

# Определение диэлектрические характеристики рудных минералов в диапазоне частот 10-40 ГГц

О.Н. Полякова<sup>1</sup>, В.В. Тихонов<sup>2</sup>, А.Л. Дзарданов<sup>1</sup>,  
Д.А. Боярский<sup>2</sup>, Г.Н. Гольцман<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский педагогический государственный университет  
119992, Москва, ГСП-2, ул. М. Пироговская, 29  
E-mail: [ariya78@mail.ru](mailto:ariya78@mail.ru)

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН  
117997 Москва, Профсоюзная, 84/32  
E-mail: [vtikhonov@asp.iki.rssi.ru](mailto:vtikhonov@asp.iki.rssi.ru)

В докладе рассмотрен метод исследования комплексной диэлектрической проницаемости рудных и нерудных минералов в диапазоне частот 10 – 40 ГГц. Предложен метод расчета комплексной диэлектрической проницаемости, из экспериментальных частотных зависимостей отражательной и пропускательной способности плоскопараллельной пластинки минерала. Приведены аппроксимационные выражения для расчета комплексной диэлектрической проницаемости исследуемых минералов.

## Введение

Дистанционные методы исследования поверхности Земли и планет находят практическое применение в разнообразных областях хозяйствования и научных исследований. В последнее время, аэрокосмическое зондирование широко используется в поисковой и инженерной геологии: поиск полезных ископаемых, строительных материалов, исследование состояния дамб и т.п. Основной проблемой, препятствующей развитию этого направления, является недостаточная исследованность диэлектрических характеристик породообразующих минералов, и в первую очередь, рудных минералов [1, 2].

Прямых методов определения комплексной диэлектрической проницаемости не существует. Комплексная диэлектрическая проницаемость может быть определена из экспериментально полученных данных, таких как, коэффициент отражения и пропускания [3], тангенс угла потерь, угол Брюстера [4], и др. путем привлечения соответствующей теории. Известно большое разнообразие методов и приборов для косвенного определения комплексной диэлектрической проницаемости твердых, жидких и сыпучих сред в СВЧ диапазоне. Это резонансные, волноводные и квазиоптические методы [5]. Каждым из этих методов исследуются в основном однородные материалы и, как правило, диэлектрики.

## Экспериментальная установка и методика измерений

В ходе работы исследовались следующие минералы: сфалерит (цинковая обманка)  $ZnS$  ( $Zn$  – 67,1%), магнетит (магнитный железняк) ( $Fe_3O_4$  ( $Fe$  – 72,4%)) и типичный представитель несущей породы лабрадор – изоморфная смесь альбита  $Na[AlSi_3O_8]$  и анортита  $Ca[Al_2Si_2O_8]$  [6, 7]. Магнетит, сфалерит, – рудные минералы и являются основной рудой при добыче железа, цинка и меди, соответственно. Лабрадор относится к классу силикатов, группе полевых шпатов, серии плагиоклазов. Вследствие того, что в лабрадоре содержится большое количество металла, он должен так же сильно поглощать электромагнитное излучение, как и рудные минералы.

В работе исследовались минералы со средним размером образцов  $20 \times 20 \times 20$  мм<sup>3</sup>. У данных минералов, кристаллы таких размеров в природе практически не встречаются [7, 8]. Образцы минералов не являлись мономинеральными кристаллами, а представляли собой сростки кристаллов одного минерала. Количество примесей, в основном нерудных минералов, составляло не более 10%.

Частотные зависимости отражательной  $R$  и пропускательной  $T$  способности плоскопараллельных пластинок минералов измерялись стандартной методикой на панорамном измерителе коэффициента стоячей волны (КСВН) и ослабления, типа: P2-65 (диапазон частот 25-38 ГГц), P2-66 (диапазон частот 17-26 ГГц), P2 - 67 (диапазон частот 12-17 ГГц). Поскольку в работе исследовались минералы в виде куба с длиной ребра 20 мм, то для них была изготовлена измерительная ячейка под размер минерала и волноводные переходы со стандартного волновода на данную ячейку.

Структурная схема экспериментальной установки для измерения коэффициента стоячей волны (КСВН) приведена на рис. 1.

