



Экспериментальное исследование диэлектрической проницаемости кристаллических пород в диапазоне частот 200 – 1700 МГц

Выполнил:

Аспирант 2 года обучения,
м.н.с ИГ КарНЦ РАН
Цветков Максим Олегович

Георадиолокация представляет собой высокочастотный (от 10 МГц до 2 ГГц) метод изучения распространения электромагнитных волн в исследуемой среде для получения изображений грунтов и подземных структур.



Георадар

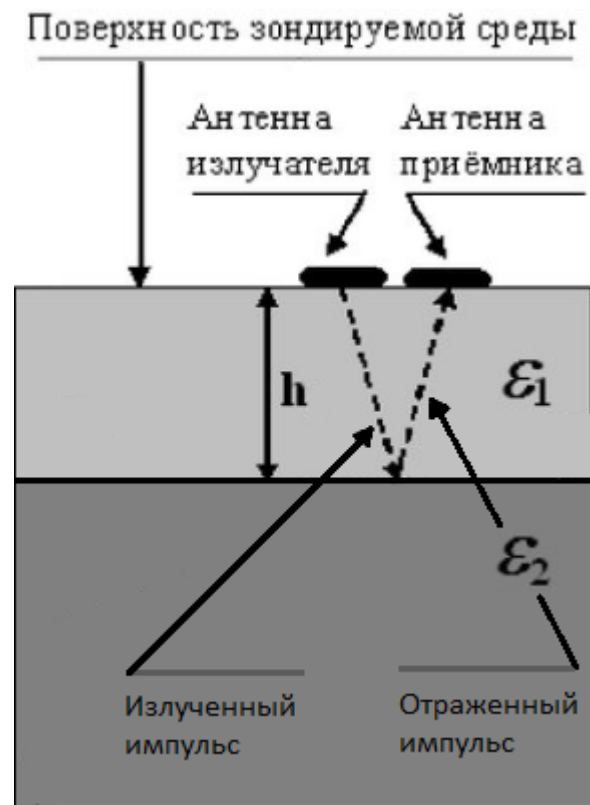


Схема распространения волны



Основным методом интерпретации данных георадиолокации является скоростной анализ картины отражений, выраженный формулой:

$$V = c / \sqrt{\epsilon^*}$$

, где c – скорость света в вакууме, ϵ^* – комплексная диэлектрическая проницаемость

- В связи с этим основным электрофизическим параметром среды метода является комплексная диэлектрическая проницаемость (ϵ^*), которая состоит
- из действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') частей.

$$\epsilon^* = \boxed{\epsilon'} - j\epsilon''$$



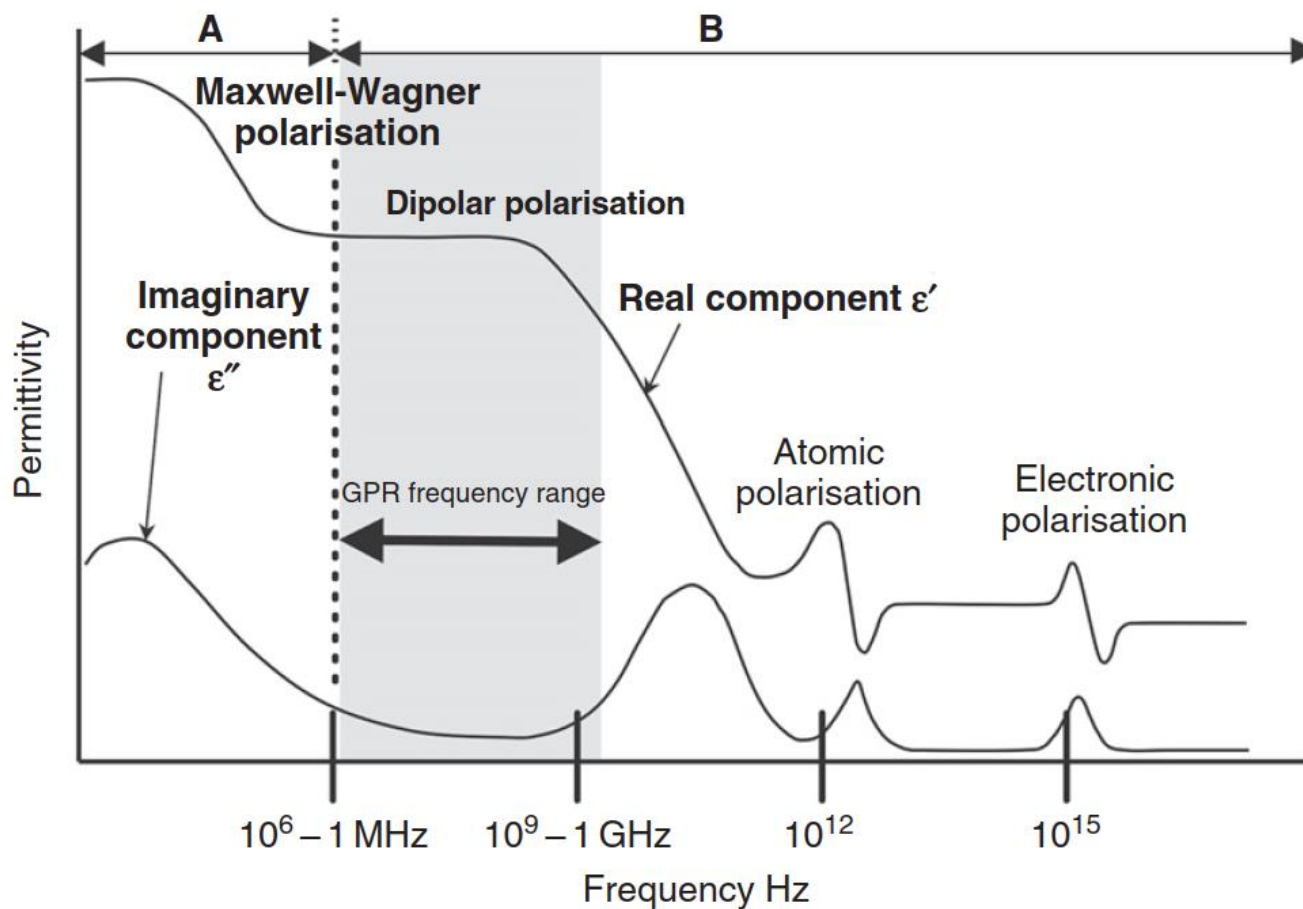
Параметры диэлектрической проницаемости (ДП) горных пород (ГП) дополнительно зависят от:

- Плотности;
- Влажности;
- Ориентировки зерен;
- Трещиноватости;
- ...

