



Двадцать третья международная конференция
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"

10 - 14 ноября 2025 г., Москва



**Функция распределения времен диэлектрических
релаксаций в мерзлой и талой лесной почве
в диапазоне частот от 15 МГц до 15 ГГц**

Каравайский А.Ю., Лукин Ю.И.

**Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения
Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН**

Цель

- Применить метод восстановления функции распределения времен релаксаций (ФРВР) к анализу диэлектрических релаксационных процессов в мерзлой и талой влажной лесной почве в диапазоне частот электромагнитного поля (ЭМ) от 15 МГц до 15 ГГц.
- Оценить вклад отдельных релаксаций в спектр комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) почвы в рассматриваемом частотном диапазоне.

Образец исследуемой почвы. Лесной суглинок

Таблица 1. Гранулометрический состав почвы и содержание органического вещества

Состав	Содержание вещества, %
Глина	23,3
Ил	66,2
Песок	10,5
Органическое вещество	11,1

- Тип леса — преимущественно сосновый.
- Район отбора — Пирровский район Красноярского края.
- Координаты — 57°37'17.9"N, 92°13'00.6"E.
- Глубина отбора проб — 5 – 15 см.



Метод расчета

Частотная зависимость КДП ε^* с учетом ФРВР $g(\tau)$:

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

где

$$\int_0^\infty g(\tau)d\tau = 1 \quad (2)$$

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

Поиск ФРВР ведется в большом диапазоне времени релаксации τ , поэтому удобно производить интегрирование относительно переменной $\lg(\tau)$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) \int_0^\infty \frac{G(\tau)d(\lg \tau)}{1+i\omega\tau} + i \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_r} \quad (3)$$

где

$$G(\tau) = \tau \ln 10 \cdot g(\tau) \quad (4)$$

σ – электрическая проводимость по постоянному току (См/м),
 $\varepsilon_r = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость свободного пространства

Анализ релаксационных процессов в лесной почве методом ФРВР

- Спектры ФРВР почвы имеют **квазидискретный вид** с четко различимыми пиками.
- Каждый пик соответствует отдельному процессу диэлектрической релаксации:
 - **Положение пика** → время релаксации
 - **Площадь пика** → относительный вклад в спектр
- В исследуемом диапазоне частот основной вклад вносит **низкочастотная релаксация** (50 000 – 100 000 пс) как для талой так и для мерзлой почвы.

