

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.3.6>

УДК: 537.86; 631.432.2; 528.88

**ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ВРЕМЕН ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЛАКСАЦИЙ
В МЕРЗЛОЙ И ТАЛОЙ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОЙ ПОЧВЕ
В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ОТ 10 МГц ДО 15 ГГц**

А.Ю. Каравайский, Ю.И. Лукин

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

Статья поступила в редакцию 17 февраля 2026 г.

Аннотация. Метод восстановления функции распределения времен релаксаций применен для анализа спектров комплексной диэлектрической проницаемости влажной органоминеральной почвы Красноярской лесостепи в диапазоне частот электромагнитного поля от 10 МГц до 15 ГГц при температурах от -30 до $+25$ °С в процессе нагревания. Показано, что для данного типа почвы функция распределения имеет квазидискретный вид. В рассматриваемом диапазоне частот идентифицировано до шести релаксационных процессов диэлектрической поляризации в почве: доминирующая низкочастотная межфазная поляризация Максвелла-Вагнера (30000 – 100000 пс), высокочастотный процесс, спектр которой, вероятно, включает вклады как несвязанной, так и подвижной связанной воды (6 – 50 пс), и группа процессов в связанной воде (100 – 20000 пс). Результаты демонстрируют эффективность метода восстановления функции распределения времен релаксаций для детального анализа диэлектрических свойств сложных гетерогенных систем, таких как почвы.

Ключевые слова: диэлектрическая релаксация, функция распределения времен релаксаций, комплексная диэлектрическая проницаемость, влажная почва, органоминеральная почва, поляризация Максвелла-Вагнера, связанная вода.

Финансирование: Работа выполнена в рамках научной тематики Госзадания Института Физики СО РАН.

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

Введение

Влажная почва представляет собой сложную гетерогенную систему, для которой характерна диэлектрическая дисперсия в широком диапазоне частот. Разработка точных диэлектрических моделей, необходимых для определения влажности и температуры поверхности почвы, является ключевой задачей для методов дистанционного зондирования – как спутникового, так и с использованием беспилотных летательных аппаратов. Точность таких моделей может быть существенно повышена за счет учета влияния релаксационных процессов на величину комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) почвенного покрова, поскольку эти процессы определяют дисперсию ее действительной и мнимой частей.

Влияние релаксационных процессов на КДП талых и мерзлых почв подробно изучалось в ряде работ [1 – 5]. В зависимости от исследуемого частотного диапазона, в работах идентифицировано несколько релаксационных процессов, связанных с различными компонентами почвы или межфазными границами: диэлектрическая релаксация несвязанной и связанной воды, а также межфазная поляризация Максвелла-Вагнера (МВ). При моделировании КДП влажных почв в области частот выше 1 ГГц для удовлетворительного согласия с экспериментальными данными достаточно учитывать только ориентационную релаксацию несвязанной воды [6]. Однако для расширения спектроскопических диэлектрических моделей в область более низких частот дополнительно требовался учет диэлектрической релаксации связанной воды и межфазной поляризации [1,5,7].

Как правило, количество таких релаксаций фиксируется априорно на основе физических предположений о компонентном составе почвенной смеси. Это приводит к своего рода дискретному распределению релаксаций, которое может не учитывать все процессы, протекающие во влажных почвах, особенно в условиях изменения температуры и влажности. Для более объективного и точного определения количества релаксационных процессов в заданном частотном диапазоне используется метод, восстанавливающий функцию распределения времен релаксаций (ФРВР). Данный подход успешно применялся для анализа как однородных [8 – 10], так и неоднородных [11] диэлектриков. Применительно к почвам метод ФРВР начал использоваться сравнительно недавно [7,12], продемонстрировав свою перспективность для идентификации диэлектрических релаксаций.

