



**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 — Пировский 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  $\varepsilon^*$  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

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

$\varepsilon_0$  – низкочастотный предел ДП (НПДП),  
 $\varepsilon_\infty$  – высокочастотный предел ДП (ВПДП),  
 $\omega = 2\pi f$ ,  
 $f$  – частота ЭМ поля,  
 $\tau$  – время релаксации.

Поиск ФРВР ведется в большом диапазоне времени релаксации  $\tau$ , 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

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

$\sigma$  – 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.

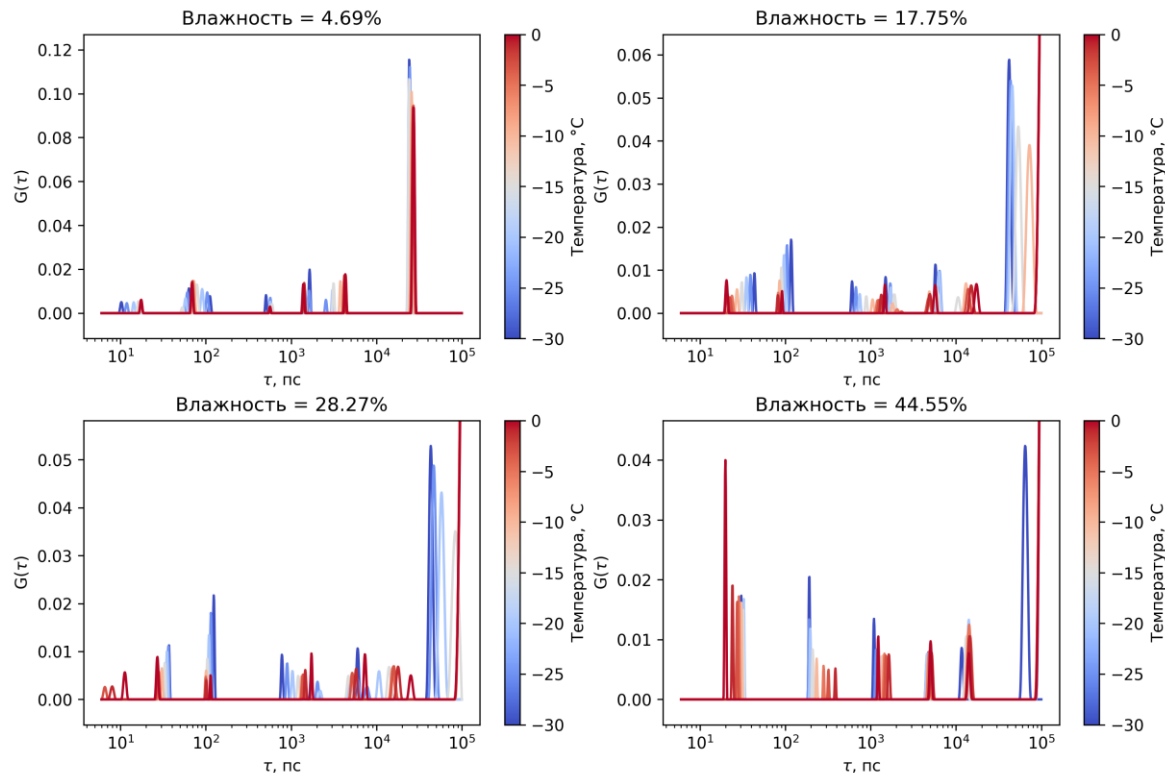


Рисунок. 1. Функция распределения времен релаксаций образцов лесной почвы для различных температур и влажностей

