



**Двадцать первая международная конференция  
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"**



**13 - 17 ноября 2023 г., Москва**

**Влияние содержания органического вещества на  
спектры диэлектрической проницаемости влажных почв  
при положительных температурах**

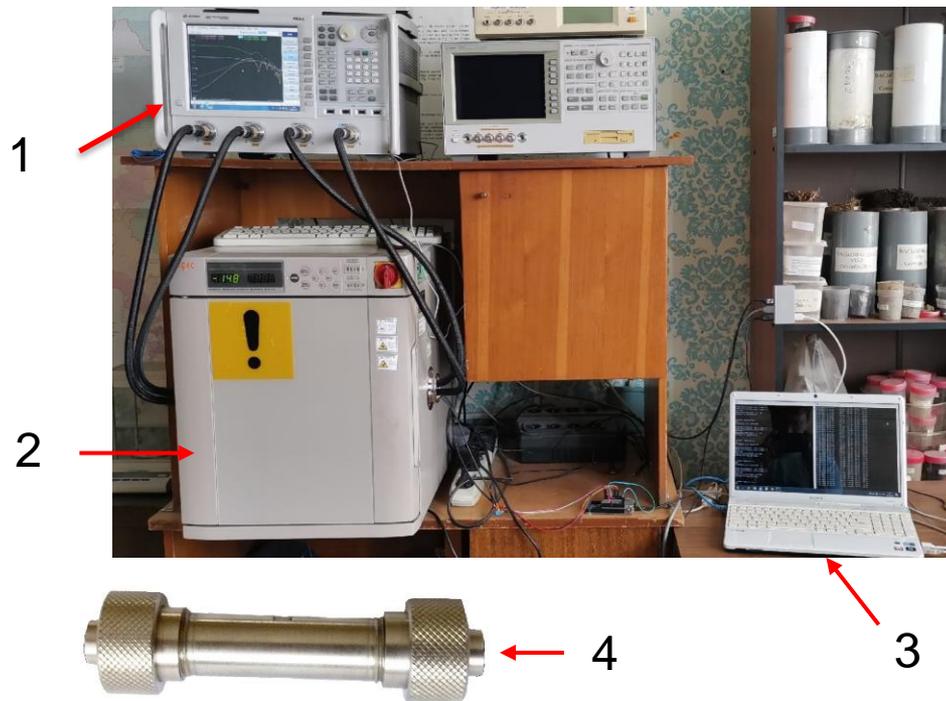
**Каравайский А.Ю., Лукин Ю.И.**

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

# Материалы и методы

Таблица 1. Исследуемые почвы

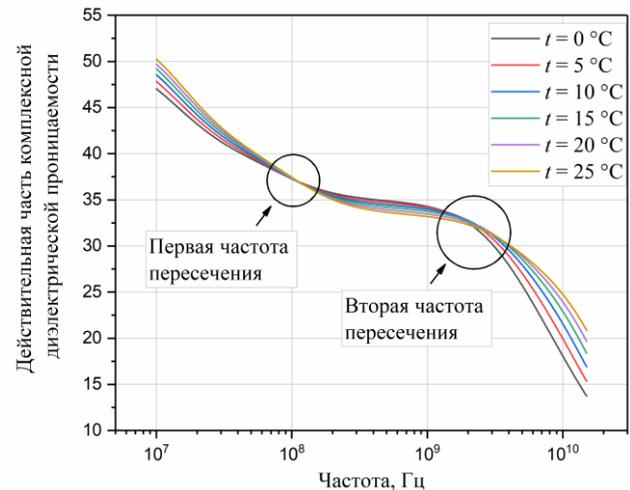
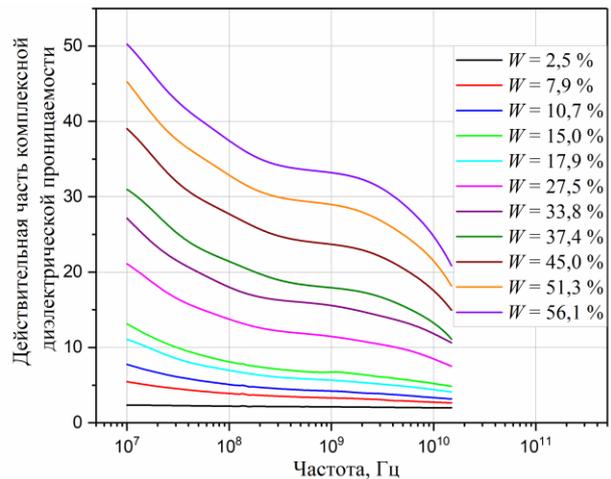
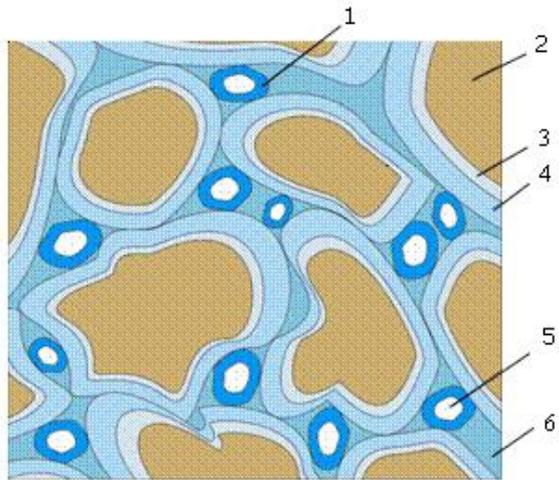
№ образца почвы	Содержание органического вещества, %
1	11,1
2	21,4
3	27,7
4	31,1
5	54,5