В данной работе метод восстановления ФРВР применен для анализа диэлектрических релаксаций во влажной органоминеральной почве. Количество и параметры релаксационных процессов определялись на основе анализа частотных зависимостей КДП исследуемых образцов почвы при различных температурах и влажностях. Цели исследования были сформулированы следующим образом:

1) Идентификация диэлектрических релаксаций во влажной органоминеральной почве в талом и мерзлом состоянии в широком диапазоне частот электромагнитного поля (от 10 МГц до 15 ГГц).

2) Оценка вклада отдельных релаксационных процессов в спектр КДП почвы в рассматриваемом частотном диапазоне.

1. Материалы и методы

В качестве объекта исследования была выбрана органоминеральная почва. Образцы были отобраны в виде цилиндрического керна (диаметр 110 мм, высота 300 мм) на территории Пировского района Красноярской лесостепи, в условиях соснового леса (координаты: 57°37'17.9"N, 92°13'00.6"E). Место и образец керна показан на рис. 1. Для диэлектрических измерений использовался слой керна с

глубины от 50 до 150 мм, где присутствует как минеральная, так и органическая составляющая почвы. Исследуемая почва относится к лесному суглинку с гранулометрическим составом по классификации USDA: 10,5 % песка, 66,2 % ила, 23,3 % глины. Содержание органического вещества в почве составило 11,1 %.



Рис. 1. Образец исследуемой почвы. Лесной суглинок.

Для проведения измерений было подготовлено 20 образцов с заданными влажностями от воздушно-сухого состояния до максимальной влагоемкости. Для достижения заданной влажности добавлялись различные порции дистиллированной воды. Подготовленные образцы тщательно перемешивались и выдерживались в герметично запечатанных бюксах в течение не менее 7 суток.

Измерения КДП почвы проводились в диапазоне частот электромагнитного поля от 10 МГц до 15 ГГц и в диапазоне температур от -30 до $+25$ °С в процессе нагревания. Для измерений использован измерительный комплекс, включающий векторный анализатор цепей Keysight N5232, температурную камеру SU-241 Espes и персональный компьютер. Приготовленный образец почвы помещался в коаксиальный контейнер длиной 17 или 37 мм (в зависимости от влажности образца) с радиусами внешней оболочки и центрального проводника 7 и 3 мм соответственно. Более подробно метод измерения КДП почвы описан в [13].

Для интерпретации результатов измерения спектров КДП был использован метод восстановления ФРВР. Согласно данному подходу, экспериментально

измеренный спектр ε^* КДП образца представляется в виде интеграла суперпозиции релаксационных процессов по Дебаю с ФРВР $g(\tau)$:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) \int_0^\infty \frac{g(\tau) d\tau}{1 + i\omega\tau}, \quad (1)$$

где

$$\int_0^\infty g(\tau) d\tau = 1,$$

ε_0 – низкочастотный предел диэлектрической проницаемости (НПДП),
 ε_∞ – высокочастотный предел диэлектрической проницаемости (ВПДП),
 $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, f – частота электромагнитного поля, τ – время релаксации.

Наличие свободных ионов во влажной почве приводит к ненулевой проводимости постоянного электрического тока, которая оказывает влияние на мнимую часть КДП. Также, поскольку восстановление ФРВР проводится в широком диапазоне времен релаксации τ , переменную интегрирования в (1) целесообразно заменить на $\lg(\tau)$. С учетом выше сказанного, выражение (1) примет следующий вид:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) \int_{-\infty}^\infty \frac{G(\tau) d(\lg \tau)}{1 + i\omega\tau} + i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_r}, \quad (2)$$

где $G(\tau) = \tau \ln 10 \cdot g(\tau)$, σ – проводимость постоянного электрического тока (См/м), $\varepsilon_r = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость свободного пространства. Восстановление ФРВР из экспериментальных спектров почвы проводилось в соответствии с методом, изложенным в [12].

2. Результаты и обсуждение

В данном разделе приведены примеры восстановленных ФРВР для талой и мерзлой почвы при различной влажности, проанализированы выявленные релаксационные процессы и оценен их вклад в КДП. На рис. 2 приведены ФРВР, полученные из экспериментальных спектров КДП исследуемой

органоминеральной почвы для нескольких влажностей при различных температурах.

