

Моделирование диэлектрических свойств горных пород, содержащих рудные минералы

О.Н. Полякова¹, В.В. Тихонов², А.Л. Дзарданов¹,
Д.А. Боярский², Г.Н. Гольцман¹

¹Московский педагогический государственный университет, Физический факультет
E-mail: ariya78@mail.ru

²Институт космических исследований РАН
E-mail: vtikhonov@asp.iki.rssi.ru

В данной работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований взаимодействия микроволнового излучения с горными породами, содержащими медную руду. Рассмотрена рефракционная модель эффективной диэлектрической проницаемости многокомпонентной среды для описания диэлектрических свойств горной породы, содержащей рудные минералы. Приведены экспериментальные и теоретические зависимости отражательной способности «богатых» и «бедных» образцов медной руды в диапазоне частот 12-38 ГГц.

Ключевые слова: отражательная способность, эффективная диэлектрическая проницаемость, рефракционная модель, горная порода.

Введение

Исследования взаимодействия электромагнитных волн микроволнового диапазона с горными породами, содержащими рудные минералы, могут найти широкое практическое применение в поисковой геологии. Моделирование диэлектрических свойств горных пород позволит приступить к созданию методик дистанционного обнаружения месторождений металлических руд, выходящих на поверхность Земли или других планет.

Составной частью горных пород и руд являются минералы, отличающиеся друг от друга по химическому составу и физическим свойствам (цвету, блеску, твердости, диэлектрической проницаемости и т.д.) [1, 2]. Горные породы, содержащие рудные минералы, или руды, представляют собой минеральные образования, содержащие соединения полезных компонентов (минералов, металлов) в концентрациях, делающих извлечение этих минералов экономически целесообразным [1, 3]. До настоящего времени, диэлектрические характеристики многих рудных минералов в микроволновом диапазоне были изучены крайне слабо [4]. Отсутствие этих значений создавало проблему при интерпретации данных дистанционного зондирования [5].

В [6-8] нами были представлены результаты исследований диэлектрических свойств основных рудных и нерудных минералов в микроволновом диапазоне. Исследовались следующие минералы: халькопирит ($CuFeS_2$; медный колчедан), сфалерит (ZnS ; цинковая обманка), магнетит (Fe_3O_4 ; магнитный железняк), гематит (Fe_2O_3 ; железный блеск), пирит (FeS_2 ; железный или серный колчедан), ильменит ($FeTiO_3$; титанистый железняк) и типичный представитель несущей породы лабрадор (изоморфная смесь альбита $Na[AlSi_3O_8]$ и анортита $Ca[Al_2Si_2O_8]$). Магнетит, гематит, сфалерит, халькопирит, пирит и ильменит являются основными рудами при добыче железа, цинка, меди, серы и титана. Была предложена методика определения комплексной диэлектрической проницаемости этих минералов. Методика основана на измерении частотных зависимостей отражательной R и пропускательной T способности плоскопараллельных образцов минералов, и нахождении из этих зависимостей действительной и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$ среды. В результате этих исследований были

получены аппроксимационные выражения для расчета комплексной диэлектрической проницаемости минералов в диапазоне частот 10-300 ГГц [6-8].

Данная работа посвящена исследованию отражательных характеристик медных руд в диапазоне частот 12-38 ГГц, а также моделированию диэлектрических свойств горной породы, содержащей рудные минералы.

Экспериментальная установка и методика измерений

В ходе работы исследовались плоскопараллельные образцы медной руды, предоставленные компанией ООО «ТЕХНОРОС» г. Красноярск с месторождений «Северное» и «Котсель Ваара» Мурманской области. Полезной компонентой этой руды являлся минерал халькопирит. Помимо халькопирита, в состав образцов входили сопутствующие рудные минералы - магнетит, сфалерит, пирит, гематит и ильменит; а также нерудные минералы - различные силикаты (полевые шпаты, плагиоклазы, каолинит, пироксены) и кварц. В зависимости от объемного содержания халькопирита, образцы разделялись на «богатые» (содержание халькопирита >1%) и «бедные» (содержание халькопирита ≤1%).

В диапазоне 12-38 ГГц частотные зависимости отражательной R способности плоскопараллельных образцов медной руды измерялись стандартной методикой на панорамном измерителе коэффициента стоячей волны (КСВН) и ослабления, типа: P2-65 (диапазон 25-38 ГГц), P2-66 (диапазон 17-26 ГГц), P2-67 (диапазон 12-17 ГГц) [7, 8].