**Рисунок 4. Обзор экспериментальной установки**

- 1. Векторный анализатор цепей Keysight N5232**
- 2. Температурная камера SU-241**
- 3. Компьютер**
- 4. Коаксиальный измерительный контейнер**

# Значения действительной части комплексной диэлектрической проницаемости почвы



**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

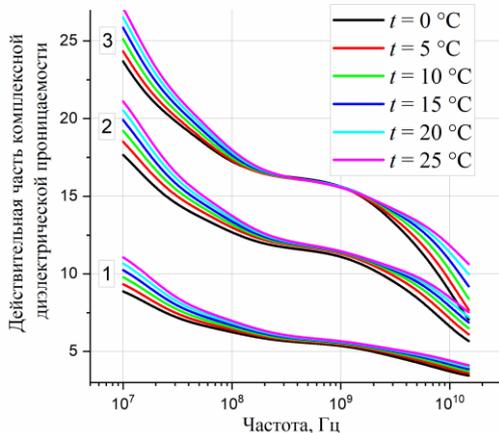
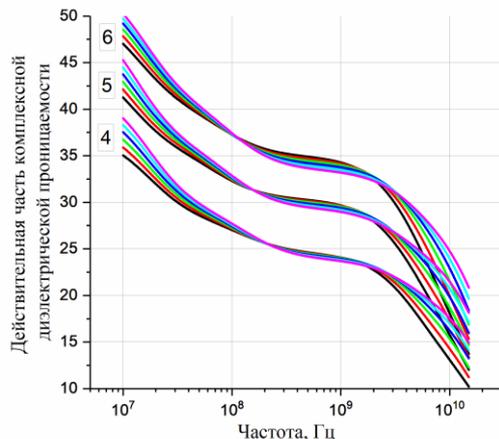
**Рисунок 2. Измеренные спектры действительной части комплексной диэлектрической проницаемости влажной почвы с различным объемным содержанием воды.**

Содержание органического вещества,  
 $C_o = 21,4 \%$   
 Температура,  $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

**Рисунок 3. Измеренные спектры действительной части комплексной диэлектрической проницаемости влажной почвы при различных положительных температурах.**

Содержание органического вещества,  
 $C_o = 21,4 \%$   
 Объемное содержание воды,  $W = 56,1 \%$

# Результаты и обсуждения



- Существуют влажности при которых пересечение спектров действительной части комплексной диэлектрической проницаемости (ДП) почвы не наблюдаются (влажности 1 и 2 рисунок 5). В то же время имеется область частот от 200 МГц до 2 ГГц, где спектры максимально сближаются друг с другом. При этом вариации значений ДП в данной частотной области не превышают 12 %.
- Начиная с некоторой влажности, появляются две области пересечения спектров ДП почвы: одна – в мегагерцовом диапазоне частот, другая – в гигагерцовом.
- В частотной области между точками пересечения ДП влажной почвы уменьшается с увеличением температуры, однако в этой области температурная зависимость проявляется слабее по сравнению с остальными частотами спектра ДП почвы. Вариации значений ДП образцов почв, для которых характерны две области пересечения спектров ДП почвы, в частотном диапазоне между точками пересечения не превышают 8 % относительно средних значений.
- Пересечения спектров ДП почвы вызваны несколькими релаксационными процессами в отдельных категориях почвенной воды (связанная и несвязанная вода).
- Как было показано в [1], пересечение спектров ДП влажной почвы наблюдается, когда присутствует как связанная так и несвязанная вода в почве.