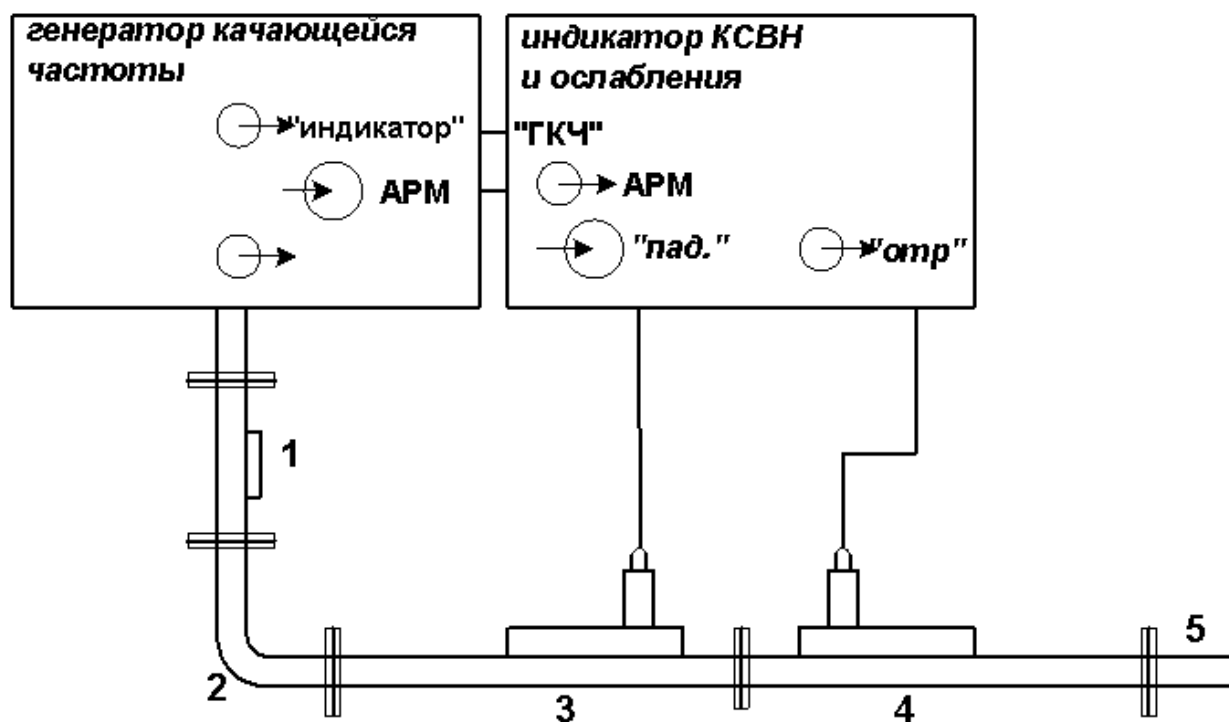


Рис. 1. Схема экспериментальной установки панорамного измерителя КСВН и ослабления. 1 – аттенюатор, 2 – переход, 3 – направленный ответвитель падающей волны (НО 1), 4 – направленный ответвитель отраженной волны (НО 2), 5 – измеряемый объект (согласованная нагрузка)

В основу построения структурной схемы панорамных измерителей положен принцип отдельного выделения и непосредственного детектирования сигналов падающей и отраженной волны. Сигнал, пропорциональный мощности волны, падающей на исследуемый образец, выделяется направленным ответвителем падающей волны (НО 1). Сигнал, отраженный от исследуемого образца, выделяется направленным ответвителем отраженной волны (НО 2). По шкальному устройству производится непосредственный отсчет КСВН и ослабления в децибелах.

При измерении ослабления волноводная секция с исследуемым образцом включалась между НО 1 и НО 2 для измерения на «проход».

Из экспериментально полученных значений КСВН и ослабления по известным формулам [9] рассчитывалась отражательная  $R$  и пропускательная  $T$  способность.

В эксперименте удавалось измерять значения  $T$  до  $10^{-4}$ .

На рис.2 представлены экспериментальные значения частотных зависимостей отражательной и пропускательной способности сфалерита и магнетита.

Отражательная и пропускательная способность образцов во всем исследуемом диапазоне

имели ярко выраженную периодическую зависимость. Средняя величина  $R$  варьировалась от 0.23 у лабрадора, до 0.7 у магнетита. Средняя величина  $T$  варьировалась от  $5 \times 10^{-3}$  у магнетита до 0,19 у лабрадора. Погрешность измерений отражательной способности и пропускательной способности на панорамном измерителе КСВН и ослабления составляла не более 5%.

