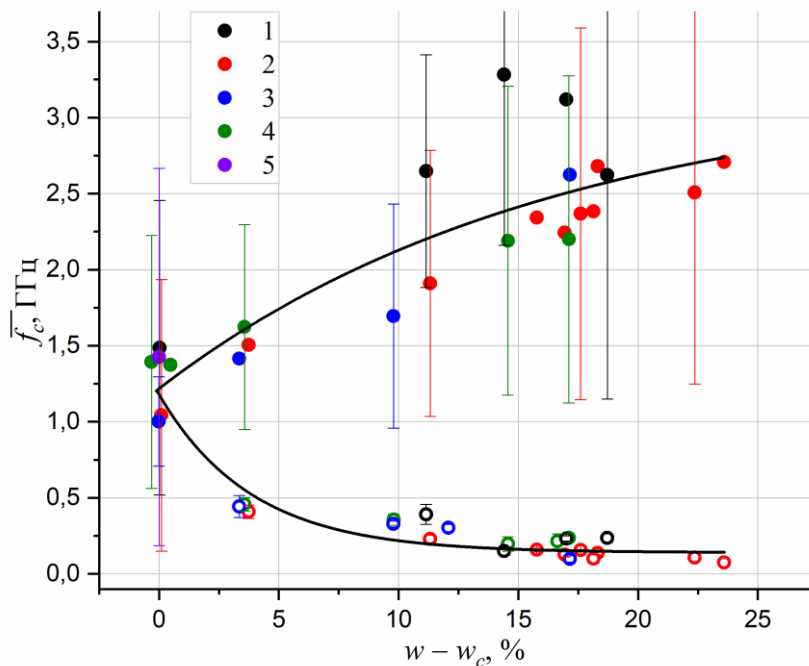


Рис. 6. Средние частоты первой и второй точек пересечения спектров ДП влажных почв в диапазоне температур от 0 до 25 °С в зависимости от ($w - w_c$), при содержании органического вещества: 1 – 11,1 %, 2 – 21,4 %, 3 – 27,7 %, 4 – 31,1 %, 5 – 54,5 %. Символами показаны экспериментальные данные, линиями – результаты аппроксимации всей совокупности данных с применением функции (8).

На рис. 6 видно, что вариации средних частот точек пересечений спектров ДП, полученных для всех исследуемых почв, при всех измеренных влажностях, не превышают диапазоны вариаций самих значений частот точек пересечений пар спектров ДП, полученных для любого интервала температур из диапазона от 0 до 25 °С. В связи с этим параметры A , k и f_0 определялись общими для всей совокупности исследуемых почв в результате аппроксимации данных, приведенных на рис. 6, с использованием функции (8) в качестве теоретической модели. Результаты аппроксимации показаны на рис. 6 линиями. Найденные значения параметров A , k и f_0 для первой и второй средней частоты точек пересечения приведены в таблице 1. Модельные зависимости $\overline{f_{c1}}(w)$, и $\overline{f_{c2}}(w)$ показаны на рис. 5 линиями. Очевидно, что расчетные значения $\overline{f_{c1}}(w)$, и $\overline{f_{c2}}(w)$ совпадают при минимальной влажности, при которой наблюдаются пересечения

спектров ДП почвы, w_c . Как можно заметить на рис. 5, w_c отличается для каждой почвы и ее значение растет с ростом органического вещества в почве. Для образцов почв с влажностью, равной w_c , наблюдается единственная точка пересечения спектров, частота которой для рассматриваемых почв варьируется от 1 до 1,5 ГГц, а среднее значение для данной частоты, полученное в результате аппроксимации с использованием формулы (8), составило 1,2 ГГц.

Таблица 1. Коэффициенты эмпирической модели для средних частот первой и второй точек пересечения спектров ДП почв.

	A	k	f_0
Первая точка пересечения	$1,04 \pm 0,09$	$-0,26 \pm 0,05$	$0,14 \pm 0,02$
Вторая точка пересечения	$-1,99 \pm 0,92$	$-0,06 \pm 0,05$	$3,21 \pm 0,95$

Поскольку значение w_c зависит от содержания органического вещества в почве, как это видно на рис. 5, то была построена соответствующая зависимость, которая показана на рис. 7. На рис. 7 видно, что w_c от содержания органического вещества в почве имеет нелинейную зависимость. В работе [27], при изучении влияния содержания глинистой фракции на спектры ДП минеральных почв, была получена подобная нелинейная зависимость w_c от содержания глинистой фракции, которая была описана с использованием экспоненциальной функции. В связи с этим и в данном исследовании при аппроксимации данных, показанных на рис. 7, также была использована экспоненциальная функция в качестве эмпирической модели, в результате чего было получено следующее выражение:

$$w_c = 40e^{0,012 \cdot C_o} - 17,7, \quad (9)$$

где C_o – содержание органического вещества в почве, %. Результат аппроксимации показан на рис. 7 линией.