1. Каравайский А. Ю., Лукин Ю. И. Влияние диэлектрических релаксаций почвенной воды на температурную зависимость диэлектрической проницаемости почвы //Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 1, doi: 10.30898/1684-1719.2023.1.4.

**Рисунок 5. Измеренные спектры диэлектрической проницаемости почвы с содержанием органического вещества 21,4 %, при следующих значениях объемной влажности: 1 – 15 %, 2 – 27,5 %, 3 – 33,8 %, 4 – 45 %, 5 – 51,3 %, 6 – 56,1 %**

# Результаты и обсуждения

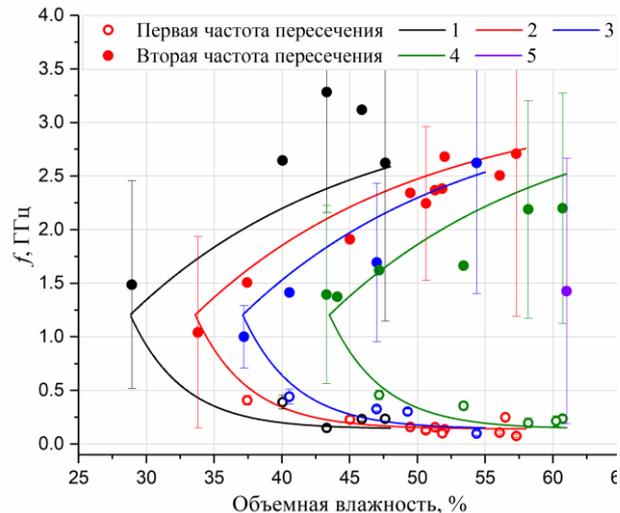


Рисунок 6. Средние частоты первой и второй точек пересечения спектров ДП образцов почв в диапазоне температур от 0 до 25 °С в зависимости от объемной влажности при содержании органического вещества: 1 – 11,1 %, 2 – 21,4 %, 3 – 27,7 %, 4 – 31,1 %, 5 – 54,5 %. Символами показаны экспериментальные данные, линиями – результаты расчета по модели (2) с параметрами, приведенными в таблице 1.

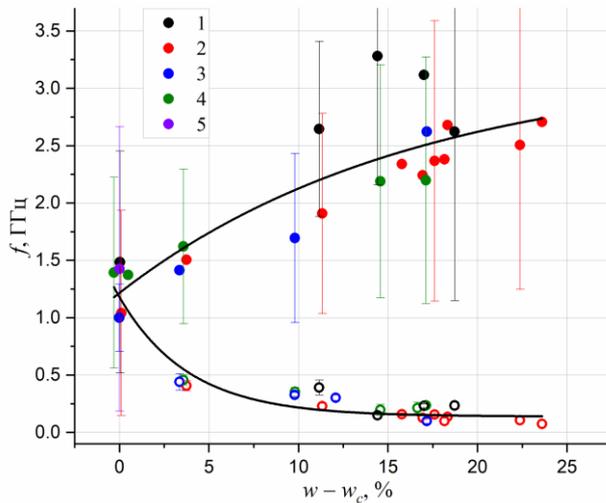


Рисунок 7. Средние частоты первой и второй точек пересечения спектров ДП влажных почв в диапазоне температур от 0 до 25 °С в зависимости от  $(w - w_c)$ , при содержании органического вещества: 1 – 11,1 %, 2 – 21,4 %, 3 – 27,7 %, 4 – 31,1 %, 5 – 54,5 %. Символами показаны экспериментальные данные, линиями – результаты аппроксимации всей совокупности данных с применением функции (1).

$$\overline{f_{c1,2}} = A_{1,2} e^{k_{1,2} \cdot (w - w_c)} + f_{01,2}, \quad (1)$$