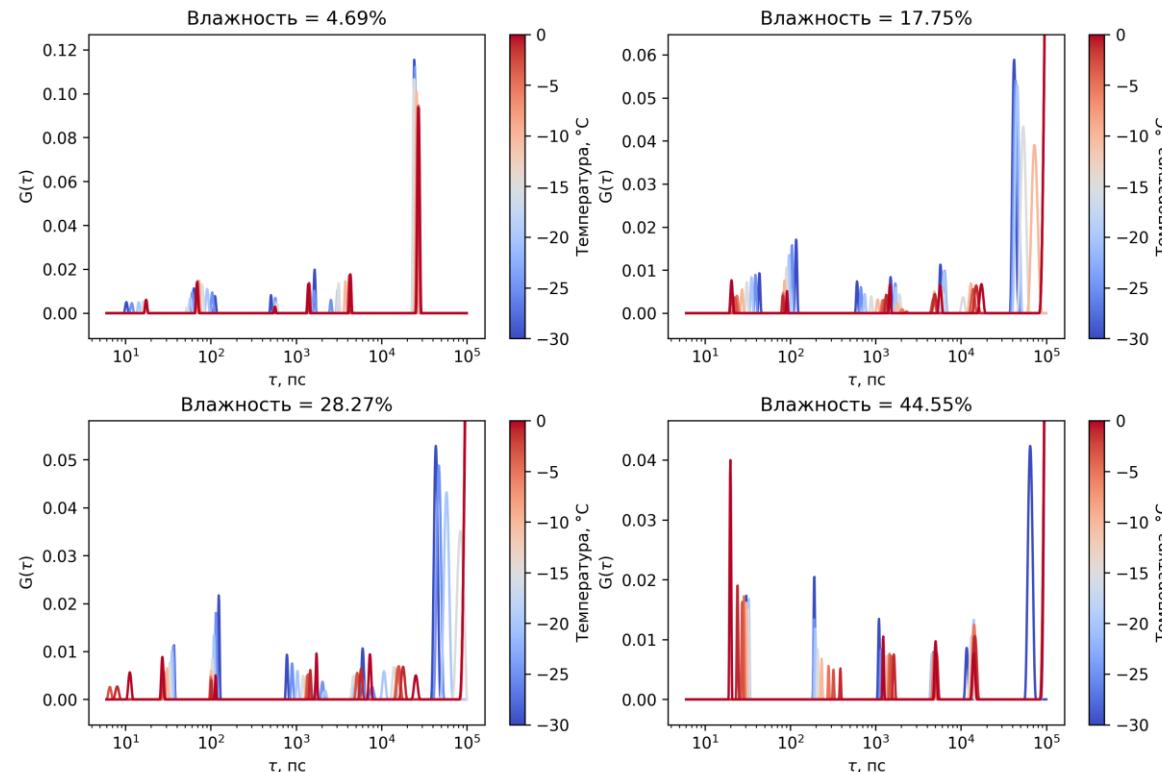


Рисунок. 1. Функция распределения времен релаксаций образцов лесной почвы для различных температур и влажностей

Анализ полученных результатов

С помощью метода восстановления ФРВР из спектров КДП были исследованы диэлектрические релаксационные процессы как в талой, так и в мерзлой почве.

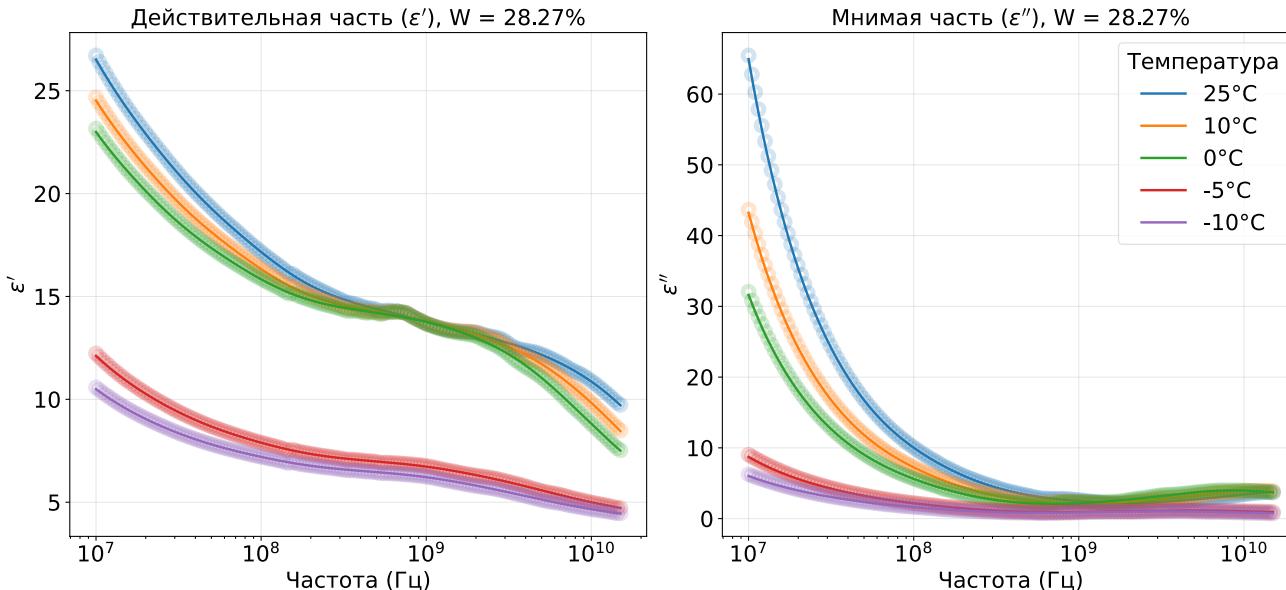


Рисунок 2. Спектры действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') частей КДП лесной почвы с объемной влажностью 28% в диапазоне частот от 15 МГц до 15 ГГц. Символы – экспериментальные данные, линии – модельные кривые, рассчитанные с использованием найденных ФРВР.