Для проведения измерений образцы руды изготавливались под волноводную ячейку №1 размерами (11,5x5,5) мм в диапазоне 17-26 ГГц и ячейку №2 размерами (16x8) мм в диапазоне частот 12-17 ГГц, для диапазона частот 25-38 ГГц использовался волноводный переход с ячейки №1 на волновод размерами (8x4) мм.

Пропускательную способность образцов измерить не удавалось, поскольку образцы были достаточно толстыми и хорошо поглощали электромагнитное излучение. Необходимо отметить, что экспериментальная установка позволяла измерять значения T по мощности до 10^{-4} [7, 8].

Погрешность измерений отражательной способности составляла не более 5%.

Проведенные измерения показали, что отражательная способность образцов имела ярко выраженную частотную зависимость. При увеличении содержания рудных минералов в горной породе отражательная способность, в зависимости от частоты излучения, возрастала от 0.2 для пустой породы до 0.9 для практически чистых рудных минералов.

Постановка и решение задачи

Для теоретического расчета отражательной способности медной руды была рассмотрена следующая задача.

Пусть на плоскопараллельный слой вещества толщиной h и комплексным показателем преломления $n = n' + in''$, находящийся в вакууме, под углом $\theta = 0^\circ$, падает плоская электромагнитная волна с интенсивностью I_0 - рис.1. Тогда интенсивность излучения: отраженного от слоя I_R , будет определяться следующим соотношением [9]:

$$I_R = RI_0. \quad (1)$$

В свою очередь, R связана с коэффициентом отражения r следующим образом [9]:

$$R = |r|^2, \quad r = \frac{r_{12} - r_{12}e^{2i\beta}}{1 - r_{12}^2e^{2i\beta}}, \quad (2)$$

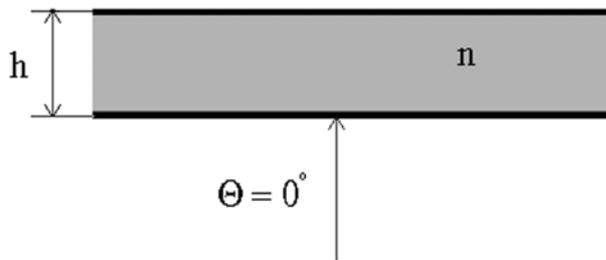


Рис. 1. Схема задачи

где: $r_{12} = \frac{1-n}{1+n}$ - коэффициент

отражения от границы раздела вакуум-вещество, $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}nh$, λ - длина волны

излучения, h - толщина слоя. Комплексный показатель преломления вещества можно связать с комплексной диэлектрической проницаемостью известными выражениями:

$$n' = \text{Re}(\sqrt{\varepsilon}), \quad n'' = \text{Im}(\sqrt{\varepsilon}). \quad (3)$$

Для расчета комплексной диэлектрической проницаемости была использована рефракционная модель эффективной диэлектрической проницаемости многокомпонентной среды, которая успешно используется для описания диэлектрических свойств почв и грунтов в СВЧ диапазоне [10]. Согласно этой модели, эффективная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{\text{эф}} = \varepsilon'_{\text{эф}} + i\varepsilon''_{\text{эф}}$ горной породы запишется в виде [10]:

$$\sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}} = \sum_{j=1}^n V_j \sqrt{\varepsilon_j} \quad (4)$$

где V_j, ε_j - объемное содержание и комплексная диэлектрическая проницаемость компонент горной породы (воздуха и минералов), n - количество компонент слагающих породу.

Сравнение теоретических расчетов с экспериментальными результатами

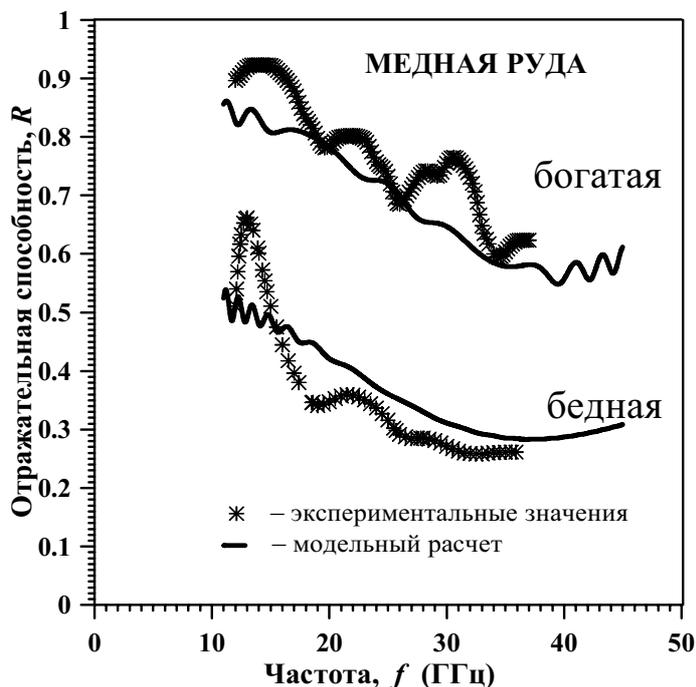


Рис. 2. Частотные зависимости отражательной способности образцов медной руды

Расчет отражательной способности слоя горной породы, из выражений (2-4), проводился для различных объемных содержаний в среде рудных и нерудных минералов. Сопоставление теоретических и экспериментальных зависимостей показало их хорошее качественное и неплохое количественное соответствие. Расчетные и экспериментальные частотные зависимости отражательной способности для двух образцов медной руды представлены на рисунке 2. На рисунке 2 приведены экспериментальные и теоретические частотные зависимости отражательной способности двух образцов медной руды - «богатой» и «бедной». «Богатый» образец состоял практически из одних рудных минералов (99%): халькопирит - 20%; пирит - 69%; магнетит 10%. В «бедном» образце присутствовало 16% рудных минералов (пирит - 15%, халькопирит - 1%), а также 83% пустой породы - лабрадора. Неполное совпадение расчетов с экспериментальными результатами связа-

но с тем, что исследуемые образцы медной руды представляют собой сложную дисперсную среду, в которой имеются границы раздела между минералами и на этих границах происходит переотражение излучения, которые в модельных расчетах не учитывались.

Заключение

Проведенные исследования и полученные результаты показали пригодность предложенной рефракционной модели эффективной диэлектрической проницаемости для моделирования диэлектрических свойств горных пород, содержащих рудные минералы.

Авторы высказывают искреннюю признательность компаниям ООО «ТЕХНОРОС» и ООО «РАДОС» (г. Красноярск) за предоставленные образцы минералов.

Литература

1. Бетехтин А.Г. Курс минералогии. М.: Книжный дом Университет, 2008. 736 с.
2. Бати Х., Принг А. Минералогия для студентов. М.: Мир, 2001. 432 с.
3. Ананьев В.П., Потапов А.Д. Основы геологии, минералогии и петрографии. М.: Высшая школа, 2005. 400 с.
4. Справочник физических констант горных пород / Под ред. С. Кларка. М.: Мир, 1969. 544 с.
5. Яковлев О.И. Космическая радиофизика. М.: Науч. книга, 1998. 432 с.
6. Полякова О.Н., Тихонов В.В., Мельников А.П., Боярский Д.А. Экспериментальные исследования диэлектрических свойств рудных минералов в микроволновом диапазоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научных статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2007. Вып. 4. Т. II. С. 147-155.
7. Полякова О.Н., Тихонов В.В., Дзарданов А.Л., Боярский Д.А., Гольцман Г.Н. Определение диэлектрические характеристики рудных минералов в диапазоне частот 10 - 40 ГГц. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научных статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2008. Вып. 5. Т. I. С.379-385.
8. Полякова О.Н., Тихонов В.В., Дзарданов А.Л., Боярский Д.А., Гольцман Г.Н. Диэлектрические характеристики рудных минералов в диапазоне частот 10-40 GHz. // Письма в ЖТФ, 2008. Т. 34. Вып. 22. С. 36-43.
9. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
10. Шутко А.М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. 192 с.

Modeling of dielectric properties of the rocks containing ore minerals

O.N. Polyakova ¹, V.V. Tikhonov ², A.L. Dzardanov ¹, D.A. Boyarskii ², G.N. Gol'tsman ¹

¹*Moscow State Pedagogical University, Department of Physics*

E-mail: ariya78@mail.ru

²*Space Research Institute Russian Academy of Sciences*

E-mail: vtikhonov@asp.iki.rssi.ru

In the given work results of experimental and theoretical researches of interaction of microwave radiation with the rocks containing copper ore are submitted. It is considered refractive model of permittivity of the multicomponent environment for the description of dielectric properties of the rock containing ore minerals. Experimental and theoretical dependences of reflection power of rich copper ore and base copper ore in a range of frequencies of 10-40 GHz are resulted.

Keywords: reflection power, permittivity, refractive model, rocks.