для

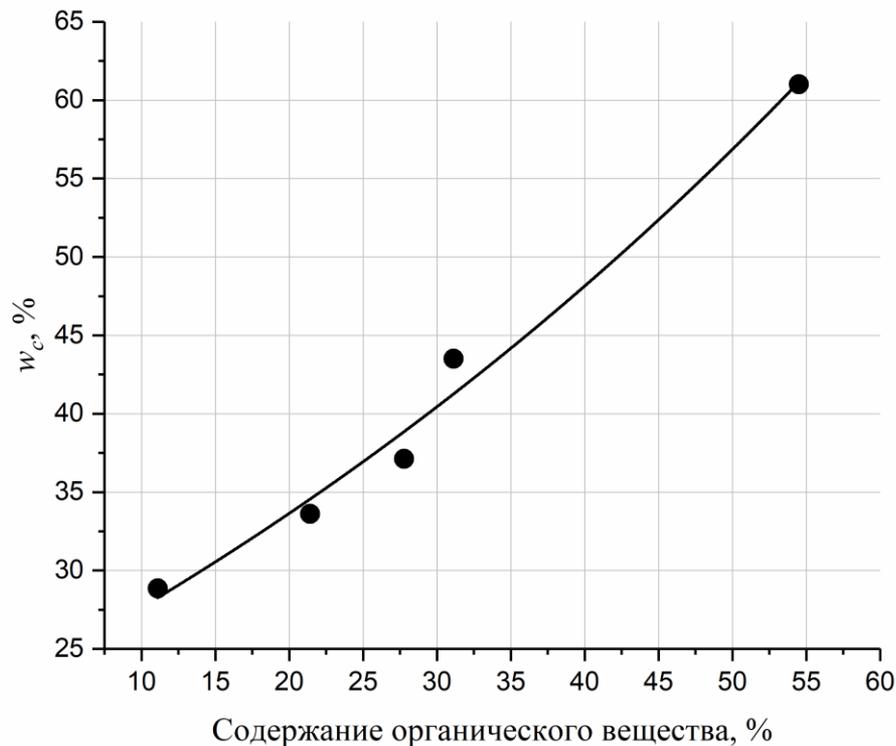
$$w \geq w_c,$$

$w_c$  – минимальное значение объемной влажности, при которой наблюдаются пересечения спектров ДП почвы  
 $w$  – объемная влажность почвы  
 $A, k$  и  $f_0$  – эмпирические коэффициенты индексы 1 и 2 при  $A, k$  и  $f_0$  относятся к первой и второй точкам пересечения спектров ДП почвы соответственно

Таблица 2. Коэффициенты эмпирической модели для средних частот первой и второй точек пересечения спектров ДП почв

	$A$	$k$	$f_0$
Первая точка пересечения	1,04±0,09	-0,26±0,05	0,14±0,02
Вторая точка пересечения	-1,99±0,92	-0,06±0,05	3,21±0,95

# Результаты и обсуждения



$$w_c = 40e^{0,012 \cdot C_o} - 17,7, (2)$$

$w_c$  – минимальное значение объемной влажности, при которой наблюдаются пересечения спектров ДП почвы  
 $C_o$  – содержание органического вещества в почве в %.

Рисунок 8. Минимальное значение влажности, при котором появляются пересечения спектров ДП почв, в зависимости от содержания органического вещества. Символами показаны экспериментальные данные, линией – результат расчета по модели (2).

# Заключение

- Для пяти почв была определена минимальная объемная влажность,  $w_c$ , при которой появляется пересечение спектров ДП почвы.
- Пока объемное содержание воды в почве не превышает значение  $w_c$ , имеется область частот от 200 МГц до 2 ГГц, где наблюдается слабая температурная зависимость ДП почвы, при этом вариации значений ДП в данном частотном диапазоне не превышают 12 % относительно среднего при изменении температуры от 0 до 25 °С.
- Для образцов почв с влажностями, превышающими  $w_c$  наблюдаются два пересечения спектров ДП почвы, полученных для одного значения влажности, но разных температурах.
- Для средних значений частот первой и второй точек пересечений в интервале изменений температур от 0 до 25 °С была предложена эмпирическая модель, параметрами которой являются влажность и содержание органического вещества.
- Также была предложена эмпирическая модель для описания  $w_c$  от содержания органического вещества.
- Полученные формулы позволяют рассчитать ширину частотного диапазона, в котором температурная зависимость диэлектрической проницаемости почвы будет минимальной. Такая информация позволит выбрать частоту электромагнитного поля для дистанционных методов измерения влажности почв, при которой влиянием температуры можно пренебречь.



**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.**