Как видно из рис. 2, ФРВР имеет квазидискретный вид с хорошо различимыми пиками во всем рассматриваемом диапазоне частот для показанных температур и влажностей. На рисунках хорошо различимы до шести релаксационных процессов. Каждый пик ФРВР характеризует отдельный процесс диэлектрической поляризации, причем параметры пика могут быть соотнесены с параметрами релаксации: положение максимума пика интерпретируется как время релаксации, а отношение площади пика к сумме площадей всех пиков – как относительный вклад данной релаксации в спектр КДП. Таким образом, количество наблюдаемых пиков соответствует количеству диэлектрических релаксаций в исследуемом частотном диапазоне. Время максимума пика ФРВР (время релаксации) τ_0 связано с частотой максимального поглощения ЭМ поля за счет данного релаксационного процесса f_0 следующим образом:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\tau_0}. \quad (3)$$

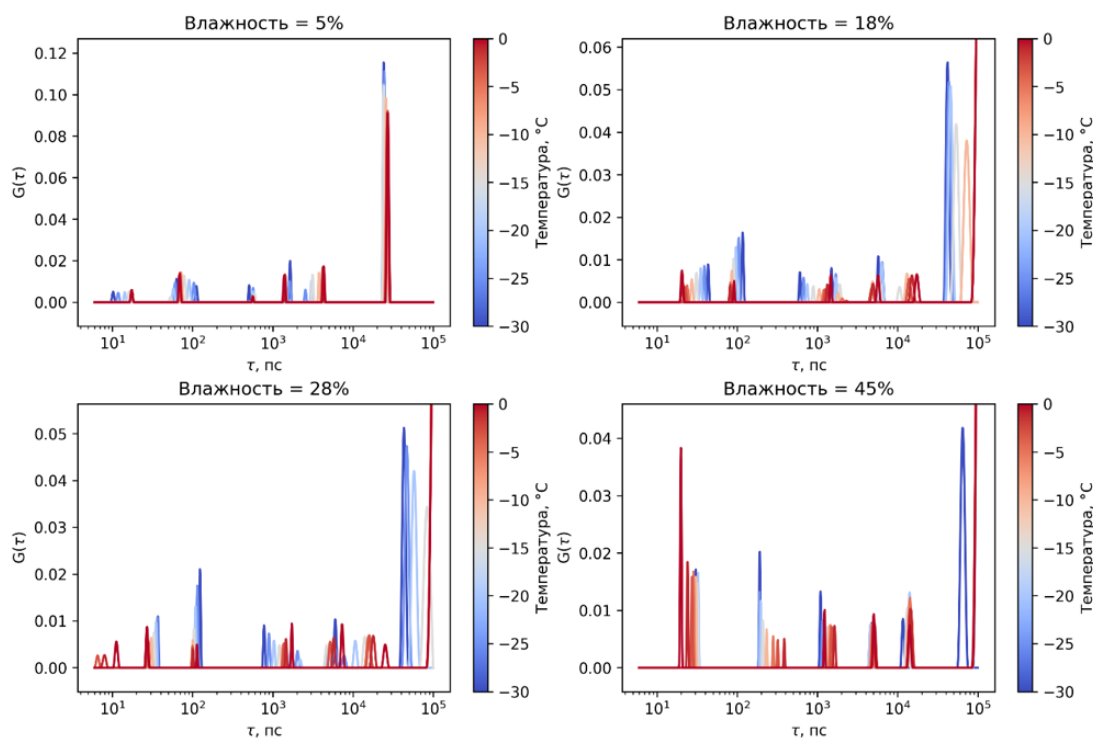


Рис. 2. Функция распределения времен релаксаций образцов органоминеральной почвы для различных температур и влажностей.

Рассмотрим выделенные процессы в порядке увеличения времени релаксации, представленных на рис. 2.