Таблица 2. Точность моделирования

Параметр	ϵ'	ϵ''
R^2	0.99	0.99
RMSE	0.07	0.07
NRMSE	0.96%	2.73%

Анализ полученных результатов

Экспериментальные и модельные спектры КДП лесной почвы, а также спектры КДП отдельных релаксационных процессов почвы при объёмной влажности 28 % и температурах -20°C и 20°C .

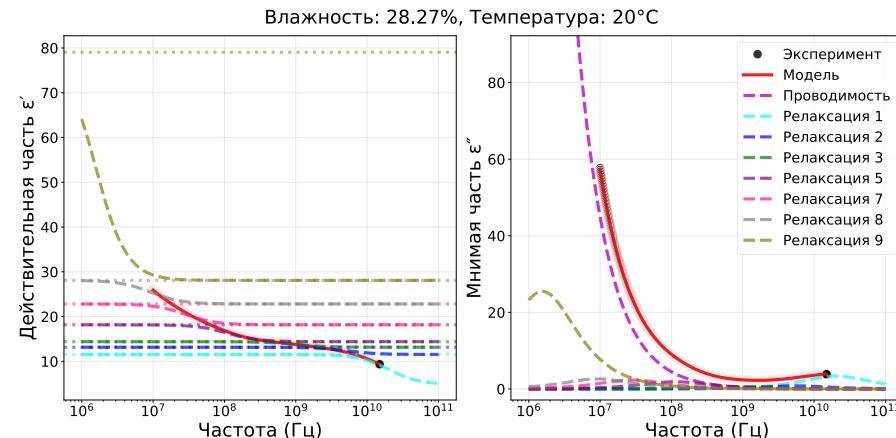
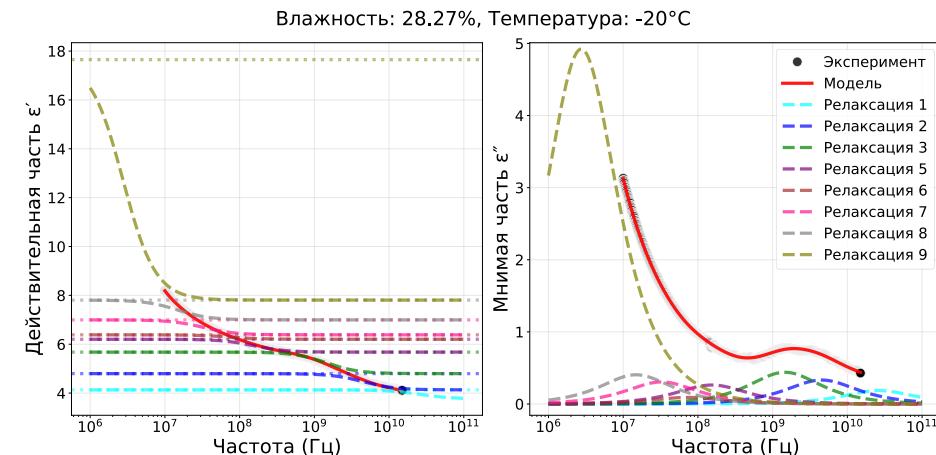
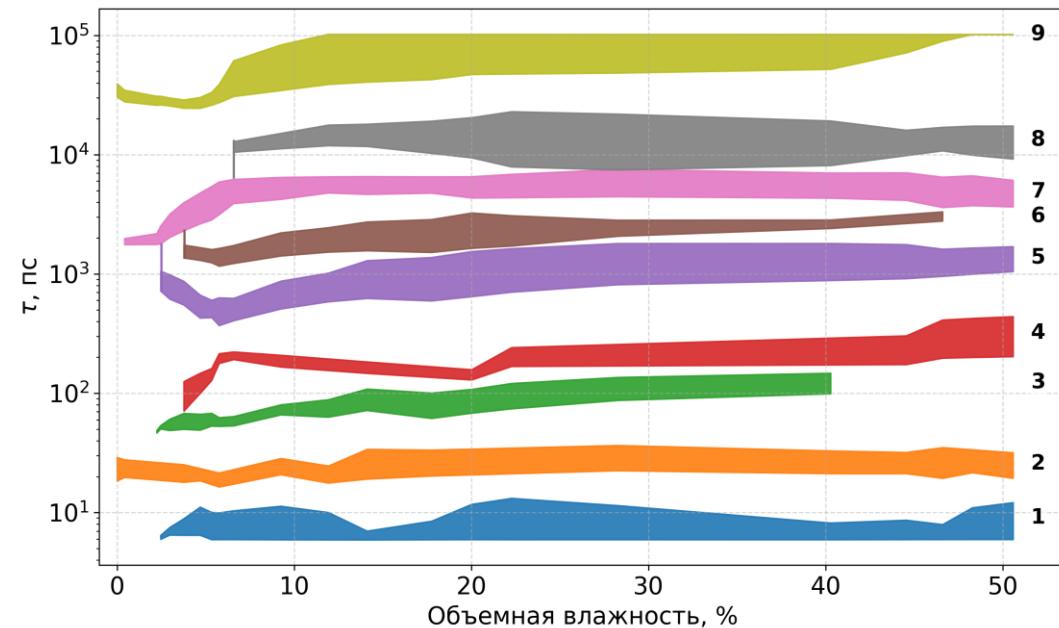