# Анализ полученных результатов

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

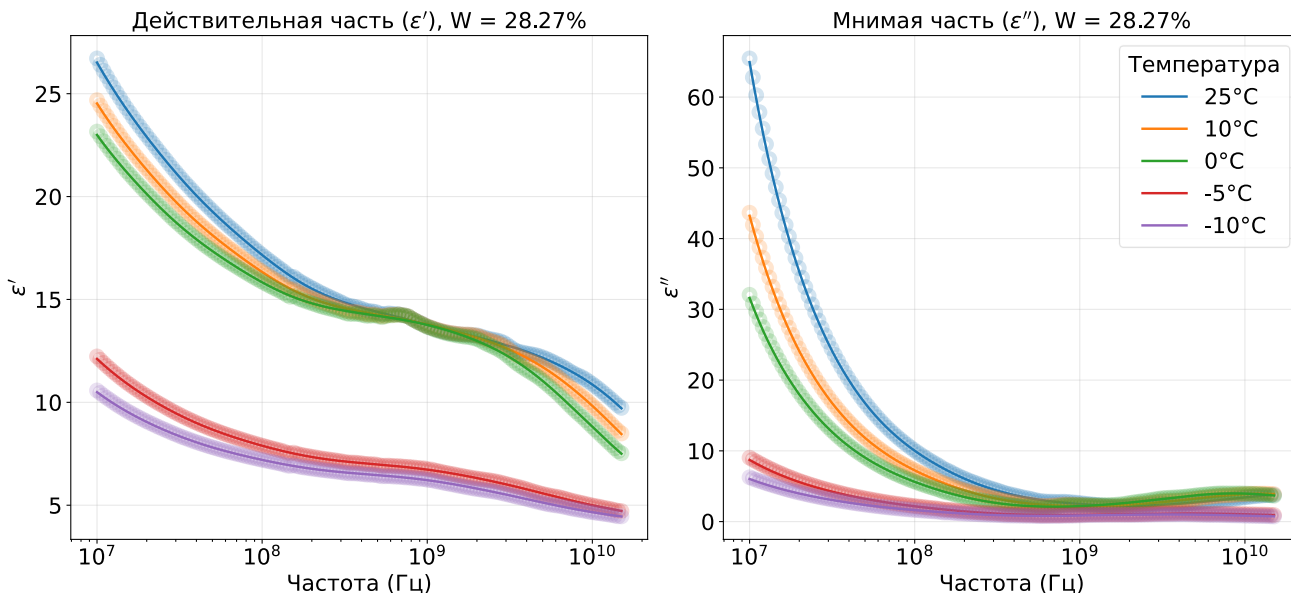


Таблица 2. Точность моделирования

Параметр	$\epsilon'$	$\epsilon''$
$R^2$	0.99	0.99
RMSE	0.07	0.07
NRMSE	0.96%	2.73%

Рисунок 2. Спектры действительной ( $\epsilon'$ ) и мнимой ( $\epsilon''$ ) 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.

# Анализ полученных результатов

Экспериментальные и модельные спектры КДП лесной почвы, а также спектры КДП отдельных релаксационных процессов почвы при объёмной влажности 28 % и температурах  $-20^{\circ}\text{C}$  и  $20^{\circ}\text{C}$ .

Влажность: 28.27%, Температура:  $-20^{\circ}\text{C}$

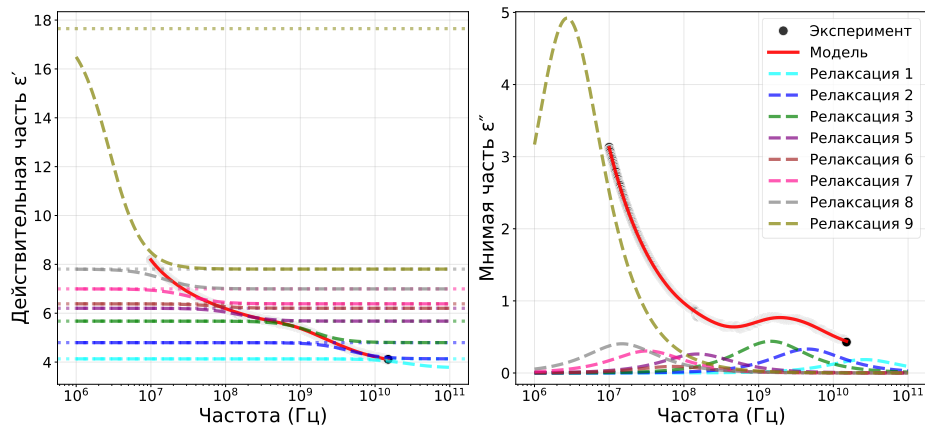


Рисунок 3. Экспериментальные (показаны символами) и рассчитанные с использованием найденных ФРВР (показаны сплошными линиями) спектры КДП лесной почвы. Пунктирными линиями обозначены рассчитанные спектры КДП отдельных релаксаций при температуре  $-20^{\circ}\text{C}$