Поэтому, для более полного понимания исследуемой структуры и правильности интерпретации данных важно как можно точнее параметризовать значения ДП среды.

! Существующие решения позволяют, в основном, исследовать рыхлые породы или жидкости, однако исследования ДП кристаллических пород осложнено в связи с трудностью изготовления измерительной ячейки.

Частотный диапазон метода георадиолокации находится в зоне плато.



Частотная область метода (Cassidy, 2009)

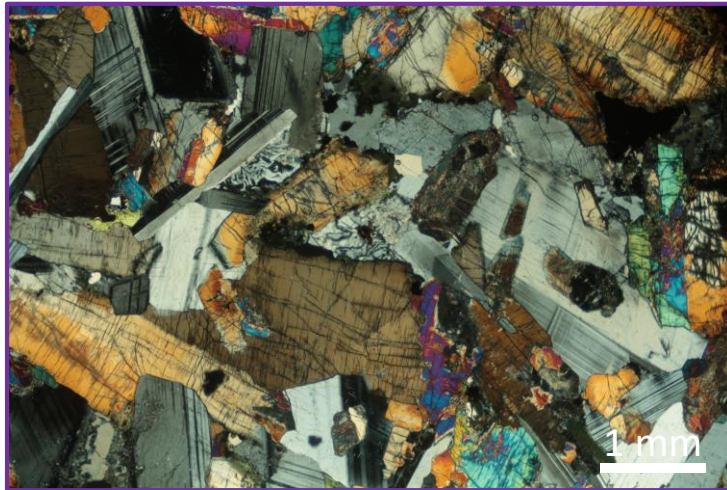
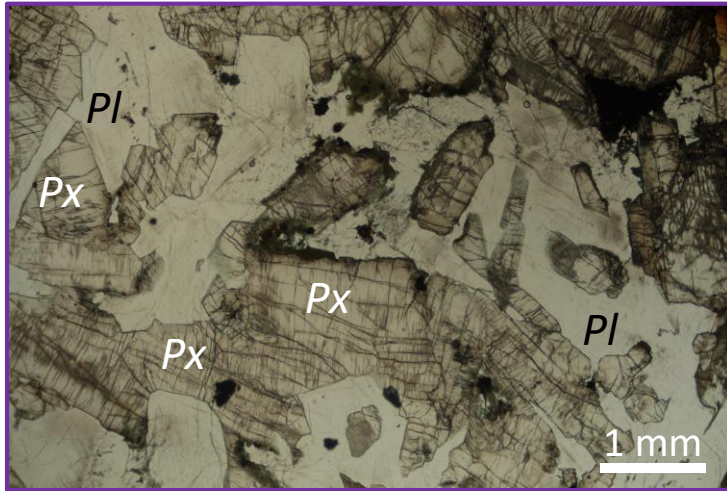


Цель:

Цель - разработать способ определения ДП образцов кристаллический горных пород в георадарном диапазоне частот.

Задачи:

1. Разработать лабораторный стенд для измерения ДП кристаллических пород в низкочастотном диапазоне (30 – 300 МГц);
2. Разработать лабораторный стенд для измерения ДП кристаллических пород в высокочастотном диапазоне (300 – 1700 МГц);
3. Исследовать ДП образца кристаллического габбродолерита.



Габбродолерит

Массивные, полнокристаллические, средне-крупнозернистые, очень хорошей сохранности