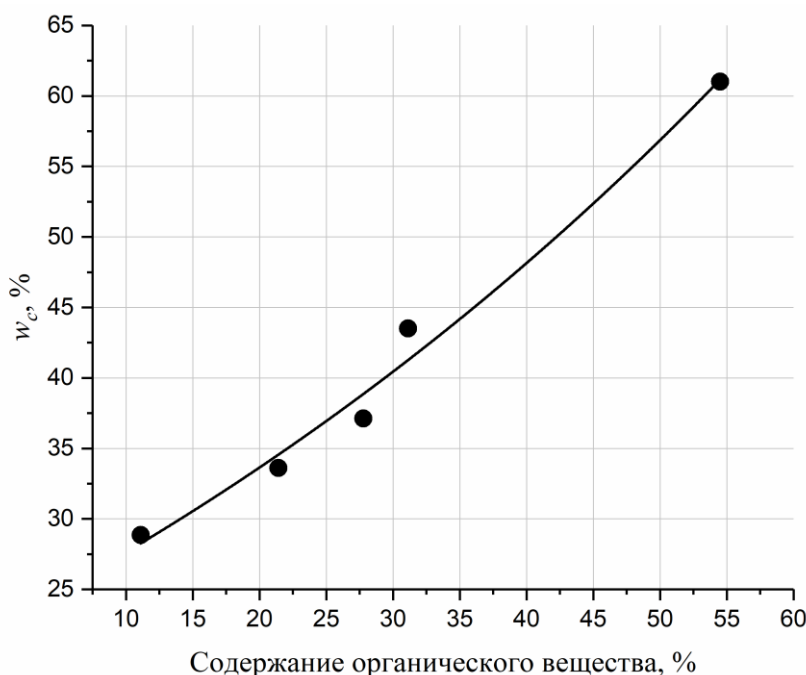


Рис. 7. Минимальное значение влажности, при котором появляются пересечения спектров ДП почв, в зависимости от содержания органического вещества. Символами показаны экспериментальные данные, линией – результат расчета по модели (9).

Заключение

В данной работе проведено исследование пересечений спектров ДП почв с различным содержанием органического вещества при положительных температурах. Для всех исследуемых почв была определена минимальная объемная влажность, w_c , при которой появляется пересечение спектров ДП почвы, при этом для влажности, равной w_c наблюдается только одно пересечение, а для влажностей, превышающих w_c – два. В то же время, когда объемное содержание воды в почве не превышает значение w_c , имеется область частот от 200 МГц до 2 ГГц, в которой наблюдается слабая температурная зависимость ДП почвы, при этом вариации значений ДП в данном частотном диапазоне не превышают 12 % относительно среднего значения при изменении температуры от 0 до 25 °С. Для образцов почв с влажностями, превышающими w_c , наблюдаются два пересечения спектров ДП почвы, полученных для одного значения влажности, но разных температурах. Для средних значений частот этих точек пересечений в интервале изменений,

для диапазона температур от 0 до 25 °С, была предложена эмпирическая модель, параметрами которой являются объемная влажность и содержание органического вещества. Кроме того, была предложена эмпирическая модель для описания зависимости w_c от содержания органического вещества.

Частоты пересечений спектров ДП влажных почв, измеренных для образцов одной влажности, но при разных температурах, разделяют участки спектров с различным характером температурной зависимости ДП почвы. Таким образом точки пересечения разделяют спектр ДП на диапазоны, в одних из которых ДП убывает с ростом температуры, а в других – возрастает. В частотной области возникновения пересечения спектров ДП при изменении температуры, температурная зависимость ДП минимальна. Полученные формулы позволяют рассчитать частотный диапазон областей с минимальной температурной зависимостью ДП почв, оценить частоты, при которых происходит изменение характера температурной зависимости ДП почв, что может найти применение в задачах совершенствования электрофизических методов измерения влажности и температуры.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта № 22-27-20112.

Литература

1. Fang H. Y., Daniels J. L. Introductory geotechnical engineering: an environmental perspective. – CRC Press, 2017.
2. Robinson D. A. et al. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review //Vadose zone journal. – 2008. – Vol. 7. – №. 1. – P. 358-389.
3. Ragab R. et al. The cosmic-ray soil moisture observation system (Cosmos) for estimating the crop water requirement: new approach //Irrigation and drainage. – 2017. – Vol. 66. – №. 4. – P. 456-468.