Влажность: 28.27%, Температура:  $20^{\circ}\text{C}$

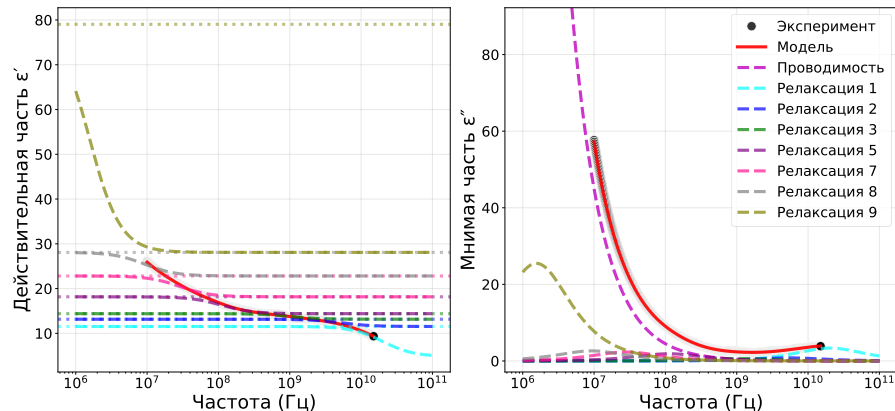
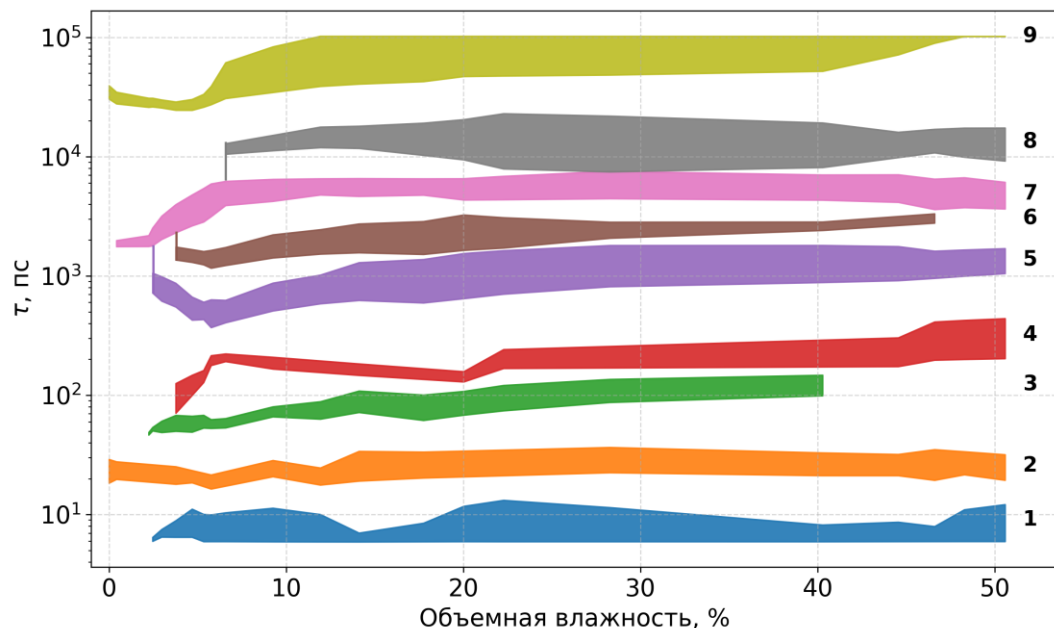


Рисунок 4. Экспериментальные (показаны символами) и рассчитанные с использованием найденных ФРВР (показаны сплошными линиями) спектры КДП лесной почвы. Пунктирными линиями обозначены рассчитанные спектры КДП отдельных релаксаций при температуре  $20^{\circ}\text{C}$

# 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  $-30^\circ\text{C}$  до  $25^\circ\text{C}$  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.**