Главные минералы: плагиоклаз, пироксен

Второстепенные минералы: биотит, амфибол, кварц, рудный минерал

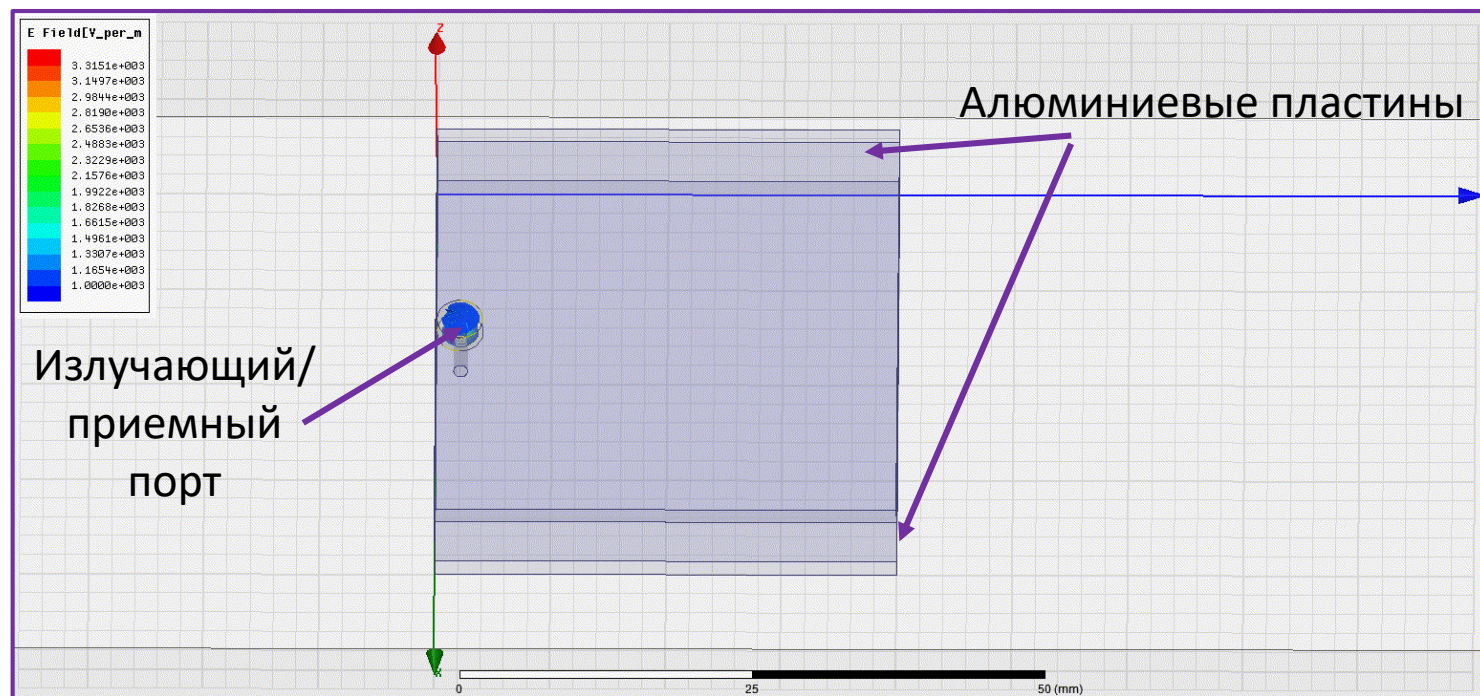
Подготовка образцов горных пород (ГП) к исследованию:

1. Изготовлена пластина из образца ГП размером 40x40x6 мм;
2. Изготовлен цилиндр из образца ГП диаметра 30 мм и высотой 20 мм.



Моделирование в среде Ansoft HFSS позволяет извлекать параметры **излучения и рассеяния**, матричные параметры СВЧ-структуры (**S параметры**), отображать в 3D-распределение токов, распределения электромагнитных полей и т.д.

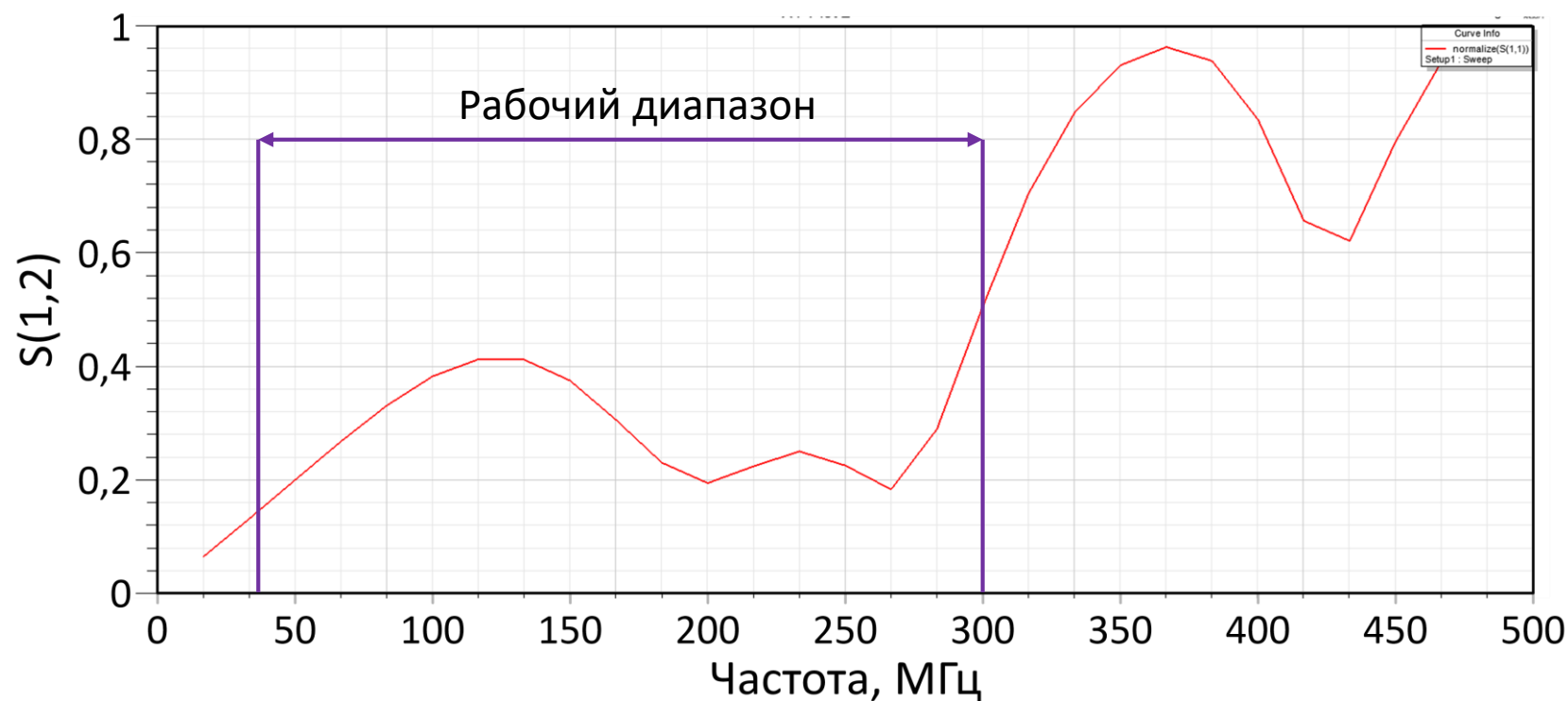
1 этап: моделирование и изготовление полосковой ячейки, работающей в диапазоне **30 МГц – 300 МГц**