Рисунок. 3. Экспериментальные (показаны символами) и рассчитанные с использованием найденных ФРВР (показаны сплошными линиями) спектры КДП лесной почвы. Пунктирными линиями обозначены рассчитанные спектры КДП отдельных релаксаций при температуре -20°C

Рисунок. 4. Экспериментальные (показаны символами) и рассчитанные с использованием найденных ФРВР (показаны сплошными линиями) спектры КДП лесной почвы. Пунктирными линиями обозначены рассчитанные спектры КДП отдельных релаксаций при температуре 20°C

Влияние влажности на релаксационные процессы в лесной почве

С ростом влажности спектр КДП лесной почвы усложняется, количество выявленных релаксационных процессов увеличивается до 9 ($\tau = 8 \div 100\ 000$ пс).



- **Сухая почва:** 2 релаксационных процесса ($\tau \approx 25$ пс (2) и $\tau \approx 50\ 000$ пс (9)).
- **Влажность 4%:** Появление новых релаксаций ($\tau \approx 8$ пс (1), $\tau \approx 70$ пс (3), $\tau \approx 2000$ пс (7)).
- **Рост влажности (>3%):**
Появление новых пиков релаксаций за счет расщепления:
 - 4 релаксация за счет расщепления пика 3-й релаксации при влажности 3%;
 - 5, 6 и 8 релаксации за счет расщепления пика 7-й релаксации при влажностях 3%, 4% и 6%.

Рисунок. 5. Интервалы значений времен релаксаций в лесной почве в диапазоне температур от -30°C до 25°C в зависимости от влажности

Выводы

- Проведены измерения КДП влажной лесной почвы в диапазоне частот от 15 МГц до 15 ГГц лесной почвы в диапазоне влажностей от сухого состояния до максимальной влагоемкости (52% по объему) и в диапазоне температур от -30 до 25 °C в процессе оттаивания.
- Из измеренных спектров КДП были восстановлены функции распределения времен релаксаций в рассматриваемом диапазоне частот для каждой влажности и температуры из диапазона измерений.
- Обнаружено, что функция распределения релаксаций лесной почвы имеет квазидискретный вид во всех рассматриваемых диапазонах частот, температур и влажностей.
- Обнаружено, что в рассматриваемом диапазоне частот наибольший вклад в КДП лесной почвы вносит низкочастотная релаксация со временем в интервале от 50000 до 100000 пс.
- Исследовано появление диэлектрических релаксационных процессов по мере увеличения влажности образцов почвы. Обнаружено возникновение новых релаксаций за счет расщепления пиков функции распределения релаксации при определенных влажностях образцов почвы.

Заключение и перспективы

- Результаты работы позволяют создать новые диэлектрические модели для влажных почв.
- Ключевое преимущество: Модели будут учитывать полный спектр релаксационных процессов, что повысит точность:
 - описания диэлектрических свойств;
 - оценки параметров почв методами дистанционного зондирования.



Спасибо за внимание!

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики.