

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.1.4>

УДК: 537.86, 631.432.2, 528.88

ВЛИЯНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЛАКСАЦИЙ ПОЧВЕННОЙ ВОДЫ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОЧВЫ

А.Ю. Каравайский, Ю.И. Лукин

**Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии
наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Красноярск, ул. Академгородок 50, стр.38**

Статья поступила в редакцию 25 ноября 2022 г.

Аннотация. С помощью обобщенной рефракционной диэлектрической модели смеси изучено влияние спектров относительной диэлектрической проницаемости связанной и несвязанной воды в минеральной почве на характер температурной зависимости относительной диэлектрической проницаемости естественной минеральной почвы, с содержанием глинистой фракции 41,3 %, в диапазоне частот электромагнитного поля от 50 МГц до 15 ГГц. Изучены причины появления пересечений спектров относительной диэлектрической проницаемости минеральной почвы, полученных при различных температурах, но для образца одной влажности. Доказано, что появление такой точки пересечения в диапазоне частот до 1,5 ГГц связано с эффектом Максвелла-Вагнера в связанной воде. Изучены зависимости частоты точки пересечения спектров относительной диэлектрической проницаемости минеральной почвы от температуры и объемного содержания связанной и несвязанной воды.

Ключевые слова: Диэлектрическая проницаемость, минеральная почва, влажность почв, связанная вода, 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

Повышение точности измерения влажности почв является важной задачей для сельского хозяйства, геофизики и биохимии. В последнее время широко используются методы измерения влажности почв, основанные на взаимодействии электромагнитного сигнала с почвой. К таким методам относится метод рефлектометрии во временной области (TDR, от англ. time domain reflectometry). Метод TDR предполагает измерение времени прохождения отраженного импульса через почву на заданное расстояние. Частотный диапазон спектра импульса может составлять от нескольких килогерц до нескольких гигагерц. Из полученного значения времени вычисляется эффективное значение вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) в частотной области спектра импульса. Существует эмпирическая формула Топпа [1], связывающая измеренное методом TDR эффективное значение вещественной части КДП с влажностью. Однако формула Топпа получена только для температуры 20 °С, кроме того, данная формула не учитывает различие в диэлектрических проницаемостях категорий воды в почвах. Также формула Топпа не учитывает влияние минералогического и гранулометрического состава почвы. В работе [2] предложено использовать для измерения влажности почв георадар, при этом метод восстановления влажности подобен методу TDR. Существуют емкостные датчики измерения влажности, основанные на принципе измерения времени перезарядки электродов, помещенных в почву [3], при этом время перезарядки зависит от емкости почвы, а значит, от ее диэлектрической проницаемости. Такие датчики работают до 100 МГц. В работах [4,5] предложен метод, который заключается в измерении коэффициента отражения электромагнитной волны в диапазоне частот

электромагнитной волны от 1 до 500 МГц с последующим восстановлением величины КДП. Для расчета влажности авторы [4, 5] также используют формулу Топпа, которую применяют к найденной вещественной части КДП. Таким образом, диэлектрическая проницаемость является важным параметром в соотношениях, связывающих величины, непосредственно измеряемые датчиками влажности, с самой величиной влажности.

Основными ключевыми факторами, влияющими на величину КДП почв, кроме самой влажности являются электропроводность, температура, текстура почвы, значения КДП категорий воды (связанная и несвязанная вода) [6-11]. Спектр КДП влажной почвы является результатом суперпозиции спектров КДП отдельных компонентов почвы. В почве компонентами смеси является твердая фаза, связанная вода, несвязанная вода и воздух. КДП твердой фазы и воздуха от частоты практически не зависят, а для КДП связанной и несвязанной воды наблюдается частотная зависимость, при этом значения КДП различных категорий воды могут различаться. Известно, что частотная зависимость КДП воды вне почвы с хорошей точностью описывается релаксационной моделью Дебая [12]. Для спектров КДП влажных почв разного гранулометрического состава на частотах выше 1 – 2 ГГц в работе [13] было отмечено качественное соответствие однорелаксационным спектрам «дебаевского» типа, однако на частотах ниже 1 ГГц была замечена дополнительная релаксация. Данная релаксация относится к эффекту Максвелла-Вагнера, обусловленному перераспределением зарядов на границе между твердой и жидкой компонентами [8,14-19].

Эффект Максвелла-Вагнера в мегагерцовой области частот приводит к увеличению значения КДП с уменьшением частоты электромагнитной волны. Кроме того, в работе [16] было показано, что из-за влияния эффекта Максвелла-Вагнера наблюдается узкая область частот, на которых происходит пересечение спектров вещественной части КДП влажной почвы, полученных для различных положительных температур. Точка пересечения спектров определяет значение частоты (или узкий диапазон частот), ниже которой вещественная часть КДП

уменьшается, а выше – увеличивается с уменьшением температуры. Авторами [16] была исследована зависимость точки пересечения спектров вещественной части КДП влажной почвы от ее электропроводности, однако не было изучено влияние влажности на отмеченную точку пересечения.

Важность изучения поставленного вопроса заключается в том, что при определении влажности почвы наземными датчиками или дистанционными методами, вероятно, следует учитывать различие характера температурной зависимости диэлектрической проницаемости в различных частотных диапазонах из-за влияния эффекта Максвелла-Вагнера на низких частотах. В литературе [20,21] отмечается, что часто заводские калибровки различных датчиков влажности дают большую погрешность и требуют индивидуальной калибровки для почв с высоким содержанием глины и органического вещества. Именно для глинистых и органических почв характерна высокая удельная площадь поверхности, а значит, эффект Максвелла-Вагнера проявляется в большей степени. Вообще, целесообразно создавать датчики для измерения влажности в диапазоне частот, где зависимость от температуры минимальна или совсем отсутствует. В связи с этим изучение частоты пересечения спектров КДП, влажных почв является актуальной задачей.

В настоящей работе было показано, что предложенная ранее в работе [6] модель КДП почвы, разработанная на основе рефракционной модели диэлектрической проницаемости смеси для совокупности минеральных почв, учитывает особенности температурной зависимости КДП почвы в низкочастотной области, связанные с влиянием эффекта Максвелла-Вагнера. Также с помощью предложенной в [6] модели КДП почвы был изучен вклад спектров диэлектрической проницаемости отдельных категорий почвенной воды на спектр диэлектрической проницаемости влажной почвы. Исследовано влияние температурных зависимостей вещественных частей КДП категорий воды на температурную зависимость вещественной части КДП влажной почвы в диапазоне частот от 50 МГц до 15 ГГц и в диапазоне температур от 0 до 25 °С. Исследовано влияние влажности на точку пересечения полученных при

различных положительных температурах спектров вещественной части КДП почв.

1. Спектр диэлектрической проницаемости однородного диэлектрика с одним релаксационным процессом электрической поляризации

Перед тем как перейти к анализу спектров диэлектрической проницаемости почвы, рассмотрим влияние температурных зависимостей параметров спектра модели Дебая на спектры КДП некоторого гипотетического однородного диэлектрика с помощью моделирования спектров КДП диэлектрика для различных положительных температур. При расчетах спектров КДП за основу взяты параметры дистиллированной воды вне почвы. Однорелаксационная модель Дебая записывается в следующем виде [12]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 - i2\pi f\tau}, \quad (1)$$

где $\varepsilon^* = \varepsilon' + i\varepsilon''$ – КДП диэлектрика, ε' – относительная диэлектрическая проницаемость (ОДП), ε'' – коэффициент диэлектрических потерь (КП), $i = \sqrt{-1}$, ε_∞ – высокочастотный предел диэлектрической проницаемости (ВПДП), ε_0 – низкочастотный предел диэлектрической проницаемости (НПДП), f – частота электромагнитного поля, τ – время релаксации.

Поскольку на фазовую скорость и коэффициент отражения электромагнитной волны, которые непосредственно измеряются датчиками влажности, оказывает влияние в большей мере величина ОДП, ε' , тогда как величина КП, ε'' , определяет затухание электромагнитной волны, далее анализ будет проводиться только спектров ОДП.

Формула (1) достаточно хорошо описывает спектры биполярных диэлектриков, к которым относится и вода. На рис. 1 показаны температурные зависимости НПДП и времени релаксации дистиллированной воды, построенные по формулам из [22]. Из рис. 1 видно, что НПДП и время релаксации монотонно увеличиваются с уменьшением температуры.

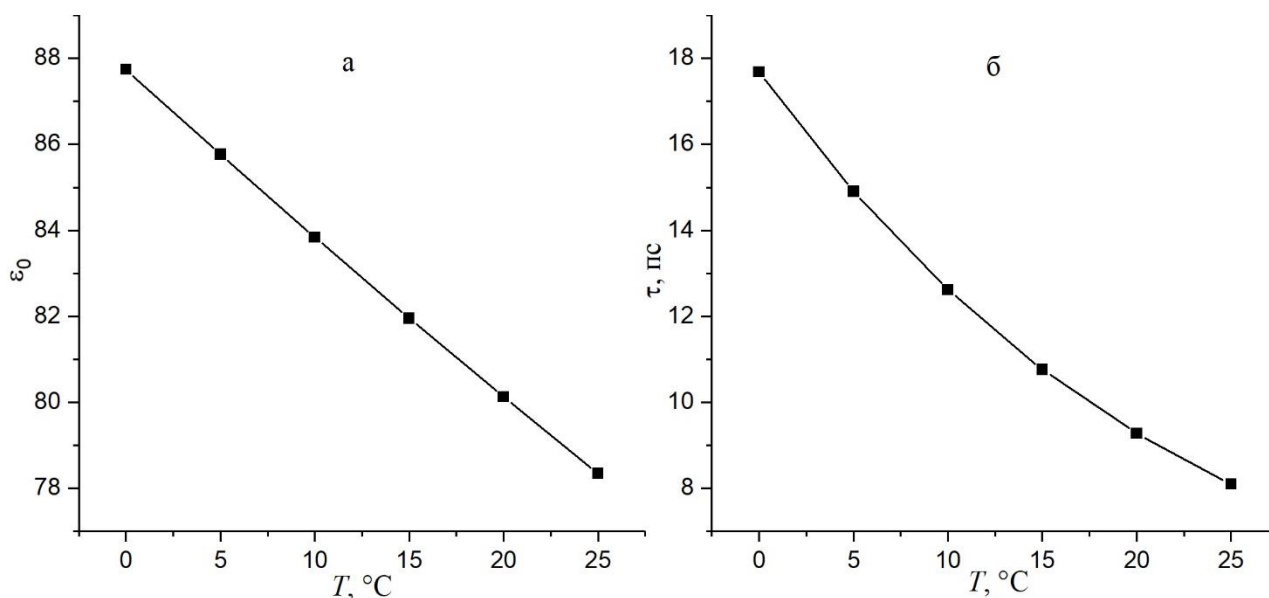


Рис. 1. НПДП (а) и время релаксации (б) параметров модели КДП Дебая для воды в зависимости от температуры

Используя формулу (1) и значения спектроскопических параметров воды, показанных на рис. 1, были рассчитаны спектры ОДП воды для ряда положительных температур в диапазоне частот от 50 МГц до 15 ГГц, которые показанные на рис. 2, при этом значение ВПДП было использовано равное 4,9. На рис. 2 можно видеть, что в низкочастотной области значения ОДП уменьшаются с уменьшением температуры, а в высокочастотной области, наоборот, значения ОДП увеличиваются с уменьшением температуры. Таким образом, при совместном анализе спектров ОДП, полученных при различных температурах, видна точка пересечения спектров, частота которой зависит от температур, при которых получены спектры ОДП, и находится в диапазоне от 3,8 до 5,8 ГГц.

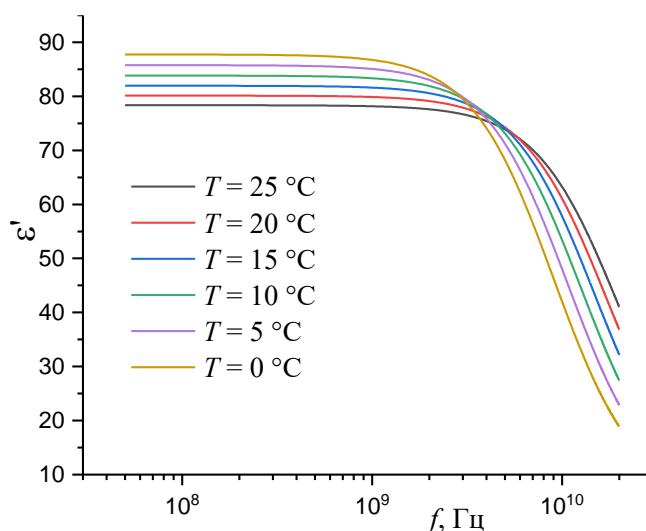


Рис. 2. Рассчитанные частотные спектры ОДП воды

По данным [6] величины НПДП низкочастотных релаксаций, обусловленных эффектом Максвелла-Вагнера, уменьшаются с уменьшением температуры, а значения времен релаксаций слабо меняются в диапазоне положительных температур. Поэтому были исследованы точки пересечения спектров ОДП, построенных с использованием формулы (1), для убывающей температурной зависимости НПДП и для независимого от температуры времени релаксации. Построенные спектры ОДП для случая убывающей величины НПДП и возрастающего времени релаксации с уменьшением температуры показаны на рис. 3в. Температурные зависимости параметров спектра для этого случая показаны на рис. 3а и рис. 3б. Спектры ОДП для возрастающей с уменьшением температуры величины НПДП, но постоянного значения времени релаксации показаны на рис. 3е, при этом температурные зависимости спектроскопических параметров показаны на рис. 3г и рис. 3д. В первом случае, как можно видеть на рис. 3в, пересечения спектров ОДП воды отсутствуют, и все

линии спектров идут практически параллельно друг другу.

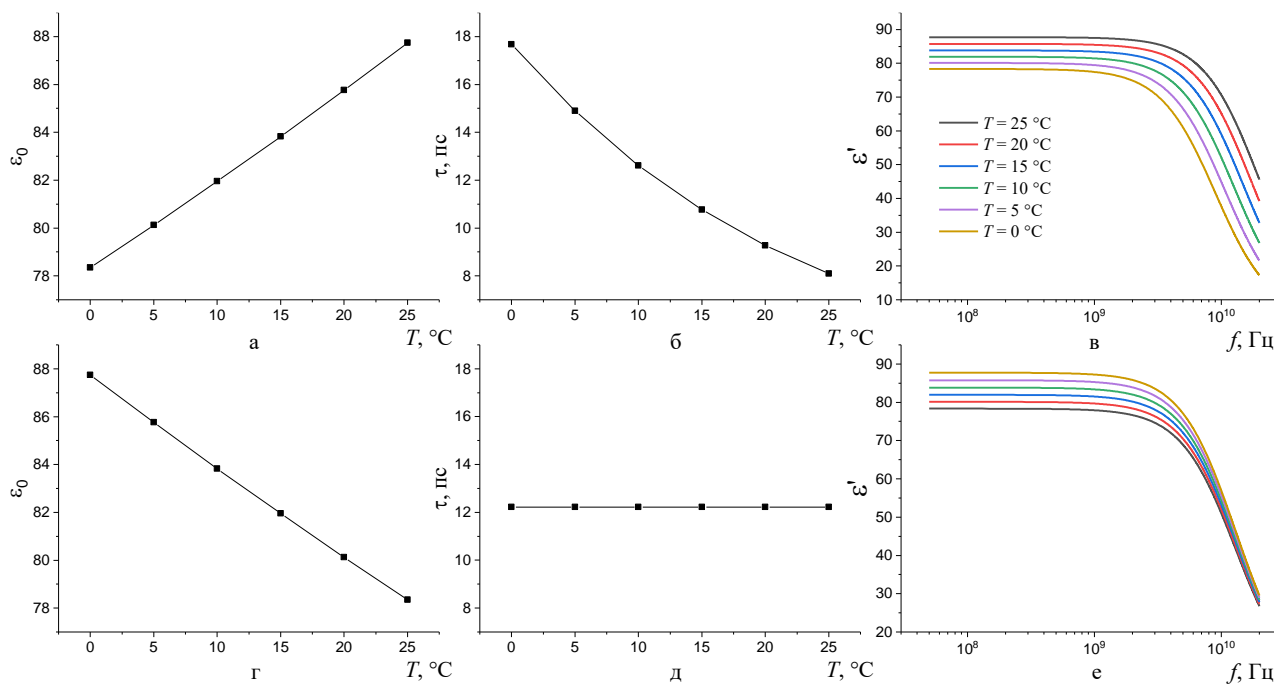


Рис. 1. Рассчитанные частотные спектры ОДП воды (в и е) для двух вариаций температурных зависимостей НПДП и времени релаксации: 1 – а,б; 2 – г,д

Во втором случае, как видно на рис. 3е, пересечения спектров ОДП воды, полученных для различных температур, также не наблюдаются. Отсутствие пересечений спектров ОДП, показанных на рис. 3е, возможно, только когда температурная зависимость ВПДП практически отсутствует, что верно для воды.

Таким образом, результаты анализа рассчитанных спектров ОДП диэлектриков с одним поляризационным процессом показали, что пересечения спектров ОДП, полученных для различных температур, возможны только при условии монотонного увеличения величин НПДП и времени релаксации при уменьшении температуры.

2. Спектры ОДП почвенной воды

Минеральная составляющая почвы не имеет ярко выраженную частотную дисперсию ОДП. В связи с этим основным компонентом почвы, влияющим на спектр ОДП, является вода, которая в почве может быть в связанном и несвязанном состоянии. При этом спектроскопические характеристики диэлектрической проницаемости связанной и несвязанной воды могут

существенно различаться. Для того чтобы оценить влияние спектров отдельных категорий воды на спектр влажной почвы, была использована обобщенная рефракционная диэлектрическая модель смеси (ОРДМС), разработанная для ряда минеральных почв в работе [6]. Нормированное среднеквадратичное отклонение рассчитанных по модели ОРДМС значений от измеренных составляет 5 % для ОДП и 25 % для КП. С помощью ОРДМС из спектров КДП влажной минеральной почвы были получены спектроскопические параметры каждой категории воды в почве в диапазоне положительных температур и построены сами спектры ОДП этих категорий воды.

В условиях взаимодействия молекул воды с частицами почвы для почвенной воды кроме ориентационной релаксации диполей характерны дополнительные релаксации, вызванные поляризацией Максвелла-Вагнера, проявляющиеся на частотах ниже 1 ГГц. Поляризация Максвелла-Вагнера в ОРДМС учитывается путем использования многорелаксационной формулы Дебая для описания КДП категорий почвенной воды. Регрессионный анализ, проведенный в работе [6] на примере естественных минеральных почв с содержанием глинистой фракции от 9 до 41 % показал, что в рассматриваемом диапазоне частот и температур для описания диэлектрической проницаемости связанной воды следует учитывать три релаксации, для несвязанной воды – две. В результате многорелаксационное уравнение Дебая, описывающее ОДП категорий почвенной воды, можно записать в следующем виде:

$$\varepsilon_w^* = \frac{\varepsilon_{0w1} - \varepsilon_{0w2}}{1 - i2\pi f\tau_{w1}} + \frac{\varepsilon_{0w2} - \varepsilon_{0w3}}{1 - i2\pi f\tau_{w2}} + \frac{\varepsilon_{0w3} - \varepsilon_{\infty w}}{1 - i2\pi f\tau_{w3}} + \varepsilon_{\infty w}, \quad (2)$$

где номера индексов обозначают параметры спектров КДП первой, второй и третьей релаксации. Индекс w обозначает категорию почвенной воды: $w = b$ – связанная вода, $w = u$ – несвязанная вода. Для расчета КДП несвязанной воды из формулы (2) следует исключить первое слагаемое.

Рассчитанные с помощью формул, приведенных в [6], значения НПДП и времен релаксаций связанной и несвязанной воды в зависимости от температуры показаны на рис. 4. Используя спектроскопические параметры, показанные на

рис. 4, были найдены спектры ОДП категорий почвенной воды в диапазоне частот от 50 МГц до 15 ГГц, которые для ряда положительных температур показаны на рис. 5. На рис. 5а приведены спектры ОДП связанной воды, где видно, что пересечений не наблюдается. Во всей области частот исследуемого диапазона наблюдается уменьшение ОДП связанной воды с уменьшением температуры. Однако в диапазоне частот от 1 до 3 ГГц можно заметить, что значения ОДП связанной воды, полученные при различных температурах, слабо различаются друг от друга по сравнению с остальной областью частот. Изменение ОДП в диапазоне частот от 1 до 3 ГГц при изменении температуры не превышают 7 % от средней величины ОДП связанной воды в данном частотном диапазоне.

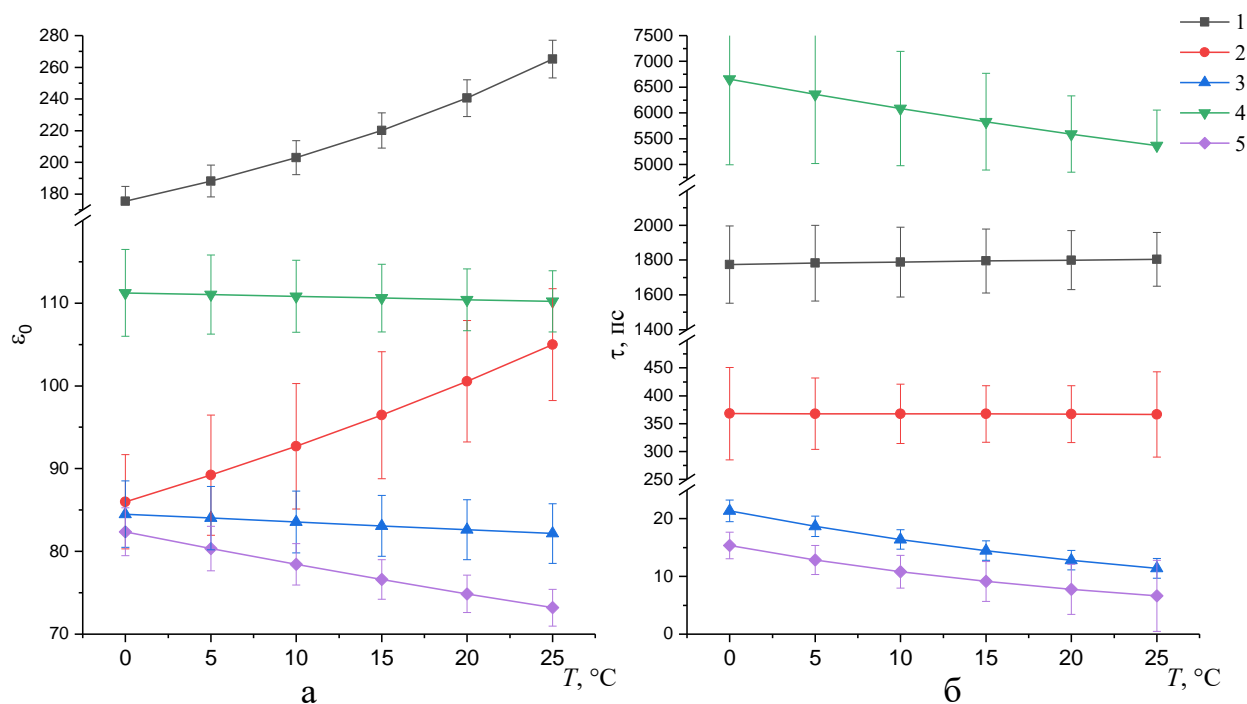


Рис. 4. НПДП и время релаксации связанной и несвязанной воды. 1 – первая релаксация связанной воды, 2 – вторая релаксация связанной воды, 3 – третья релаксация связанной воды, 4 – первая релаксация несвязанной воды, 5 – вторая релаксация несвязанной воды

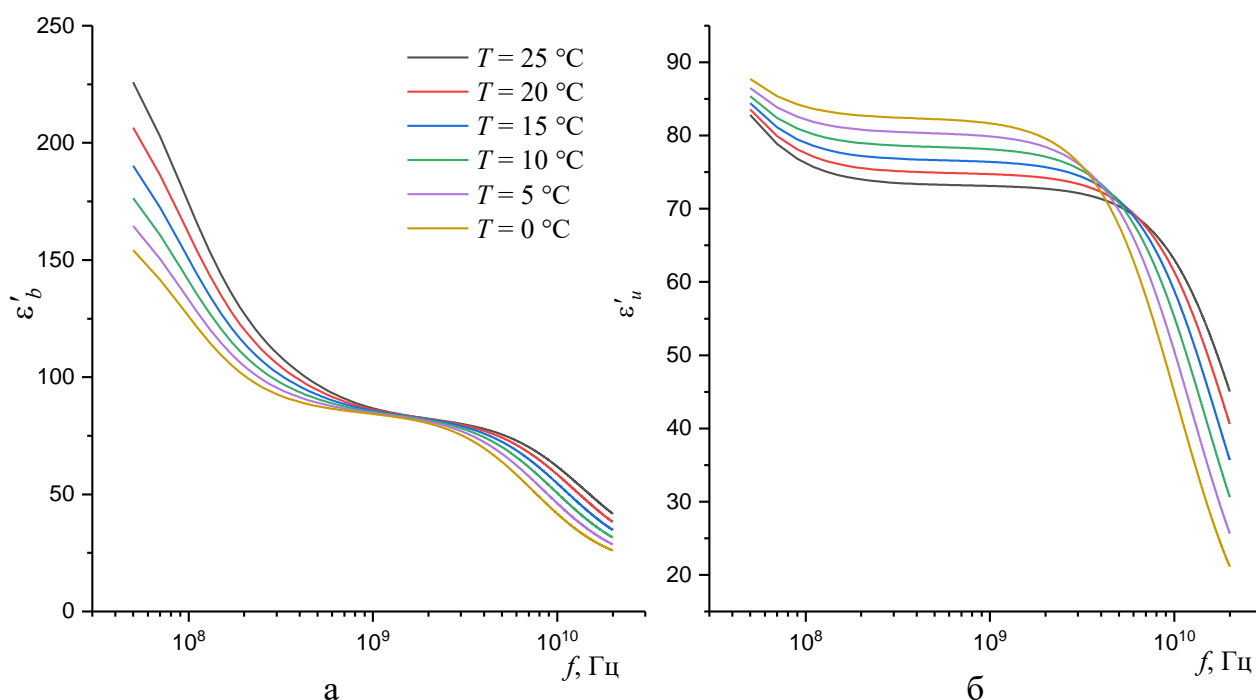


Рис. 5. Рассчитанные спектры ОДП связанной (а) и несвязанной (б) воды

На рассчитанных спектрах ОДП несвязанной воды, показанных на рис. 5б, видны точки пересечения в области частот от 3 до 7 ГГц. Таким образом, можно выделить область частот, где ОДП несвязанной воды увеличивается с уменьшением температуры (на частотах ниже точки пересечения) и область, где ОДП несвязанной воды уменьшается с уменьшением температуры (на частотах выше точки пересечения).