4. SU S. L., Singh D. N., Baghini M. S. A critical review of soil moisture measurement //Measurement. – 2014. – Vol. 54. – P. 92-105.
5. Robinson D. A. et al. On the effective measurement frequency of time domain reflectometry in dispersive and nonconductive dielectric materials //Water Resources Research. – 2005. – Vol. 41. – №. 2.
6. Bobrov P. P. et al. Soil moisture measurement by the dielectric method //Eurasian Soil Science. – 2019. – Vol. 52. – P. 822-833.
7. Muhammad M., Almushfi S. Dielectric analysis model for measurement of soil Moisture water content using electrical capacitance volume tomography //Modern Applications of Electrostatics and Dielectrics. – IntechOpen, 2019. – P. 73.
8. Mironov V. L., Bobrov P. P., Fomin S. V. Multirelaxation generalized refractive mixing dielectric model of moist soils //IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2012. – Vol. 10. – №. 3. – P. 603-606.
9. Кауричев И. С. и др. Почвоведение.; Под ред. ИС Кауричева. – 4-е изд., перераб. и доп //М.: Агропромиздат. – 1989.
10. Visconti F. et al. Laboratory and field assessment of the capacitance sensors Decagon 10HS and 5TE for estimating the water content of irrigated soils //Agricultural Water Management. – 2014. – Vol. 132. – P. 111-119.
11. Gardner C. M. K., Dean T. J., Cooper J. D. Soil water content measurement with a high-frequency capacitance sensor //Journal of Agricultural Engineering Research. – 1998. – Vol. 71. – №. 4. – P. 395-403.
12. Topp G. C., Davis J. L., Annan A. P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines //Water resources research. – 1980. – Vol. 16. – №. 3. – P. 574-582.
13. Noborio K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review //Computers and electronics in agriculture. – 2001. – Vol. 31. – №. 3. – P. 213-237.
14. Kelleners T. J. et al. Frequency dependence of the complex permittivity and its impact on dielectric sensor calibration in soils //Soil Science Society of America Journal. – 2005. – Vol. 69. – №. 1. – P. 67-76.

15. Kornelsen K. C., Coulibaly P. Advances in soil moisture retrieval from synthetic aperture radar and hydrological applications //Journal of Hydrology. – 2013. – Vol. 476. – P. 460-489.
16. Kerr Y. H. et al. The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle //Proceedings of the IEEE. – 2010. – Vol. 98. – №. 5. – P. 666-687.
17. Ahlmer A. K. et al. Soil moisture remote-sensing applications for identification of flood-prone areas along transport infrastructure //Environmental earth sciences. – 2018. – Vol. 77. - №. 14. – P. 533.
18. Wu Y. et al. Dielectric properties of saline soils and an improved dielectric model in C-band //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2015. – Vol. 53. – №. 1. – P. 440-452.
19. Garrison J. et al. Remote sensing of soil moisture using P-band signals of opportunity (SoOp): Initial results //2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – IEEE, 2017. – P. 4158-4161.
20. Hoekstra P., Delaney A. Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies //Journal of geophysical research. – 1974. – Vol. 79. – №. 11. – P. 1699-1708.
21. Logsdon S. D. Soil dielectric spectra from vector network analyzer data //Soil Science Society of America Journal. – 2005. – Vol. 69. – №. 4. – P. 983-989.
22. Hasar H. et al. Permittivity Extraction of Soil Samples Using Coaxial-Line Measurements by a Simple Calibration //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2023. – Vol. 61. – P. 1-8.
23. Loewer M. et al. Ultra-broad-band electrical spectroscopy of soils and sediments— A combined permittivity and conductivity model //Geophysical Journal International. – 2017. – Vol. 210. – №. 3. – P. 1360-1373.
24. Arcone S. A., Grant S. A., Boitnott G. E. Maxwell–Wagner relaxation in two desert soils at medium and high water contents: Interpretation from modeling of time domain reflectometry data //IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2015. – Vol. 9. – №. 1. – P. 201-211.

25. Chen Y., Or D. Effects of Maxwell-Wagner polarization on soil complex dielectric permittivity under variable temperature and electrical conductivity //Water resources research. – 2006. – Vol. 42. – №. 6.
26. Каравайский А. Ю., Лукин Ю. И. Влияние диэлектрических релаксаций почвенной воды на температурную зависимость диэлектрической проницаемости почвы //Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2023. – №. 1.
27. Karavayskiy A. Y., Lukin Y. I. The Effect of Clay Content on the Spectra of Permetivity of Mineral Soils at Positive Temperatures //2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – IEEE, 2023. – P. 456-459.
28. Mironov V. L. et al. A technique for measuring the frequency spectrum of the complex permittivity of soil //Journal of Communications Technology and Electronics. – 2010. – Vol. 55. – №. 12. – P. 1368-1373.
29. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. Учебник. – 2012. – 413 с.
30. ГОСТ 10007-80. Межгосударственный стандарт. Фторопласт-4. Технические условия. — М. : Стандартиформ, 2005. — 15 с.
31. Ахадов, Я. Ю. Диэлектрические параметры чистых жидкостей / Я. Ю. Ахадов. — М. : МАИ, 1999. — 856 с.

Для цитирования:

Каравайский А.Ю. Лукин Ю.И. Влияние органического вещества и влажности на пересечение спектров диэлектрической проницаемости почв. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.4.11>