1) *Высокочастотная релаксация (~6 – 50 пс).* Высокочастотный релаксационный процесс демонстрирует сложную зависимость от влажности и температуры. При объемной влажности 5 % время релаксации увеличивается с ростом температуры. С увеличением влажности время релаксации возрастает, при этом характер ее температурной зависимости меняется на обратный (с ростом температуры время релаксации уменьшается). При объемной влажности 28 % обнаружено расщепление пика ФРВР данной релаксации на два. С дальнейшим увеличением влажности наблюдается смещение данного пика из области ~10 пс в область ~40 пс.

2) *Релаксация в области ~100 пс.* Характерное время релаксации данного процесса увеличивается с ростом влажности. Примечательно, что при влажности 45 % не только наблюдается резкий рост времени релаксации до 200 – 400 пс, но и инвертируется его температурная зависимость – с переходом от уменьшения к увеличению времени релаксации при повышении температуры. Вклад данного релаксационного процесса в общий спектр больше при низких температурах по сравнению с вкладом при высоких температурах.

3) *Релаксационные процессы в диапазоне ~500 – 20000 пс.* В данной области наблюдаются три релаксационных процесса, регистрируемых во всем исследуемом диапазоне температур и влажностей. При объемной влажности 5 % положение пиков времени релаксации слабо зависит от температуры. С ростом влажности до 18 % и 28 % проявляется выраженная температурная зависимость, приводящая к значительному разбросу времени релаксации для каждого пика в зависимости от температуры образца. При дальнейшем увеличении влажности до 45 % температурная зависимость их положения снова ослабевает.

Особый интерес представляет поведение пика в районе 1000 пс. При отрицательных температурах наблюдается тенденция к его расщеплению на две составляющие.

С увеличением общей влажности характерные времена релаксации для всех трех процессов в данной области систематически возрастают, смещаясь из диапазона 500 пс при влажности 5 % в диапазон 1000 – 20000 пс при влажности 45 %

4) *Низкочастотная релаксация (~30000 – 100000 пс).* Наиболее низкочастотная релаксация в рассматриваемом диапазоне частот наблюдается в диапазоне времен от 30000 до 100000 пс. Как видно из рис. 2, данный процесс вносит наибольший вклад в спектр КДП как для талой, так и для мерзлой почвы во всем исследованном диапазоне влажностей.

При минимальной влажности (5 %) пик ФРВР данной релаксации расположен вблизи 30000 пс и практически не демонстрирует температурной зависимости. С увеличением влажности наблюдается отчетливый рост времени релаксации, а также проявляется его температурная зависимость: время релаксации растет с увеличением температуры. При достижении максимальной влажности (45 %) время релаксации приближается к верхней границе исследуемого диапазона – 100000 пс. Можно предположить, что реальное время релаксации процесса при такой влажности превышает это значение, однако оно не может быть надежно определено в рамках исследуемого частотного диапазона, поэтому пик зафиксирован вблизи его нижней границы.

В целом можно констатировать, что увлажнение почвенного образца приводит к увеличению времени релаксации всех наблюдаемых релаксационных процессов, а также влияет на характер их температурной зависимости.

Для соотнесения полученных результатов с имеющимися литературными данными на рис. 3 представлены экспериментальные и модельные спектры КДП органоминеральной почвы, а также рассчитанные спектры КДП отдельных релаксационных процессов при объемной влажности 28 % и температурах –20 и +20 °С. Как видно из рис. 3, низкочастотная релаксация вносит основной вклад в дисперсию КДП в диапазоне от 10 МГц до 1 ГГц. Согласно литературным данным [1,14], в частотном диапазоне от единиц герц до 1 ГГц с максимумом потерь между 1 кГц и 100 кГц проявляется релаксация МВ. Таким образом,

наблюдаемая нами низкочастотная релаксация попадает в высокочастотную часть этого широкого диапазона, что является аргументом в пользу ее отождествления с межфазной поляризацией МВ.

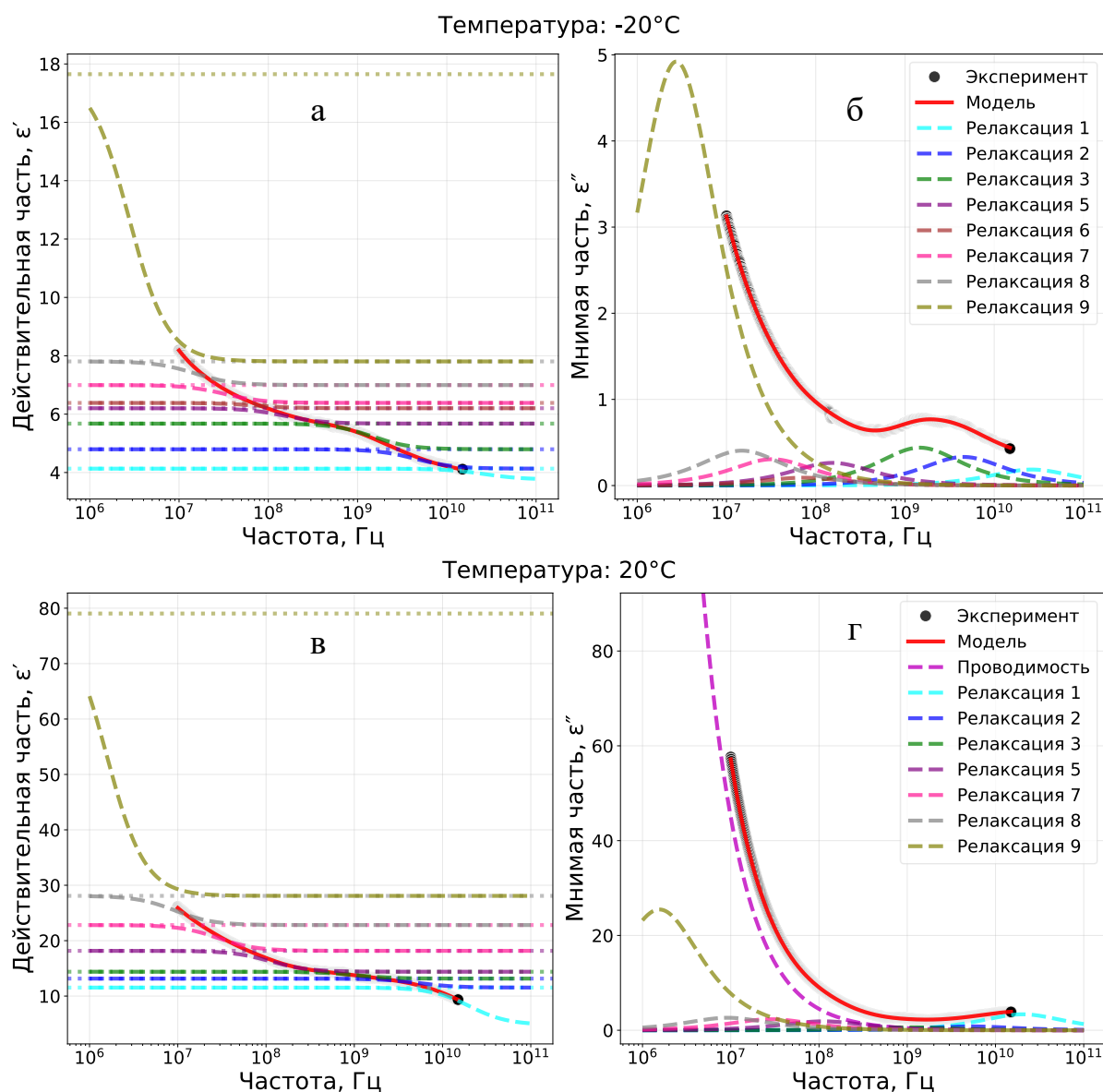


Рис. 3. Экспериментальные и модельные спектры действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') частей КДП органоминеральной почвы. Показаны данные при объемной влажности 28% и температурах -20°C (а, б) и $+20^\circ\text{C}$ (в, г). Символы – эксперимент; сплошные линии – модельный спектр КДП; пунктирные линии – вклады отдельных релаксаций.