Распределение электрического поля в ячейке



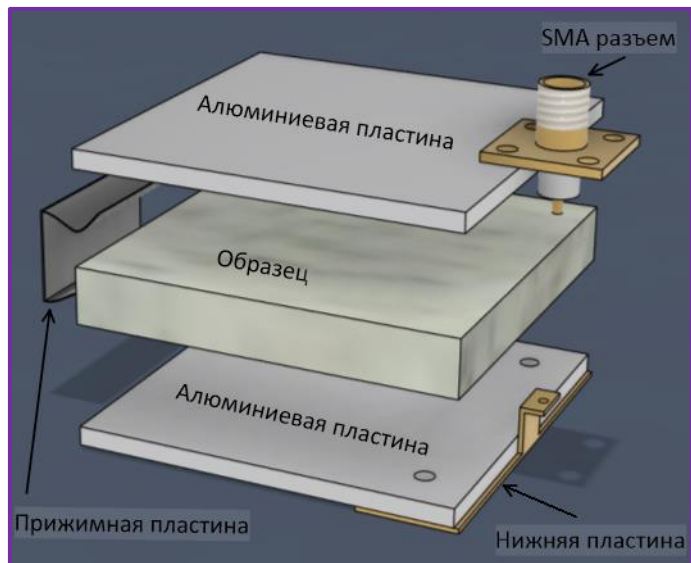
Один из ключевых параметров при расчете модели – коэффициент поглощения волны $S(1,2)$



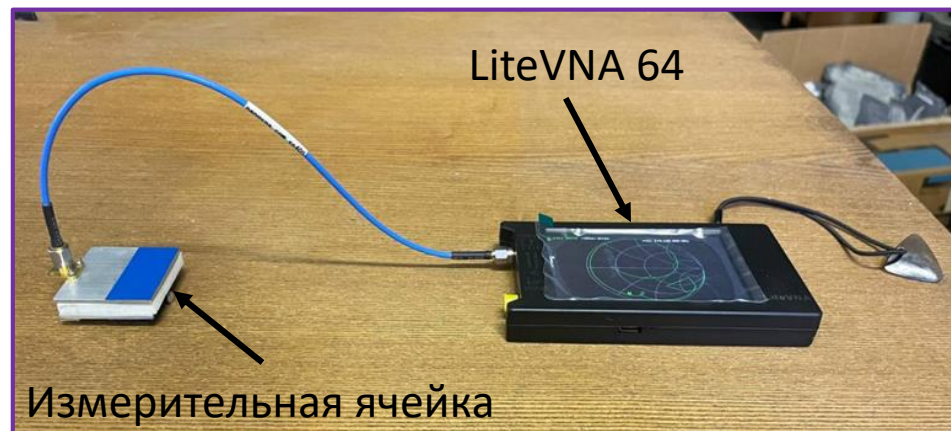
Проведение эксперимента



Исследование ДП образцов горных пород проводилось с помощью векторного анализатора цепей «LiteVNA 64»



Устройство измерительной ячейки



Исследуемый образец

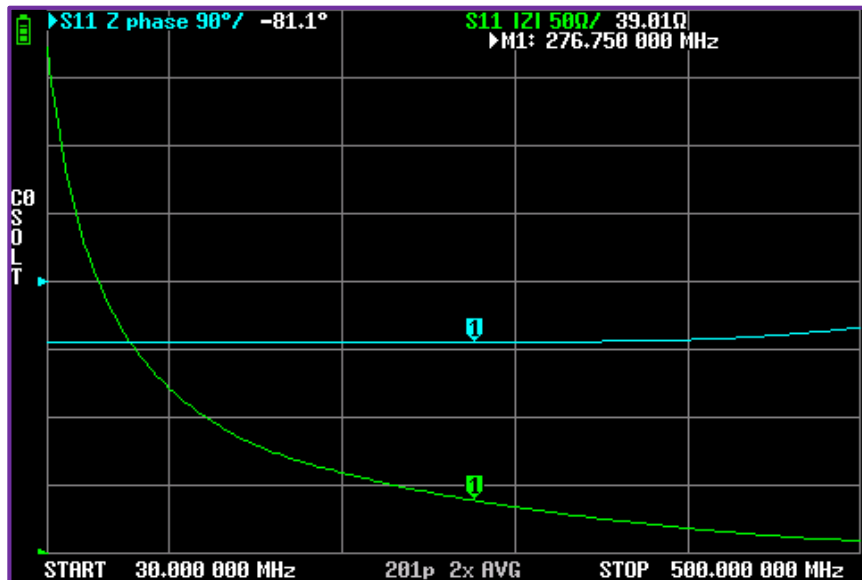


Полосковая ячейка. Проведение замеров

В диапазоне частот 30 МГц – 300 МГц фиксировалось 2 параметра:

Z - модуль комплексного сопротивления (Ом)

ϕ - угол фазового сдвига комплексного сопротивления (градусы)



Кривые $|Z|$ и ϕ (зеленая и голубая линии)

Рассчитывались параметры действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') частей ДП (1) и (2):

$$\epsilon'(\omega) = \frac{-\sin(\phi(\omega))}{\omega C_0 |Z(\omega)|} \quad (1)$$

$$\epsilon''(\omega) = \frac{\cos(\phi(\omega))}{\omega C_0 |Z(\omega)|} \quad (2)$$

, где ω - циклическая частота (рад/с), C_0 - геометрическая емкость (Ф)

Также рассчитывался тангенс угла диэлектрических потерь (3):

$$\operatorname{tg}(\delta) = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (3)$$



Преимущества:

- Простота изготовления;
- Удобство измерений;
- Простая пробоподготовка;
- Работа в «низкочастотном» диапазоне (от 30 МГц).

Недостатки:

- Толщина образцов до 10 мм;
- Высокие потери из-за отсутствия стенок;
- Работа исключительно в диапазоне частот 30 МГц – 300 МГц.

В ходе экспериментов установлено, что для работы в георадарном диапазоне частот (до 2 ГГц) необходима ячейка закрытого типа для исключения рассеивания электрического поля во внешнюю среду, поэтому была спроектирована и разработана **ячейка рупорного типа.**

2 этап: моделирование и изготовление рупорной ячейки, работающей в диапазоне **300 МГц – 2000 МГц**

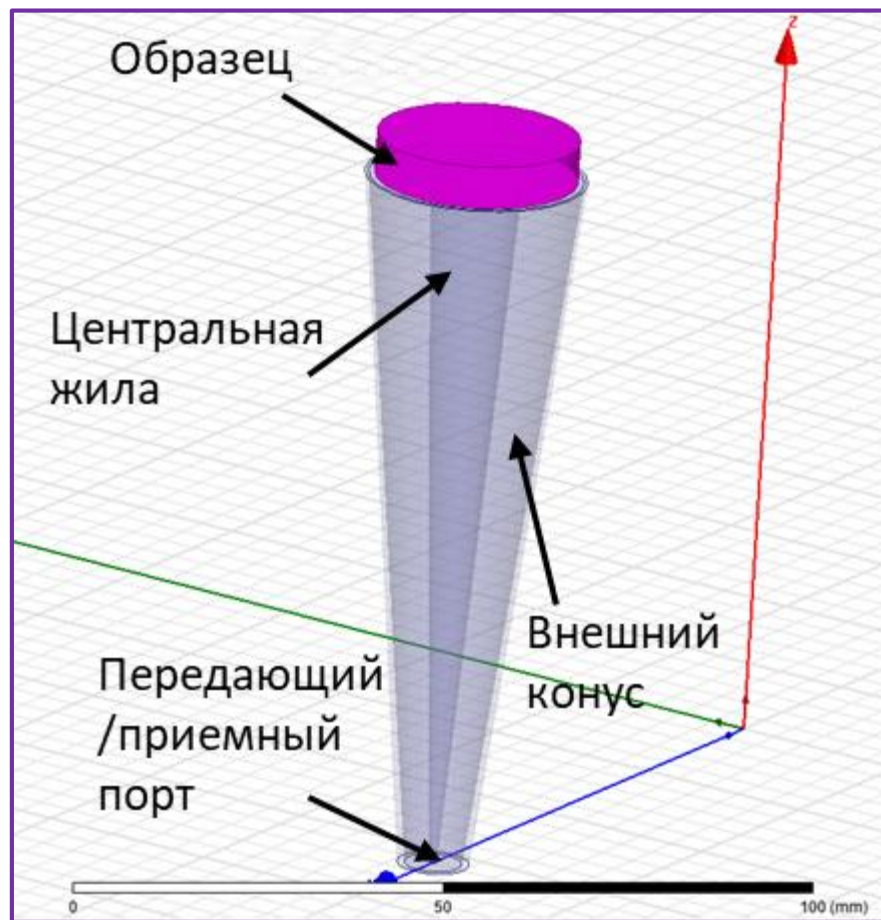
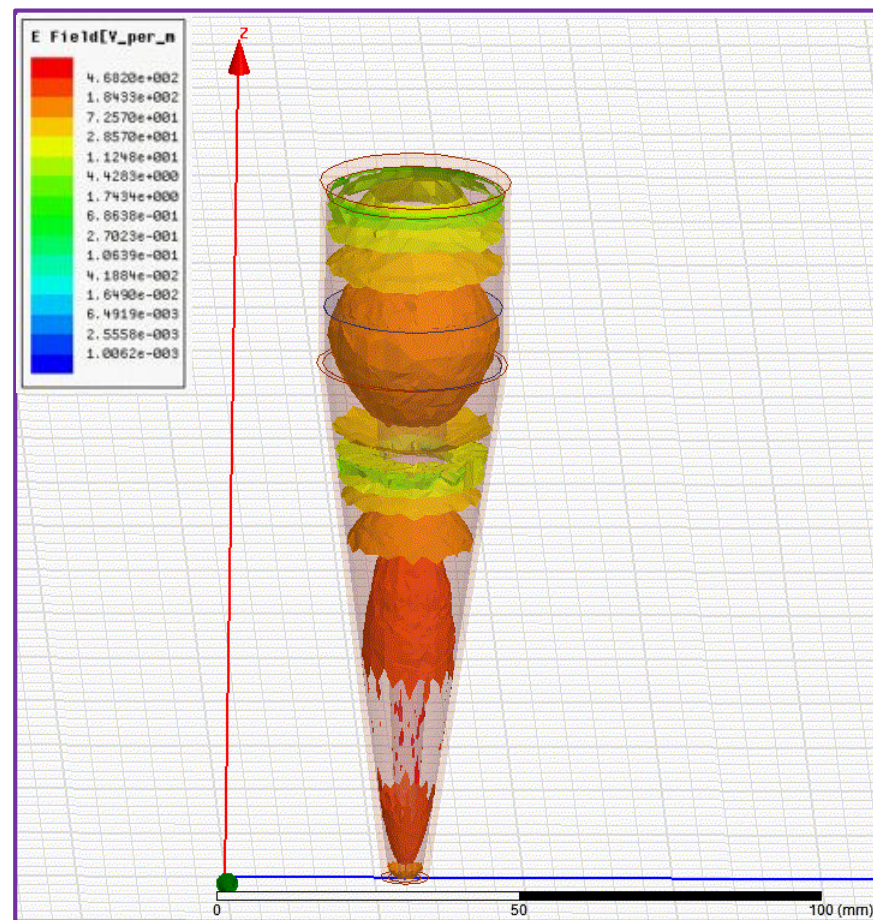
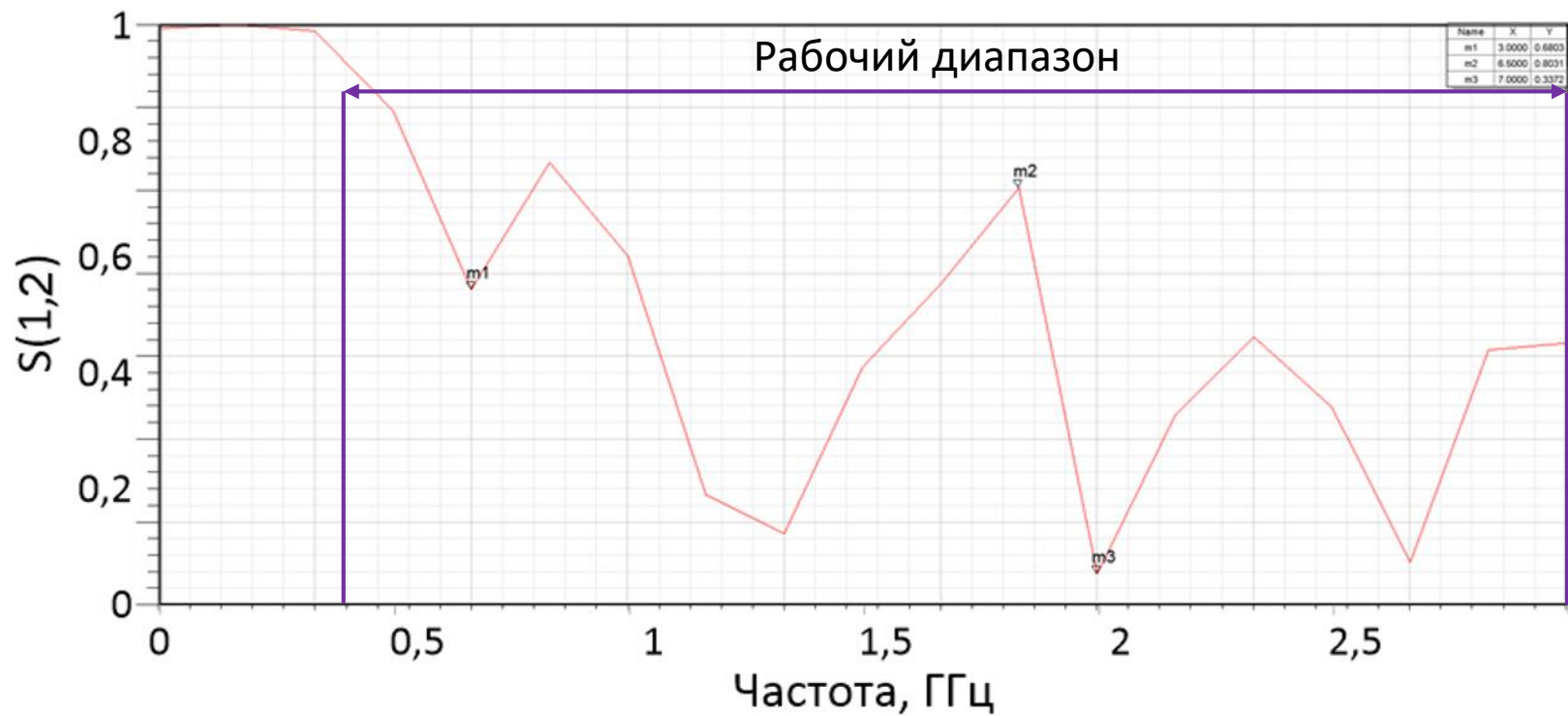


