



Влияние связанной воды на температурную зависимость частотных спектров диэлектрической проницаемости влажных почв

Каравайский А.Ю., Лукин Ю.И.

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

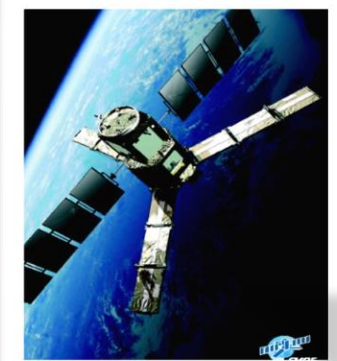
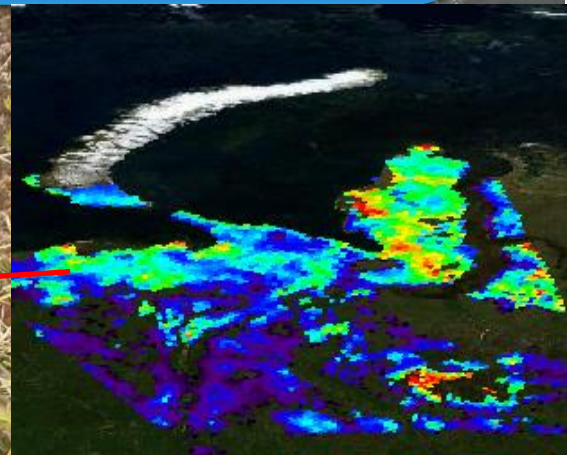
**Двадцатая международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»
Москва, ИКИ РАН, 14 - 18 ноября 2022 г.**



Актуальность

Комплексная диэлектрическая
проницаемость влажной почвы

$$\varepsilon_s(W, f, m, T)$$



SMOS
($f = 1,4$ ГГц)

Метеор-М №2
($f = 10,7 - 183,3$ ГГц)



Компоненты почвенной воды

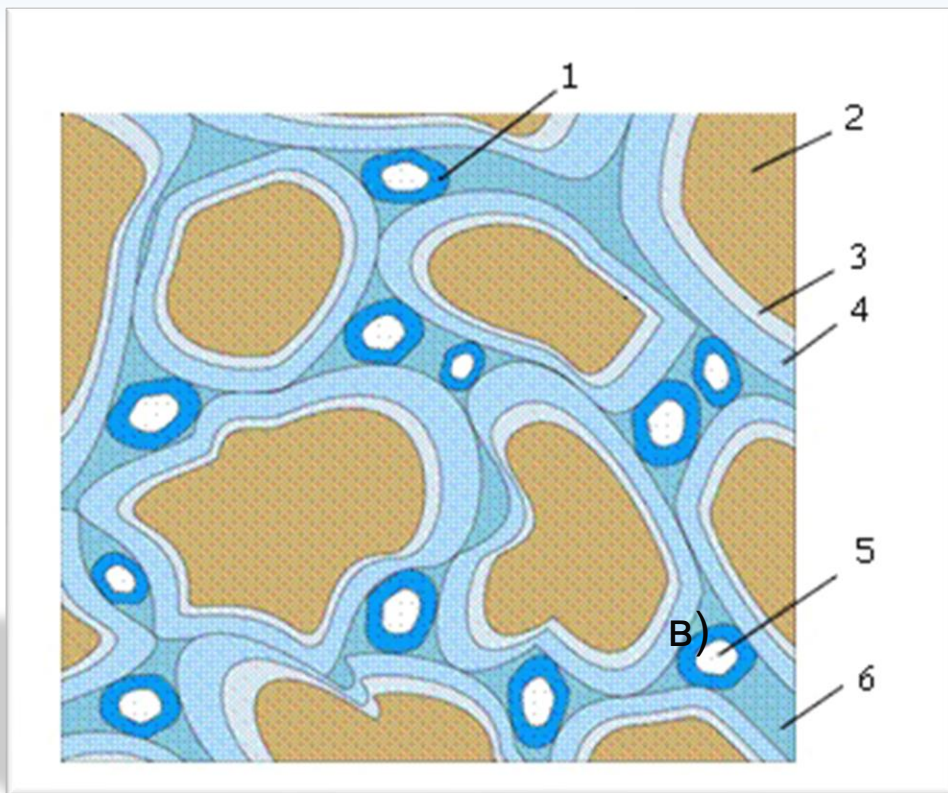


Рисунок 1. Схема удержания влаги частицами почвы.

- 1 – свободная вода,
- 2 – минеральная частица почвы,
- 3 – прочносвязанная вода,
- 4 – рыхлосвязанная (слабосвязанная) вода,
- 5 – заземленный воздух,
- 6 – капиллярная вода

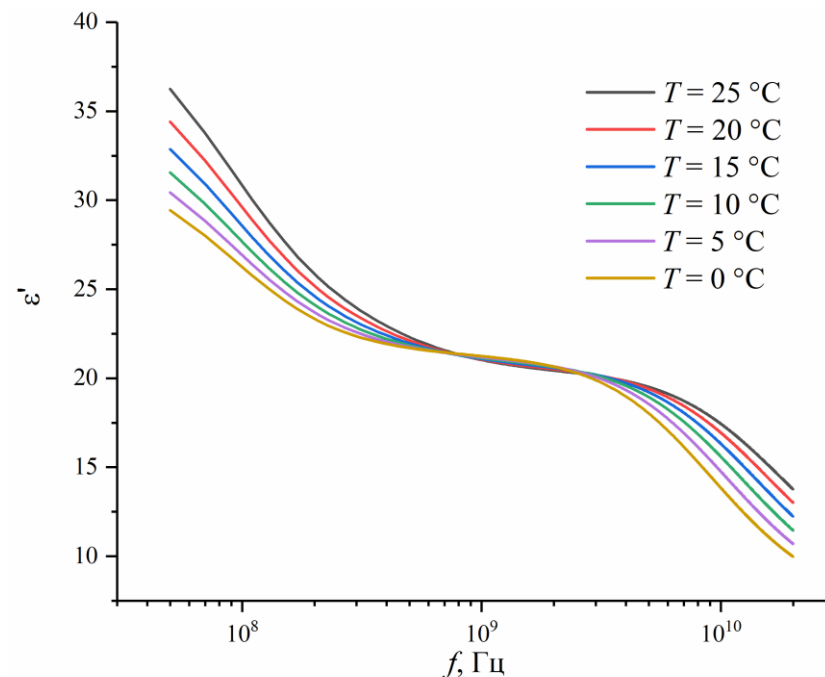


Рисунок 2. Зависимость вещественной части КДП влажной почвы от частоты электромагнитного поля при различных положительных температурах.
 Содержание глинистой фракции $C = 41.3 \%$
 Массовая влажность $m_g = 26.3 \%$

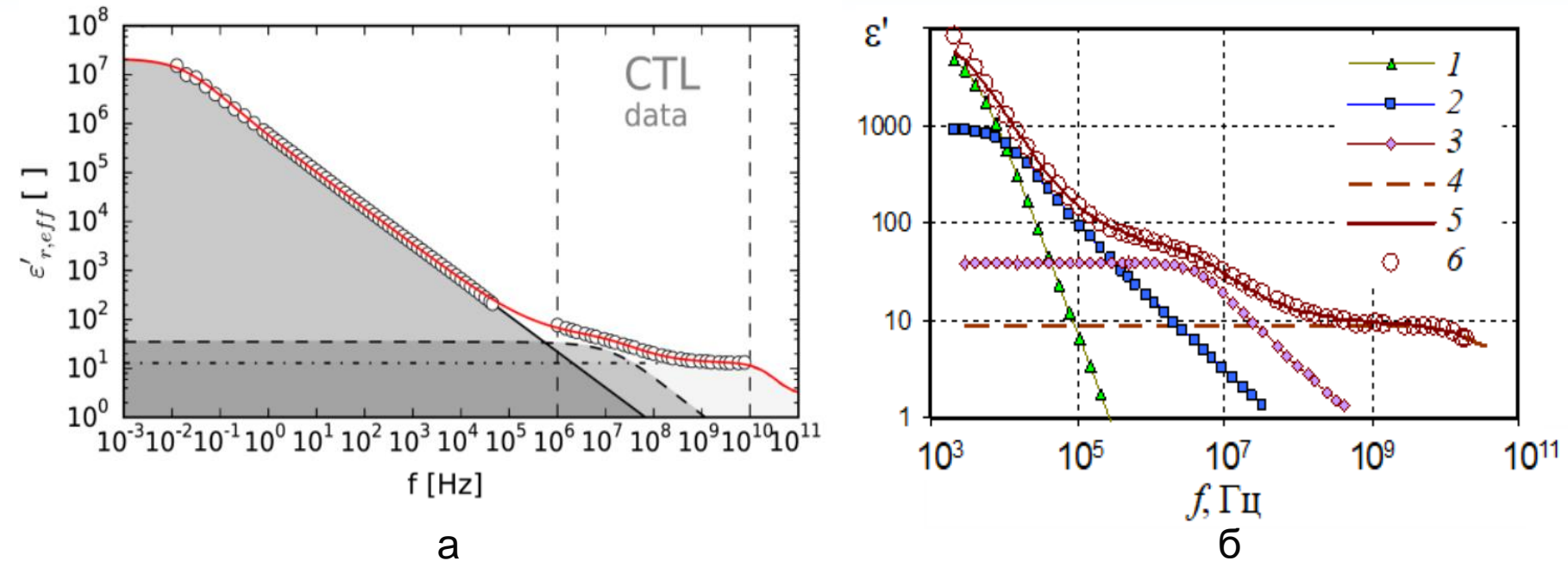


Рисунок 3. Обзор диэлектрических релаксаций во влажных почвах в широком диапазоне частот.

а) Loewer M. et al. Ultra-broad-band electrical spectroscopy of soils and sediments—a combined permittivity and conductivity model // *Geophys. J. Int.* 2017. V. 210. № 3. P. 1360–1373.

б) Бобров, П.П. Диэлектрическая спектроскопия слабозасоленных песков / П.П. Бобров, Т.А. Беляева, Е.С. Крошка, О.В. Родионова // *Геология и геофизика.* – 2021. DOI: 10.15372/GiG2021107



Цель и задачи

- ✓ Оценить влияние диэлектрической проницаемости категорий почвенной воды на частотные спектры диэлектрической проницаемости влажной почвы при положительных температурах.
- ✓ Провести моделирование спектров диэлектрической проницаемости компонентов почвенной воды, используя ранее разработанную обобщенную рефракционную диэлектрическую модель смеси, на примере естественной минеральной почвы с содержанием глинистой фракции 41,3 %.



Диэлектрическая проницаемость однородного диэлектрика

Однорелаксационное уравнение Дебая

$$\epsilon^* = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{1 - i2\pi f\tau}$$

ϵ_∞ – высокочастотный предел диэлектрической проницаемости
 ϵ_0 – низкочастотный предел диэлектрической проницаемости
 f – частота электромагнитного поля,
 τ – время релаксации

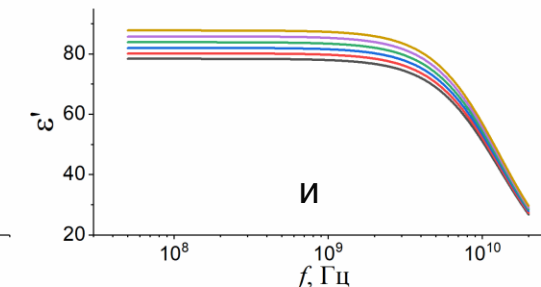
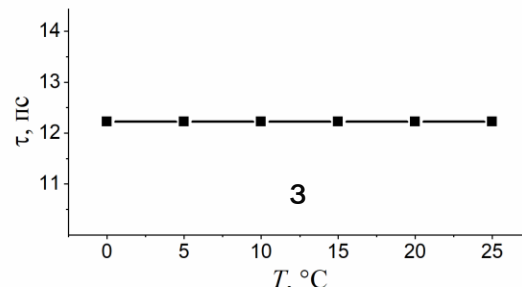
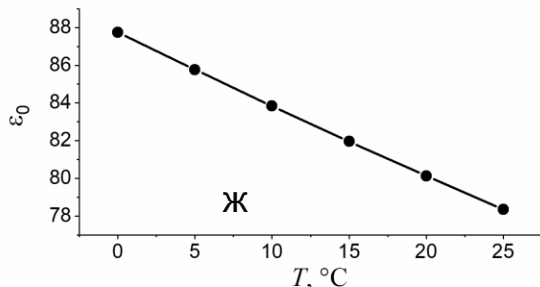
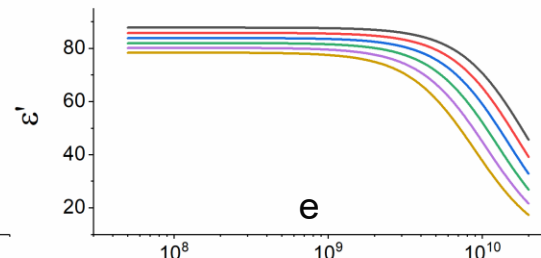
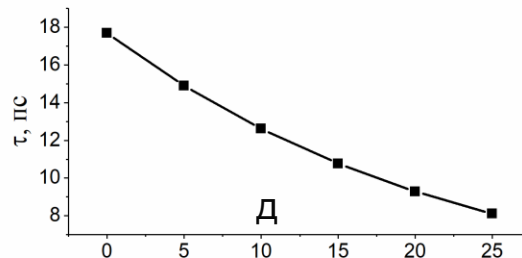
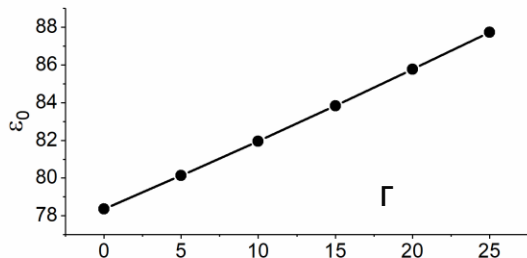
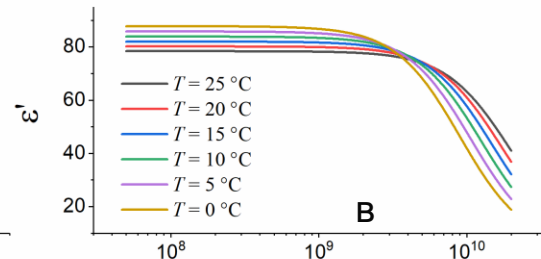
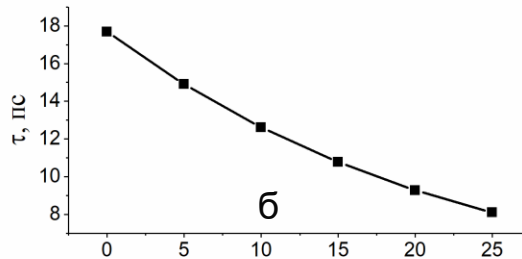
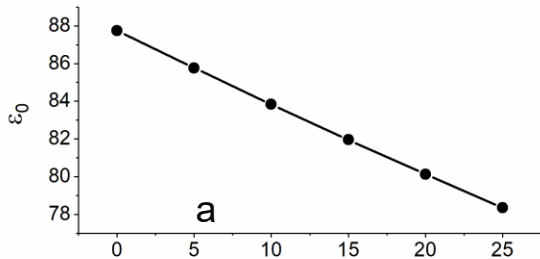
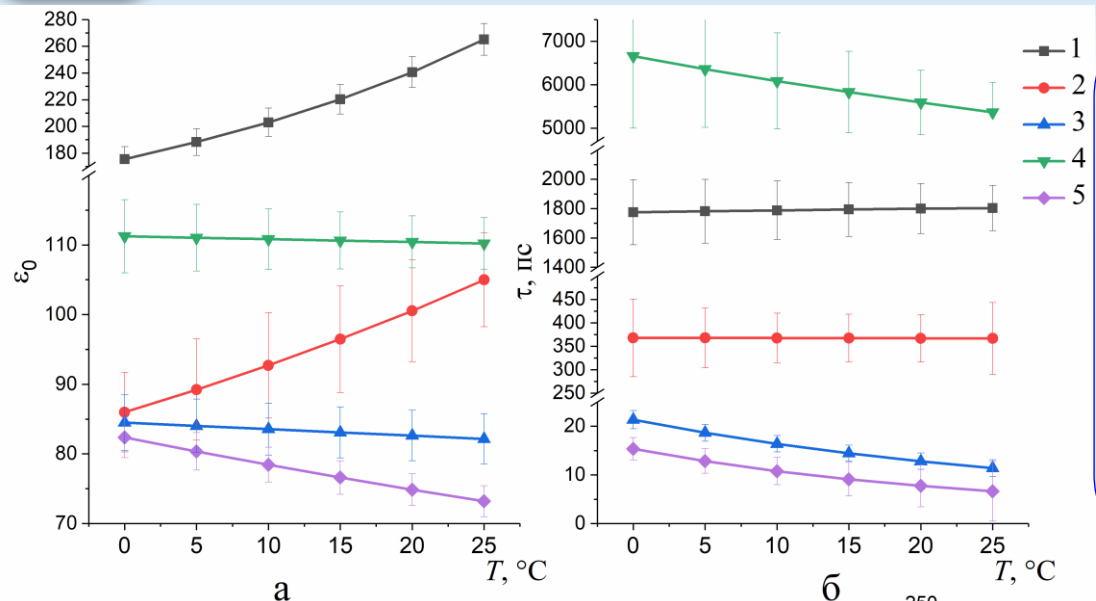


Рисунок 4. Рассчитанные частотные спектры ДП воды (в, е, и) для различных вариаций температурных зависимостей ϵ_0 и времени релаксации.



Диэлектрическая проницаемость категорий почвенной воды



Мнорелаксационное уравнение Дебая

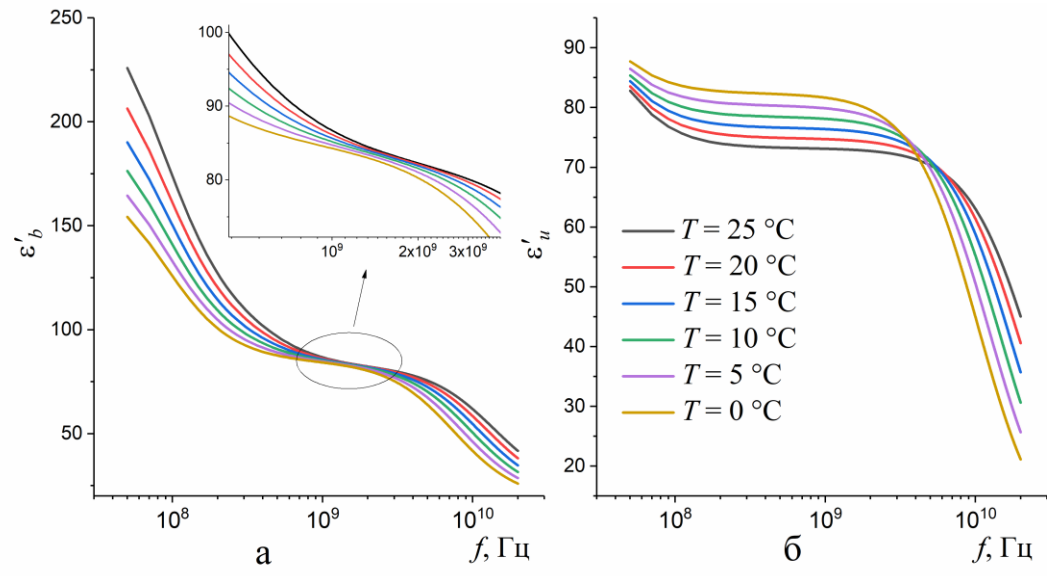
$$\epsilon_w^* = \frac{\epsilon_{0w1} - \epsilon_{0w2}}{1 - i2\pi f\tau_{w1}} + \frac{\epsilon_{0w2} - \epsilon_{0w3}}{1 - i2\pi f\tau_{w2}} + \frac{\epsilon_{0w3} - \epsilon_{\infty w}}{1 - i2\pi f\tau_{w3}} + \epsilon_{\infty w}$$

ϵ_{∞} – высокочастотный предел ДП
 ϵ_0 – низкочастотный предел ДП
 f – частота электромагнитного поля,
 τ – время релаксации
 $w = b$ – связанная вода,
 $w = u$ – несвязанная вода.

Номера индексов обозначают параметры спектров КДП первой, второй и третьей релаксации

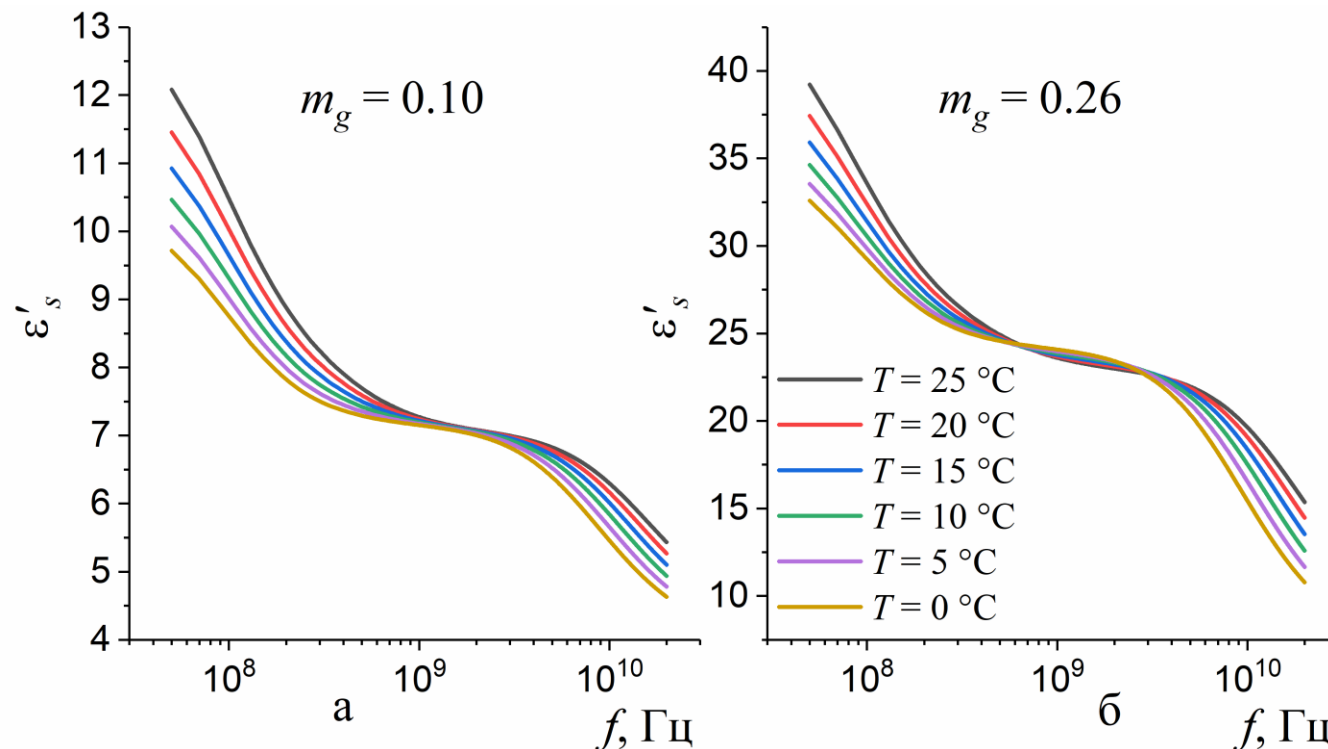
Рисунок 5. Низкочастотный предел диэлектрической проницаемости и время релаксации связанной и несвязанной воды.
 1 – первая релаксация **связанной** воды,
 2 – вторая релаксация **связанной** воды,
 3 – третья релаксация **связанной** воды,
 4 – первая релаксация **несвязанной** воды,
 5 – вторая релаксация **несвязанной** воды.

Рисунок 6. Рассчитанные спектры ОДП **связанной** (а) и **несвязанной** (б) воды



$$\frac{n_s^*(m_g, f, T) - 1}{\rho_d(m_g)} = \begin{cases} \frac{n_m^* - 1}{\rho_m} + \frac{n_b^*(f, T) - 1}{\rho_b} m_g, & m_g \leq m_{g1} \\ \frac{n_m^* - 1}{\rho_m} + \frac{n_b^*(f, T) - 1}{\rho_b} m_{gt} + \frac{n_u^*(f, T) - 1}{\rho_u} (m_g - m_{g1}), & m_g \geq m_{g1} \end{cases}$$

$$n_s^* = n_s + ik_s = \sqrt{\epsilon_s^*} = \sqrt{\epsilon_s' + i\epsilon_s''}$$



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 , у n и ρ , относятся к влажной почве, сухой почве, минеральной компоненте, связанной и несвязанной воде, соответственно
 n_s – показатель преломления почвы
 κ_s – коэффициент затухания почвы

Рисунок 7. Спектры ДП образцов почвы с содержанием глинистой фракции 41.3 %, или 57.1 %, песка 1.6 % и с влажностями $m_g = 0.10$ (а) и $m_g = 0.26$ (б).



Частота пересечения спектров диэлектрической проницаемости влажной почвы

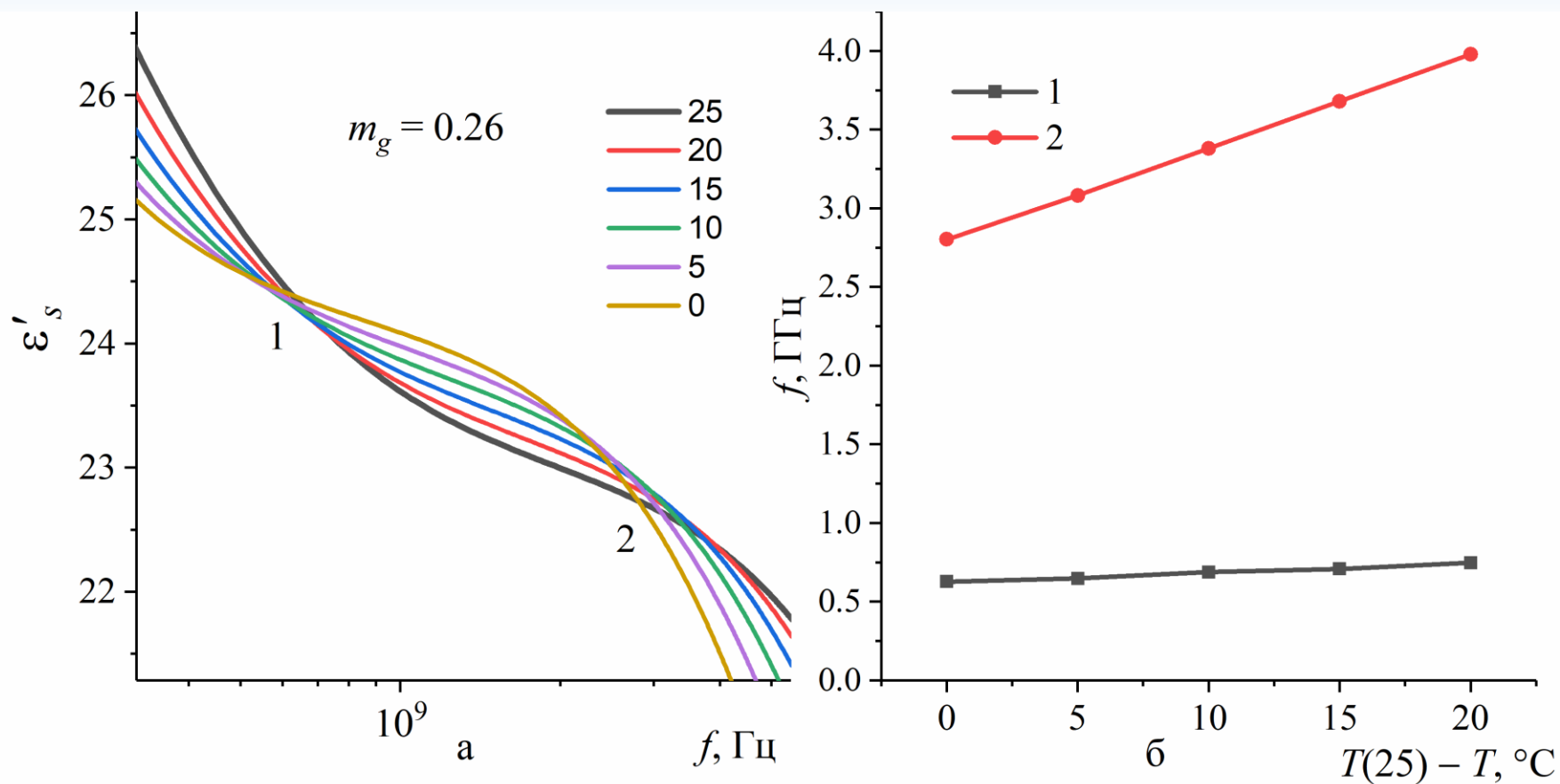


Рисунок 8. Температурная зависимость первой (1) и второй (2) точек пересечения спектров ДП почвы, измеренных в диапазоне температур от 20 до 0 °С, со спектром ДП, измеренном для температуры 25 °С, для образца с влажностью $m_g = 0.26$.



Частота пересечения спектров диэлектрической проницаемости почвы от влажности

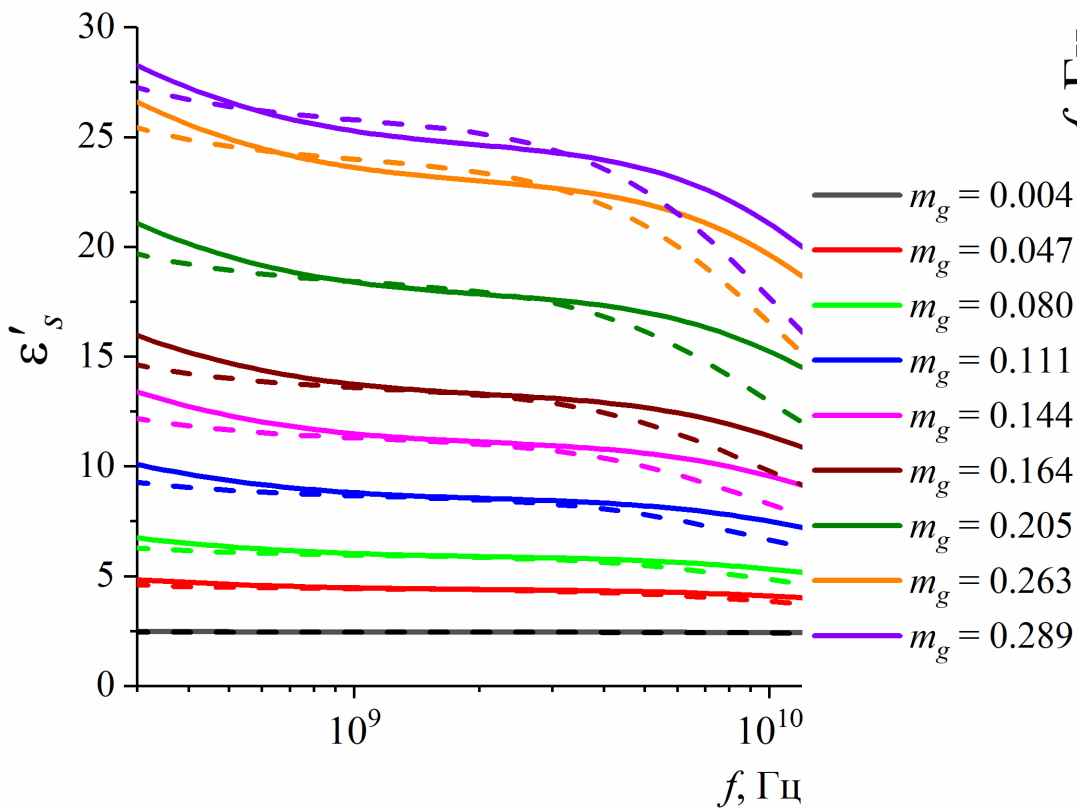


Рисунок 9. Спектры ДП для образцов различных влажностей при температуре 25 °С (сплошная линия) и 5 °С (пунктирная линия).

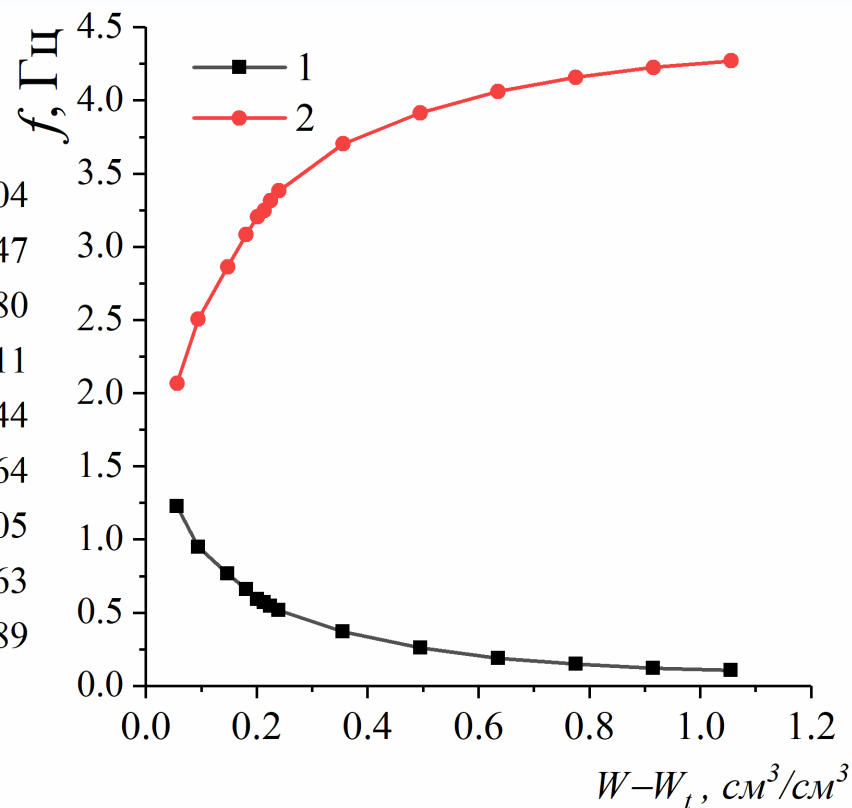


Рисунок 10. Зависимость первой (1) и второй (2) точек пресечения спектров ДП для температур 25 и 5 °С в зависимости от объемной доли несвязанной воды.



Заключение

- ❖ Найдены частоты, при которых температурная зависимость ДП во влажной минеральной почве минимальна.
- ❖ Если в почве присутствует только связанная вода, то спектры ДП почвы не имеют пересечений при изменении температуры, при этом имеется область частот от 1 до 3 ГГц, в которой значения ДП почвы близки друг к другу при изменении температуры и различаются не более чем на 3%.
- ❖ Если в почве присутствует как связанная, так и несвязанная вода, то наблюдаются две точки пересечения спектров ДП почвы при изменении температуры, где температурная зависимость отсутствует.
- ❖ Точки пересечения возникают в результате действия низкочастотных релаксаций Максвелла-Вагнера, проявляющихся в связанной воде, и высокочастотной релаксации, проявляющейся в несвязанной воде.
- ❖ Когда в почве присутствует как связанная, так и несвязанная вода, можно выделить диапазон частот от 500 МГц до 3,5 ГГц, где спектры ДП почвы расположены наиболее близко друг к другу и находятся в пределах 7 % от средней величины ДП почвы.



Спасибо за внимание!

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