В диапазоне времен релаксации от 6 до 50 пс наблюдается один или два релаксационных пика ФРВР, которые зависят от влажности образца. Согласно литературе [1,14], данные пики можно связать с ориентационной релаксацией несвязанной воды, которая проявляется в диапазоне от сотен мегагерц до терагерцовых частот с максимумом потерь около 20 ГГц. В нашем эксперименте

релаксация в данном диапазоне частот наблюдалась как при положительных, так и при отрицательных температурах. Это может указывать на то, что вклад в этот диапазон вносят как несвязанная, так и часть связанной воды, релаксационный пик которой, согласно тем же источникам, может расширяться в высокочастотную область вплоть до десятков и сотен гигагерц. Наблюдаемое в некоторых случаях расщепление пика на два близко расположенных максимума может служить косвенным подтверждением этой гипотезы.

Релаксационные процессы, расположенные между высокочастотной (несвязанная вода) и низкочастотной (МВ) релаксациями, наиболее вероятно относятся к различным категориям связанной воды. Как уже отмечалось, релаксация связанной воды охватывает чрезвычайно широкий частотный диапазон, полностью перекрывая исследуемый в данной работе [1,14]. Наблюдаемая множественность релаксаций в этой области, вероятно, обусловлена с неоднородностью степени связи молекул связанной воды с твердыми частицами почвы [15].

Была оценена точность аппроксимации экспериментальных спектров КДП органоминеральной почвы с помощью найденных ФРВР. Нормированное среднеквадратическое отклонение между рассчитанными и измеренными спектрами не превышало 1 % для действительной (ϵ') и 3 % для мнимой (ϵ'') части КДП. Коэффициент детерминации для обеих компонент составил не менее 0,99, что свидетельствует о высокой адекватности метода.

Заключение

В данной работе проведены измерения КДП образцов органоминеральной почвы Красноярской лесостепи. Измерения выполнены в широком диапазоне частот (10 МГц – 15 ГГц) и температур (от -30 до $+25$ °С) для образцов с контролируемой влажностью – от воздушно-сухого состояния до максимальной влагоемкости.

Для анализа релаксационных процессов диэлектрической поляризации в почве из экспериментальных спектров КДП были восстановлены ФРВР. Анализ

показал, что ФРВР органоминеральной почвы имеет квазидискретный вид, позволяя выделить до шести хорошо различимых релаксационных процессов в исследованном диапазоне. Применимость метода восстановления ФРВР для анализа спектров КДП влажной почвы при отрицательных и положительных температурах подтверждается малыми отклонениями модельных данных от экспериментальных (нормированное среднеквадратическое отклонение меньше 1 % для ϵ' , меньше 3 % для ϵ'' , коэффициент детерминации для обеих компонент составил более 0,99).

Основные научные результаты работы заключаются в следующем:

1) Установлена общая динамика системы. Для всех выделенных процессов выявлена тенденция к увеличению их характерного времени релаксации с ростом влажности почвы.

2) На основе сопоставления с литературными данными идентифицированы следующие диэлектрические релаксационные процессы в мерзлой и талой органоминеральной почве: межфазная поляризация Максвелла-Вагнера (30000 – 100000 пс); диэлектрические релаксационные процессы связанной воды (100 – 20000 пс), множественность которых вероятно обусловлена неоднородностью взаимодействия ее молекул с поверхностью частиц почвы; высокочастотная релаксация (6 – 50 пс), параметры которой согласуются с ориентационной поляризацией несвязанной воды, однако расщепление данного пика свидетельствует о влиянии также ориентационной релаксации связанной воды в данном диапазоне времен релаксаций, что не позволяет однозначно разделить вклады данных релаксаций с помощью примененного метода.