Схема устройства измерительной ячейки



Распределение электрического поля

Коэффициент поглощения ($S(1,2)$) рупорной ячейки в зависимости от частоты



Проведение эксперимента



Исследование ДП образцов горных пород будет проводиться с помощью векторного анализатора цепей «LiteVNA 64». Диапазон измерений – 300 МГц – 1700 МГц.



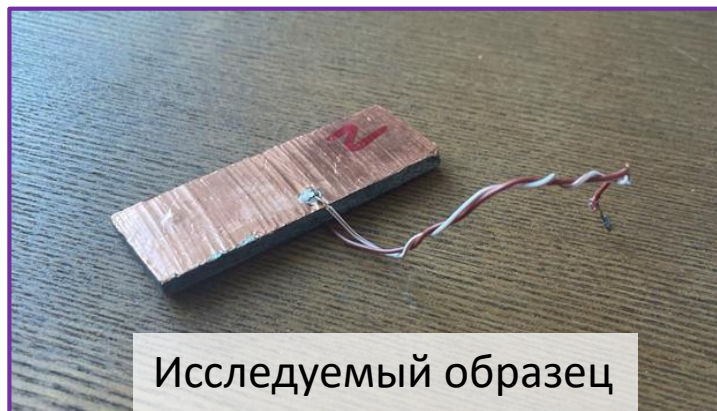
Исследуемый образец

Общий вид лабораторного стенда

Общий вид ячеек

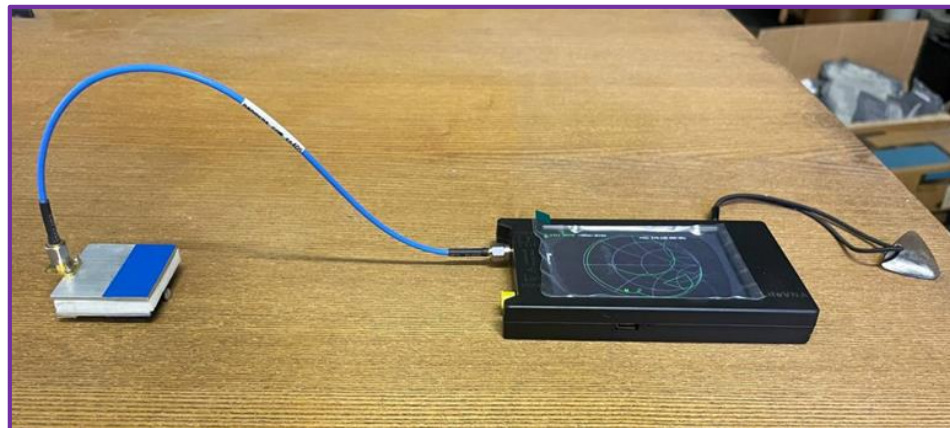


0 этап: Ячейка емкостного типа
Частотный диапазон: **1 Гц – 1 МГц**

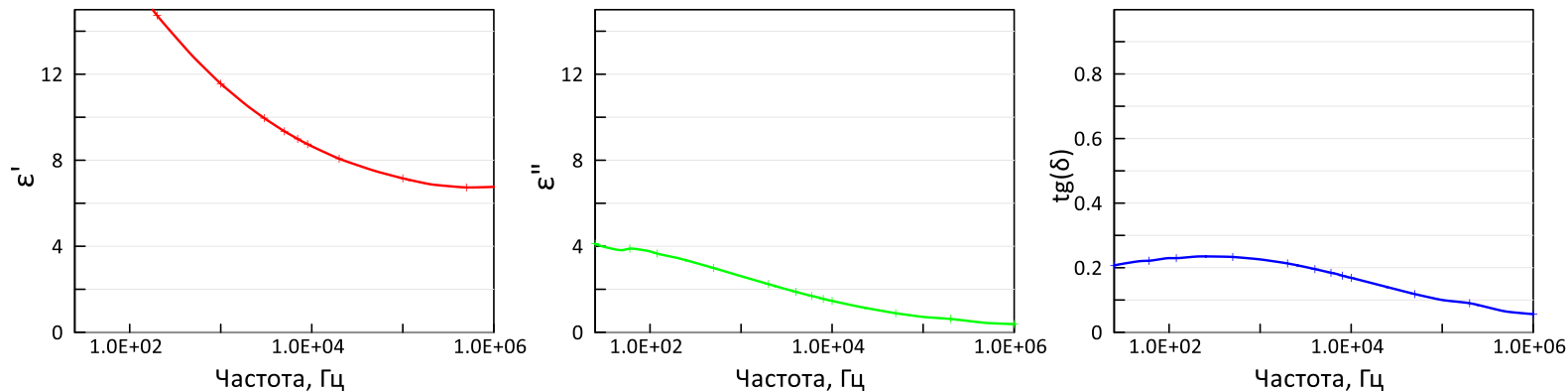


Исследуемый образец

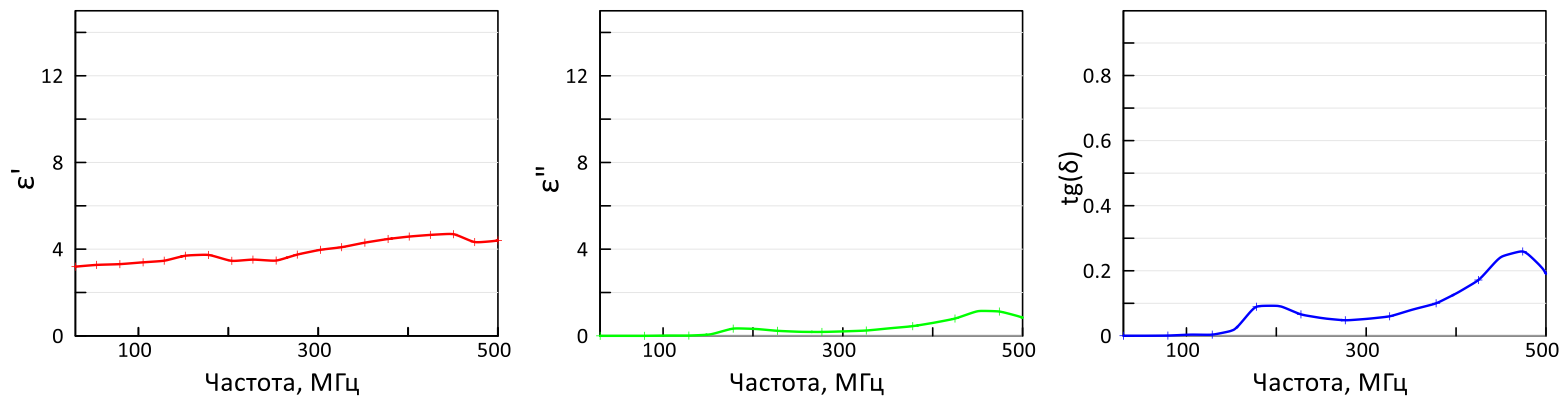
1 этап: Ячейка полоскового типа
Частотный диапазон: **30 МГц – 300 МГц**



(а)



(б)

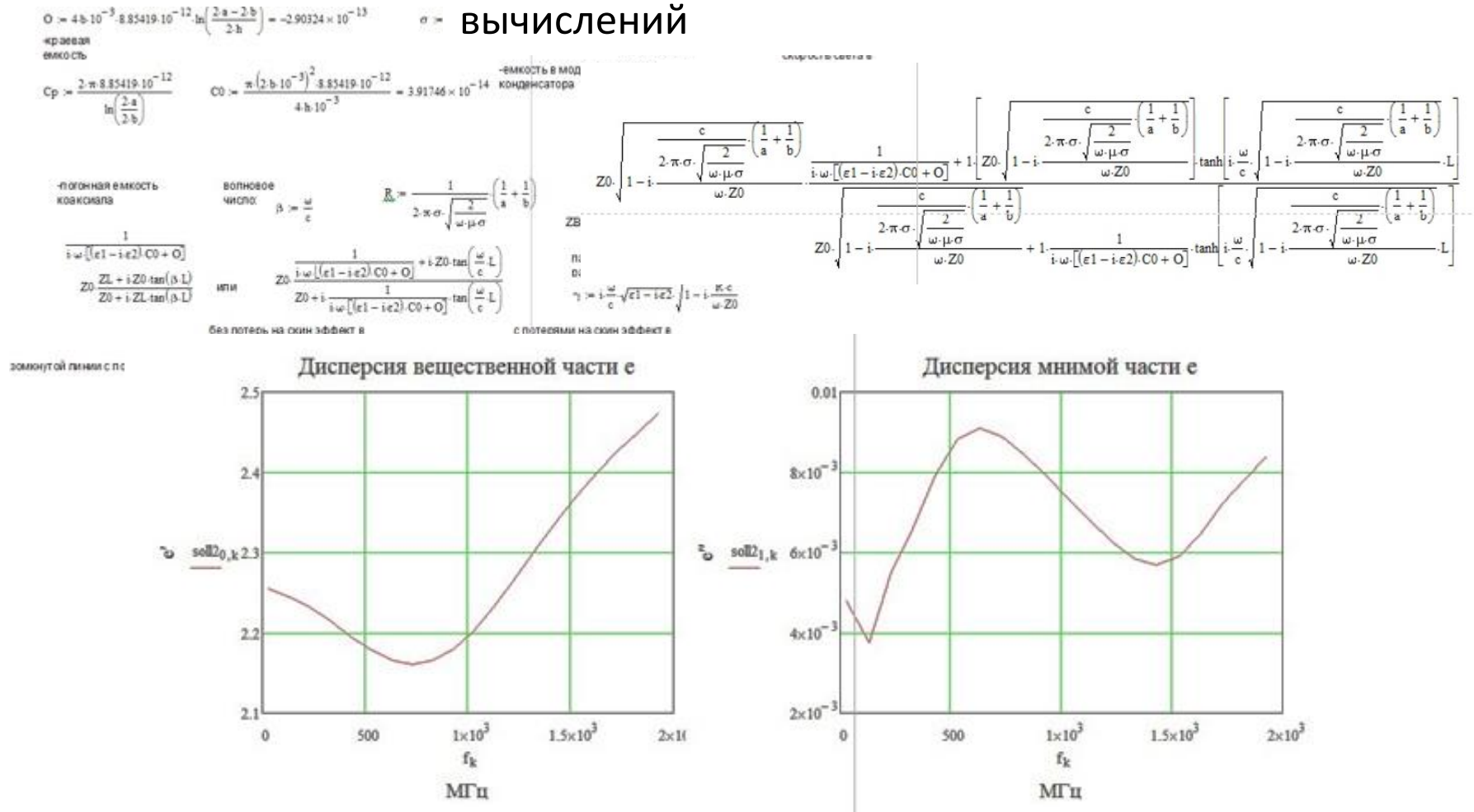


Графики зависимости действительной (ϵ'), мнимой (ϵ'') частей диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}(\delta)$), полученных на конденсаторной (а) и полосковой (б) ячейках



Расчеты ДП для рупорной ячейки

Учет различных потерь не только привел к увеличению точности расчетов, но и объемам вычислений



Дисперсия действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') частей ДП для тефлона толщиной 3 мм



Преимущества:

- Простота изготовления образцов;
- Работа в георадарном диапазоне частот;
- Возможность исследовать образцы высотой до 20 мм;
- Высокая точность измерений.

Недостатки:

- Сложность изготовления ячейки;
- Сложность расчетов ДП при учете множества потерь.

! В перспективе планируется разработка софта для удобства вычисления ДП.



- В связи с тем, что георадарная область частот находится в широком диапазоне (10 МГц – 2 ГГц), изготовление универсального стенда является затруднительным. Решением является изготовление нескольких стендов с частотным перекрытием;
- Изменение геометрических размеров измерительной ячейки напрямую влияет на распространение электрического поля, поэтому важно предварительно проводить моделирование;
- Получены значения ДП образцов габбродолерита. На полосковой ячейке заметен линейный рост ДП с частотой в связи с высокой степенью рассеяния и затухания сигнала. Рабочая область емкостной ячейки находится в ее частотном пределе;
- Получение значений ДП кристаллических пород в георадарном диапазоне частот полосковым методом и с помощью рупорных антенн является перспективным, поскольку позволит параметризовать исследуемые среды, что улучшит качество обработки и интерпретации данных.



- Родионова О. В. и др. Метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости почвогрунтов в широкой полосе частот. – 2016.
- Финкельштейн М. И., Кутев В. А., Золотарев В. П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. – 1986.
- Daniels D. J. (ed.). Ground penetrating radar. – let, 2004. – Т. 1.
- Cassidy N. J. Electrical and magnetic properties of rocks, soils and fluids // Ground penetrating radar theory and applications. – 2009. – С. 41-72.
- Adous M., Queffelec P., Laguerre L. Coaxial/cylindrical transition line for broadband permittivity measurement of civil engineering materials //Measurement Science and Technology. – 2006. – Т. 17. – №. 8. – С. 2241.
- Guihard V. et al. Permittivity measurement of cementitious materials with an open-ended coaxial probe //Construction and Building Materials. – 2020. – Т. 230. – С. 116946.
- Effect of Salinity on the Dielectric Properties of Geological Materials: Implication for Soil Moisture Detection by Means of Radar Remote Sensing
- Venkatesh M. S., Raghavan G. S. V. An overview of dielectric properties measuring techniques //Canadian biosystems engineering. – 2005. – Т. 47. – №. 7. – С. 15-30.