Для того чтобы объяснить поведение спектров ОДП категорий почвенной воды при изменении температуры, рассмотрим температурные зависимости спектроскопических параметров: НПДП и времен релаксаций, показанных на рис. 4. НПДП первой и второй релаксации связанной воды убывают с уменьшением температуры, а соответствующие величины времен релаксаций растут. В результате возникает случай, рассмотренный в предыдущем разделе на рис. 3а-в, где наблюдается уменьшение ОДП с уменьшением температуры. Однако НПДП третьей релаксации связанной воды незначительно, но увеличивается от 82 до 84 с уменьшением температуры, а также время третьей релаксации увеличивается с уменьшением температуры. Такое поведение параметров третьей релаксации приводит к максимальному сближению спектров

ОДП связанной воды в области частот от 1 до 3 ГГц для всех рассматриваемых температур, однако их пересечение не происходит, т.к. диапазон изменения НПДП третьей релаксации существенно ниже диапазона изменения НПДП других релаксаций, а значит и ее вклад в спектр ОДП связанной воды не может изменить характер температурной зависимости ОДП.

Для НПДП первой и второй релаксации несвязанной воды, показанных на рис. 4а, наблюдается увеличение значений при уменьшении температуры. Времена обеих релаксаций растут с уменьшением температуры, как можно видеть на рис. 4б. Температурная зависимость спектроскопических параметров несвязанной воды подобна температурной зависимости этих параметров воды вне почвы, которые показаны на рис. 1. Значения спектроскопических параметров высокочастотной релаксации несвязанной воды близки к этим параметрам для воды вне почвы, так, для несвязанной воды значения НПДП изменяются с 73 до 82 с уменьшением температуры, а у воды вне почвы НПДП изменяются с 78 до 87. Значение времени второй релаксации несвязанной воды близко значению времени релаксации воды вне почвы. В результате наблюдается пересечение спектров ОДП несвязанной воды в диапазоне частот от 3 до 7 ГГц, что близко значениям частот, на которых наблюдаются пересечения спектров ОДП воды вне почвы, показанных на рис. 2.

3. Спектры ОДП влажных образцов почвы.

В предыдущем разделе были исследованы спектры ОДП отдельных категорий воды, полученных из экспериментальных спектров КДП образцов почвы различных влажностей с помощью описанной в [6] методики, предполагающей использование ОРДМС. Выражение для ОРДМС записывается в следующем виде:

$$\frac{n_s^*(m_g, f, T) - 1}{\rho_d(m_g)} = \begin{cases} \frac{n_m^* - 1}{\rho_m} + \frac{n_b^*(f, T) - 1}{\rho_b} m_g, & m_g \leq m_{gt}, \\ \frac{n_m^* - 1}{\rho_m} + \frac{n_b^*(f, T) - 1}{\rho_b} m_{gt} + \frac{n_u^*(f, T) - 1}{\rho_u} (m_g - m_{gt}), & m_g > m_{gt}, \end{cases} \quad (3)$$

где n^* – комплексный показатель преломления, ρ – плотность г/см³, m_g – массовая влажность образца г/г, m_{gt} – максимальное содержание связанной воды при фиксированной температуре. Индексы s , d , m , b и u , которые связаны с n и ρ , относятся к влажной почве, сухой почве, минеральной компоненте, связанной и несвязанной воде, соответственно. Комплексный показатель преломления связан с КДП следующим образом:

$$n_s^* = n_s + ik_s = \sqrt{\varepsilon_s^*} = \sqrt{\varepsilon_s' + i\varepsilon_s''}, \quad (4)$$

где n_s и k_s являются, соответственно, показателем преломления и коэффициентом затухания электромагнитной волны в измеряемом образце. Массовая влажность m_g связана с объемной влажностью W следующим соотношением:

$$W = m_g \frac{\rho_d}{\rho_w}, \quad (5)$$

где

$$\rho_w = \begin{cases} \rho_b, & m_g \leq m_{gt}, \\ \rho_u, & m_g > m_{gt}. \end{cases}$$

Более подробное описание ОРДМС изложено в [6].

В основе формулы (3) лежит рефракционная модель диэлектрической смеси [23], концепция которой заключается в том, что показатель преломления гетерогенной диэлектрической смеси является суммой показателей преломления отдельных компонент смеси, умноженных на объемную долю этих компонент в смеси. ОРДМС в виде формулы (3) записана для следующих четырех компонент почвы: минеральная составляющая, воздух, связанная вода и несвязанная вода. Таким образом в концепции рефракционной модели диэлектрической смеси заложено предположение, что спектр диэлектрической проницаемости складывается из отдельных компонентов с некоторыми весовыми коэффициентами, которыми в рефракционной модели являются объемные доли компонент, а в формуле (3) – массовые. Весовые коэффициенты определяют вклад спектра диэлектрической проницаемости отдельного компонента в спектр диэлектрической проницаемости всей смеси.

Для того чтобы изучить влияние вклада отдельных компонент почвы на точку пересечения спектров ОДП образцов почвы, полученных при различных температурах, были использованы рассчитанные спектры ОДП с помощью модели ОРДМС (3) и модели КДП категорий почвенной воды (2) с параметрами спектров КДП, показанными на рис. 4. Значения параметров сухой почвы, а также значения максимального количества связанной воды, в рассматриваемом диапазоне температур были взяты в работе [6]. Используемые параметры ОРДМС были найдены для естественной минеральной почвы с содержанием глинистой фракции 41,3 %, ила 57,1 %, песка 1,6 %. Используя ОРДМС были рассчитаны спектры ОДП образца почвы с влажностью $m_g=0,10$, в котором содержится только связанная вода, и образца с влажностью $m_g=0,26$, в котором содержится как связанная, так и несвязанная вода. Рассчитанные спектры ОДП для данных влажностей показаны на рис. 6.

На рис. 6а можно видеть, что для образца, в котором содержится только связанная вода, образец с влажностью $m_g=0,10$, спектры ОДП почвы подобны спектрам ОДП связанной воды и соответственно, как и в случае со связанной водой, в диапазоне частот от 1 до 3 ГГц имеют очень близкие значения друг-другу. Изменение значения ОДП почвы при изменении температуры в данном частотном диапазоне находится в пределах 3 % от средней величины ОДП почвы в данном частотном диапазоне. Максимальное сближение спектров ОДП почвы наблюдается на частоте 1,6 ГГц.

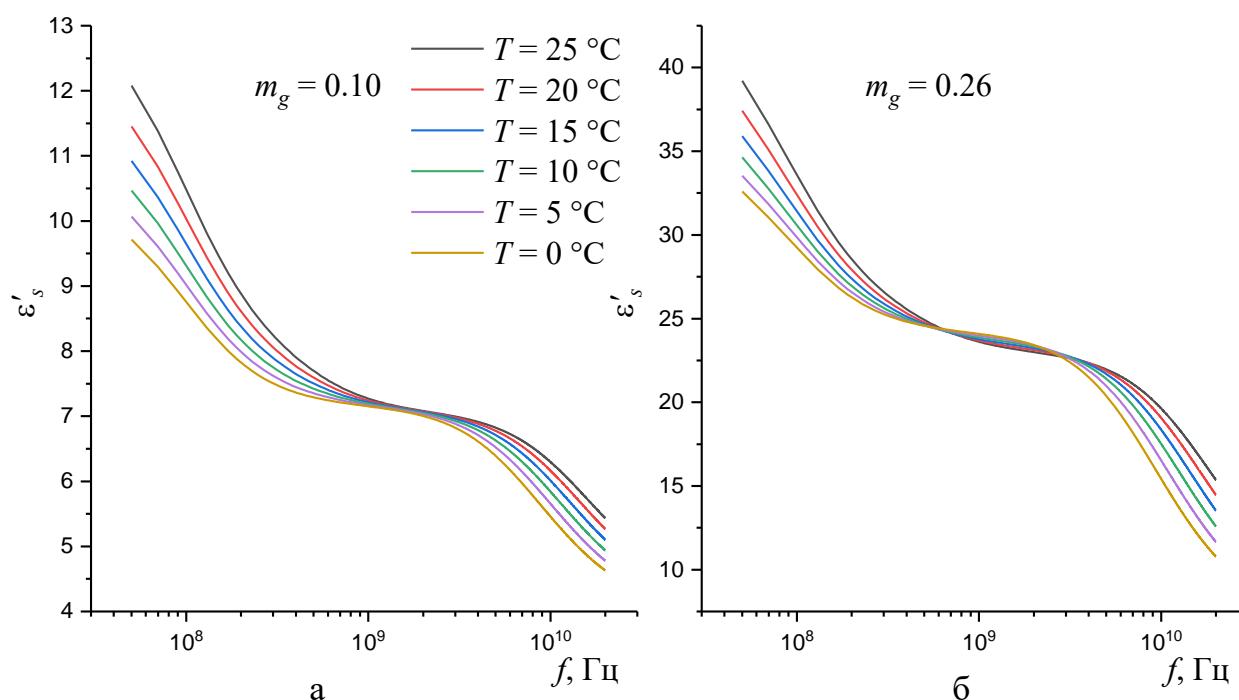


Рис. 2. Спектры ОДП образцов почвы с влажностями $m_g=0,10$ (а) и $m_g=0,26$ (б)

В случае, когда в образце содержится как связанная, так и несвязанная вода (рис. 6б), образец с влажностью $m_g=0,26$, наблюдаются две области пересечения спектров: на частотах около 700 МГц и на частотах около 3 ГГц. Точки пересечения, которые находятся в высокочастотной области, расположены в том же диапазоне частот, что и пересечение спектров ОДП несвязанной воды. Появление точки пересечения спектров ОДП почвы в низкочастотной области связано с наложением спектров ОДП связанной и несвязанной воды. Как мы видим на рис. 5, в низкочастотной области ОДП несвязанной воды уменьшается с уменьшением температуры, в то время как ОДП несвязанной воды в этом частотном диапазоне, напротив, увеличивается. Но так как значение ОДП связанной воды выше, то и для значений ОДП почвы наблюдается уменьшение с уменьшением температуры. В области частот от 500 МГц до 3,5 ГГц, для образца с влажностью $m_g=0,26$, спектры ОДП расположены наиболее близко друг к другу по сравнению со всем диапазоном частот измерения, при этом разброс значений ОДП не превышает 7 % от средней величины ОДП почвы в данном частотном диапазоне.

Далее была проведена оценка смещения частоты, на которой пересекаются спектры ОДП почвы, от температуры. Для этого у образца с влажностью $m_g=0,26$ были найдены точки пересечения спектра ОДП почвы, рассчитанного для температуры $T=25$ °С, со спектрами ОДП этого же образца, рассчитанных для других положительных температур. На рис. 7 показана полученная температурная зависимость частоты, на которых пересекаются спектры ОДП почвы. На рис. 7 видно, что частота низкочастотного пересечения спектров ОДП мало меняется во всем рассматриваемом диапазоне положительных температур. Поэтому данная частота может быть полезна для задач определения влажности методом TDR или в алгоритмах дистанционного зондирования, так как позволяет минимизировать влияние температуры. В свою очередь вторая точка пересечения зависит от температуры и монотонно увеличивает свое значение в диапазоне частот от 2,8 до 4 ГГц.

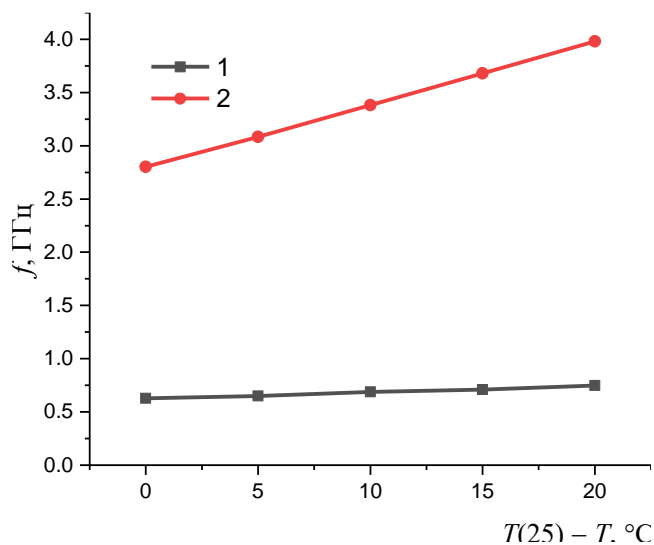


Рис. 3. Температурная зависимость первой (1) и второй (2) точек пересечения спектров ОДП почвы, измеренных в диапазоне температур от 20 до 0 °С, со спектром ОДП, измеренном для температуры 25 °С, для образца с влажностью $m_g=0,26$

На пересечение спектров ОДП непосредственное влияние оказывает и влажность образца. На рис. 8 показаны спектры ОДП образцов различных влажностей, рассчитанных для двух положительных температур: 25 и 5 °С. На рис. 8 можно видеть, что пересечения спектров ОДП появляются для образцов с влажностями больше 0,16, то есть для всех образцов, в которых содержится как

связанная, так и несвязанная вода. Для образцов с влажностями меньше 0,16 наблюдается участок частот от 1 до 3 ГГц, в котором значения ОДП, полученных для разных температур, но одной влажности, близки. Таким образом, при малом значении влажности, когда в почве присутствует только связанная вода, использование диапазона частот от 1 до 3 ГГц позволяет также уменьшить влияние температуры в задачах определения влажности с помощью датчиков TDR и др.

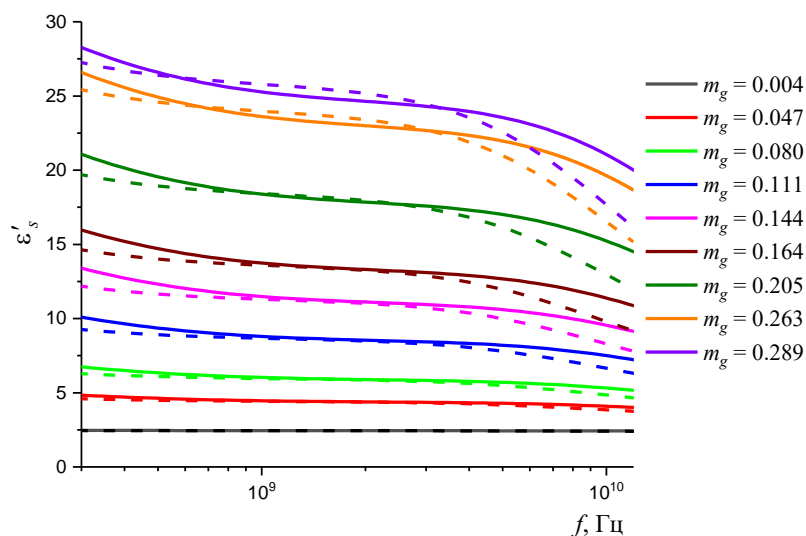


Рис. 4. Спектры ОДП для образцов различных влажностей при температуре 25 °C (сплошная линия) и 5 °C (пунктирная линия)

Как было отмечено выше, пересечения спектров ОДП, полученных для различных температур, являются следствием сложения спектров ОДП отдельных компонентов почвы. В качестве примера были изучены частоты, на которых наблюдается пересечение спектров ОДП минеральной почвы с содержанием глинистой фракции 41.3 %, в зависимости от объемной доли несвязанной воды в образце. Для этого были рассчитаны спектры ОДП почвы для температур 25 и 5 °C, для образцов, у которых объемная влажность W больше максимальной объемной влажности связанной воды W_t . Полученная температурная зависимость показана на рис. 9.

На рис. 9 видно, что при увеличении относительного содержания несвязанной воды в образце, частота первой точки пересечения монотонно уменьшается и в своем пределе стремится к 0. При объемной влажности $W=100\%$ частота, на которой наблюдается пересечение спектров ОДП почвы,

оказалась равной 100 МГц. Частота второй точки пересечения стремится к частоте 4,2 ГГц, на которой наблюдается пересечение спектров ОДП несвязанной воды для рассматриваемых температур.

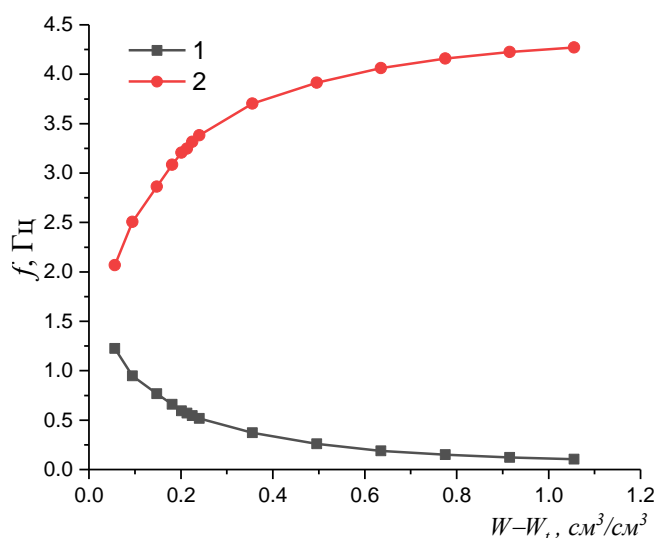


Рис. 5. Зависимость первой (1) и второй (2) точек пресечения спектров ОДП для температур 25 и 5 °С в зависимости от объемной доли несвязанной воды

Заключение

С помощью ОРДМС было исследовано влияние спектров ОДП категорий почвенной воды на характер температурной зависимости ОДП минеральной почвы в диапазоне температур от 25 до 0 °С, были изучены причины появления частот, разделяющих частотные диапазоны с возрастающей и убывающей температурной зависимостью ОДП почвы, т.е. частот при которых происходят пересечения спектров ОДП, полученных при различных температурах, но одной влажности.

Результаты проведенного анализа спектров ОДП минеральной почвы показали, что пересечение спектров ОДП минеральной почвы, полученных при различных температурах, не наблюдается для образцов, содержащих только связанную воду. Однако в диапазоне частот от 1 до 3 ГГц для этих образцов наблюдается слабая температурная зависимость ОДП почвы с разбросом значений ОДП, не превышающих 3 % относительно среднего значения в данном частотном диапазоне. Значительное увеличение на низких частотах как самих значений ОДП почвы, так и скорости изменения ОДП почвы при изменении

температуры является признаком влияния низкочастотных релаксаций Максвелла-Вагнера.

В случае, когда в образце содержится как связанная, так и несвязанная воды, спектры ОДП минеральной почвы имеют две области пересечения – в мегагерцовой и в гигагерцовой областях частот. Как было показано, первая точка пересечения спектров ОДП почвы является результатом проявления поляризаций Максвелла-Вагнера в связанной воде, что подтверждает утверждение авторов работы [16]. Таким образом, значение частоты пересечения спектров ОДП, полученных при различных температурах, в диапазоне до 1,5 ГГц определяет границу влияния низкочастотных релаксаций, вызванных поляризацией Максвелла-Вагнера. Данная точка пересечения слабо зависит от температуры. В работе [16] были проведены исследования точки пересечения ОДП насыщенной водой почвы от проводимости водного раствора. Авторами работы [16] было определено, что значение частоты, на которой наблюдается пересечение спектров ОДП не превышает 100 МГц. Также авторы работы [16] показали, что на результаты TDR измерений оказывает влияние температурная зависимость ОДП в диапазоне частот выше данной частоты. В настоящей работе было показано, что в случае ненасыщенных водой почв частота, на которой наблюдается точка пересечения, смещается от 100 МГц до 1,2 ГГц в зависимости от влажности, что перекрывает эффективный диапазон частот TDR измерений, а значит на результаты TDR измерений может оказать влияние температурная зависимость ОДП почвы в диапазоне частот ниже точки пересечения спектров, т.е. в частотном диапазоне, где проявляется эффект Максвелла-Вагнера.

Вторая точка пересечения ОДП почвы, в высокочастотной области, является результатом проявления ориентационной поляризации несвязанной воды. Кроме того, в случае когда в почве присутствует как связанная, так и несвязанная вода, можно выделить диапазон частот от 500 МГц до 3,5 ГГц, в котором спектры ОДП почвы, полученные при различных температурах, находятся наиболее близко друг к другу с разбросом значений ОДП, не превышающего 7 % от среднего значения в данном частотном диапазоне.

Результаты проведенного исследования могут быть полезны при выборе частоты, при которой температурная зависимость ОДП влажной почвы минимальна, для определения влажности в методах, основанных на измерении диэлектрической проницаемости.

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. Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour.* 1980. V.16. №3. P.574-582. <https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>
2. Huisman J.A., Hubbard S.S., Redman J.D., Annan A.P. Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar: A Review. *Vadose Zone Journal.* 2003. V.2. №4. P.476-491. <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/vzj2003.4760>
3. Kizito F., Campbell C.S., Campbell G.S., Cobos D.R., Teare B.L., Carter B., Hopmans J.W. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. *Journal of Hydrology.* 2008. V.352. №3. P.367-378. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.01.021>
4. Woszczyk A., Szerement J., Lewandowski A., Kafarski M., Szyplowska A., Wilczek A., Skierucha W. An open-ended probe with an antenna for the measurement of the water content in the soil. *Computers and Electronics in Agriculture.* 2019. V.167. P.105042. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105042>
5. Szerement J., Woszczyk A., Szyplowska A., Kafarski M., Lewandowski A., Wilczek A., Skierucha W. Evaluation of a Multi-Rod Probe Performance for Accurate Measurements of Soil Water Content. *2020 Baltic URSI Symposium (URSI).* 2020. P.158-160. <https://doi.org/10.23919/URSI48707.2020.9254059>
6. Mironov V.L., Karavayskiy A.Y., Lukin Y.I., Molostov I.P. A dielectric model of thawed and frozen Arctic soils considering frequency, temperature, texture and dry

- density. *International Journal of Remote Sensing*. 2020. V.41. №10. P.3845-3865.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1708506>
7. Belyaeva T.A., Bobrov P.P., Kroshka E.S., Repin A. V. Complex dielectric permittivity of saline soils and rocks at frequencies from 10 kHz to 8 GHz. *2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS)*. 2017. P.3046-3051. <https://doi.org/10.1109/PIERS.2017.8262278>
8. Loewer M., Günther T., Igel J., Kruschwitz S., Martin T., Wagner, N. Ultra-broad-band electrical spectroscopy of soils and sediments – a combined permittivity and conductivity model. *Geophysical Journal International*. 2017. V.210. №3. P.1360-1373. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx242>
9. Kemna A., Binley A., Cassiani G., Niederleithinger E., Revil A., Slater L., Williams K.H., Orozco A.F., Haegel F.-H., Hördt A., Kruschwitz S., Leroux V., Titov K., Zimmermann E. An overview of the spectral induced polarization method for near-surface applications. *Near Surface Geophysics*. 2012. V.10. №6. P.453-468.
<https://doi.org/10.3997/1873-0604.2012027>
10. Wagner N., Scheuermann A. On the relationship between matric potential and dielectric properties of organic free soils: a sensitivity study. *Canadian Geotechnical Journal*. 2009. V.46. №10. P.1202-1215.
<https://doi.org/10.1139/T09-055>
11. Robinson D.A., Schaap M.G., Or D., Jones S.B. On the effective measurement frequency of time domain reflectometry in dispersive and nonconductive dielectric materials. *Water Resources Research*. 2005. V.41. №2.
<https://doi.org/10.1029/2004WR003816>
12. Дебай П. *Полярные молекулы*. Гнти. 1931. 247 с.
13. Hoekstra P., Delaney A. Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. *Journal of Geophysical Research*. 1974. V.79. №11. P.1699-1708.
<https://doi.org/10.1029/JB079i011p01699>
14. Bobrov P.P., Lapina A.S., Repin A. V. Effect of the rock/water/air interaction on the complex dielectric permittivity and electromagnetic waves attenuation in water-saturated sandstones. *Journal of Geophysical Research*. 2015. P.1877-1880.

15. Kupfer K. *Electromagnetic Aquametry: Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances*. Springer Science & Business Media. 2005. 546 p.
16. Chen Y., Or D. Effects of Maxwell-Wagner polarization on soil complex dielectric permittivity under variable temperature and electrical conductivity. *Water Resources Research*. 2006. V.42. №6. P.1-14. <https://doi.org/10.1029/2005WR004590>
17. Revil A. Effective conductivity and permittivity of unsaturated porous materials in the frequency range 1 mHz-1GHz. *Water Resources Research*. 2013. V.49. №1. P.306-327. <https://doi.org/10.1029/2012WR012700>
18. Wagner N., Bore T., Robinet J.-C., Coelho D., Taillade F., Delepine-Lesoille S. Dielectric relaxation behavior of Callovo-Oxfordian clay rock: A hydraulic-mechanical-electromagnetic coupling approach. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2013. V.118. №9. P.4729-4744. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50343>
19. Kruschwitz S., Prinz C., Zimathies A. Study into the correlation of dominant pore throat size and SIP relaxation frequency. *Journal of Applied Geophysics*. 2016. V.135. P.375-386. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.07.007>
20. Bircher S., Demontoux F., Razafindratsima S., Zakharova E., Drusch M., Wigneron J.-P., Kerr Y. L-band relative permittivity of organic soil surface layers—A new dataset of resonant cavity measurements and model evaluation. *Remote Sensing*. 2016. V.8. №12. P.1024. <https://doi.org/10.3390/rs8121024>
21. Ganjegunte G.K., Sheng Z., Clark J.A. Evaluating the accuracy of soil water sensors for irrigation scheduling to conserve freshwater. *Applied Water Science*. 2012. V.2. №2. P.119-125. <https://doi.org/10.1007/s13201-012-0032-7>
22. Stogryn A. Equations for calculating the dielectric constant of saline water (correspondence). *IEEE transactions on microwave theory and Techniques*. 1971. V.19. №8. P.733-736.
23. Birchak J.R., Gardner C.G., Hipp J.E., Victor J.M. High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture. *Proceedings of the IEEE*. 1974. V.62. №1. P.93-98. <https://doi.org/10.1109/PROC.1974.9388>

Для цитирования:

Каравайский А.Ю., Лукин Ю.И. Влияние диэлектрических релаксаций почвенной воды на температурную зависимость диэлектрической проницаемости почвы. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.1.4>