Таким образом, применение метода ФРВР позволило детально разделить сложный диэлектрический спектр влажной органоминеральной почвы на отдельные физически интерпретируемые процессы. Полученные количественные данные о временах и вкладах релаксаций создают основу для разработки более точных диэлектрических моделей, необходимых для интерпретации данных дистанционного зондирования.

Финансирование: Работа выполнена в рамках научной тематики Госзадания Института Физики СО РАН

Литература

1. Loewer M. et al. Ultra-broad-band electrical spectroscopy of soils and sediments – A combined permittivity and conductivity model // *Geophysical Journal International*. – 2017. – Т. 210. – №. 3. – С. 1360-1373.
2. Беляева Т.А., Бобров П.П., Кондратьева О.В. Изменение диэлектрических свойств связанной воды в почвах при увеличении ее количества // *Сибирский аэрокосмический журнал*. – 2013. – №. 5 (51). – С. 92-95.
3. Миронов В.Л. и др. Обобщенная рефракционная диэлектрическая модель влажных почв, учитывающая ионную релаксацию почвенной воды // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2013. – № 3(56). – С. 75-79
4. Беляева Т.А., Бобров П.П., Крошка Е.С. Влияние релаксационных процессов на комплексную диэлектрическую проницаемость почв при положительных и отрицательных температурах // *Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли*. – 2018. – С. 77-81.
5. Lin C.P. Frequency domain versus travel time analyses of TDR waveforms for soil moisture measurements // *Soil Science Society of America Journal*. – 2003. – Т. 67. – №. 3. – С. 720-729.
6. Chen Y., Or D. Effects of Maxwell-Wagner polarization on soil complex dielectric permittivity under variable temperature and electrical conductivity // *Water resources research*. – 2006. – Т. 42. – №. 6.
7. Bobrov P.P. et al. The effect of dielectric relaxation processes on the complex dielectric permittivity of soils at frequencies from 10 kHz to 8 GHz–Part I: Experimental // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2022. – Т. 60. – С. 1-9.
8. Bello A., Laredo E., Grimau M. Distribution of relaxation times from dielectric spectroscopy using Monte Carlo simulated annealing: Application to α -PVDF // *Physical review B*. – 1999. – Т. 60. – №. 18. – С. 12764.

9. Belyaev B.A., Drokin N.A., Shabanov V.F. Reconstruction of the distribution function of relaxation times for 7CB and 7OCB liquid crystals from dielectric spectra // *Physics of the Solid State*. – 2006. – Т. 48. – №. 5. – С. 973-978.
10. Zasetsky A.Y., Buchner R. Quasi-linear least squares and computer code for numerical evaluation of relaxation time distribution from broadband dielectric spectra // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2010. – Т. 23. – №. 2. – С. 025903.
11. Macutkevicius J., Banys J., Matulis A. Determination of the distribution of the relaxation times from dielectric spectra // *Nonlinear analysis: modelling and control*. – 2004. – Т. 9. – №. 1. – С. 75-88.
12. Лукин Ю.И., Каравайский А.Ю. Функция распределения времен диэлектрических релаксаций в минеральной среднеглинистой почве // *Журнал радиоэлектроники*. – 2024. – №. 11.
13. Каравайский А.Ю., Лукин Ю.И. Влияние органического вещества и влажности на пересечение спектров диэлектрической проницаемости почв // *Журнал радиоэлектроники*. – 2024. – №. 4.
14. Hasted J.B. *Aqueous dielectrics*. // Chapman and Hall, 1973.
15. Mironov V.L. et al. A dielectric model of thawed and frozen Arctic soils considering frequency, temperature, texture and dry density // *International journal of remote sensing*. – 2020. – Т. 41. – №. 10. – С. 3845-3865.

Для цитирования:

Каравайский А.Ю., Лукин Ю.И. Функция распределения времен диэлектрических релаксаций в мерзлой и талой органоминеральной почве в диапазоне частот от 10 МГц до 15 ГГц // *Журнал радиоэлектроники*. – 2026. – №. 3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.3.6>