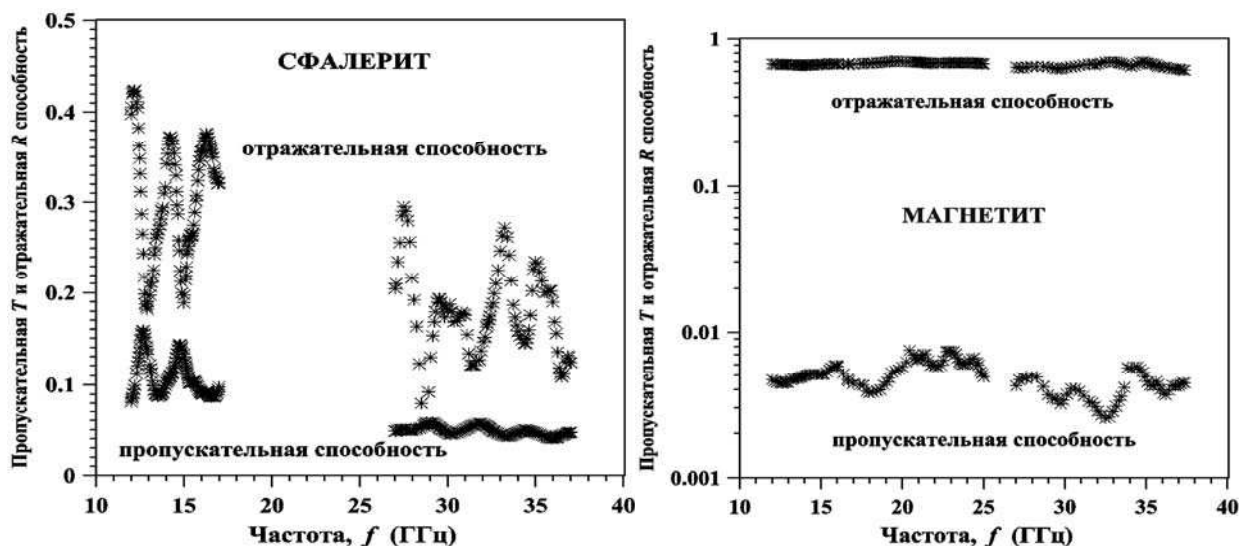


Рис. 2. Экспериментальные значения частотных зависимостей отражательной и пропускательной способности образцов минералов: а – сфалерита, б – магнетита

### Определение диэлектрических характеристик минералов из спектральных зависимостей отражательной и пропускательной способности

Для определения действительной  $\epsilon'$  и мнимой  $\epsilon''$  части комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$  минералов из полученных экспериментальных значений  $R$  и  $T$  плоскопараллельных образцов, была рассмотрена следующая задача.

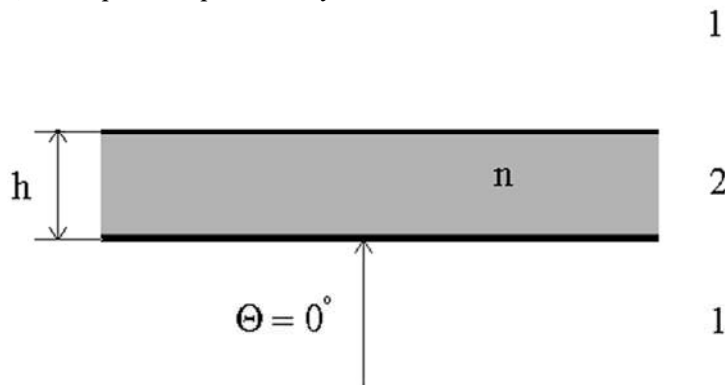


Рис. 3. Схема задачи

Пусть на плоскопараллельный слой вещества (среда 2) толщиной  $h$  и комплексным показателем преломления  $n$ , находящийся в вакууме (среда 1), под углом  $\theta = 0^\circ$ , падает плоская электромагнитная волна с интенсивностью  $I_0$  - рис. 3. Тогда интенсивность излучения: отраженного от слоя  $I_R$ , и прошедшего сквозь слой  $I_T$ , будет определяться следующими соотношениями [10]:

$$I_R = RI_0, \quad I_T = TI_0. \quad (1)$$

В свою очередь,  $R$  и  $T$  связаны с коэффициентами отражения  $r$  и пропускания  $t$  следующим образом [10]:

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

где:  $r_{12} = \frac{1-n}{1+n}$  - коэффициент отражения от границы раздела вакуум-вещество,  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}nh$ ,  $\lambda$  - длина

волны излучения,  $h$  - толщина слоя,  $n = n' + in''$  - комплексный показатель преломления вещества, который можно связать с комплексной диэлектрической проницаемостью известными выражениями:

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

Для определения  $n'$  и  $n''$  или  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  вещества необходимо решить систему уравнений (2). Эта система уравнений не поддается аналитическому решению, она решается численными методами с использованием различных алгоритмов.

Если поглощение в слое значительно и  $T \rightarrow 0$ , как это было у магнетита (см. рис. 2 б), то можно пренебречь влиянием многолучевой интерференции [10]. Уравнения (2), в этом случае, существенно упростятся: отражательная способность слоя будет почти равна отражательной способности бесконечно толстого слоя, а пропускательная способность будет экспоненциально спадать с уменьшением длины волны излучения [10]:

$$R \approx |r_{12}|^2, \\ T \approx |1 - r_{12}^2|^2 e^{-4\delta n''}, \quad (4)$$

где  $\delta = \frac{2\pi}{\lambda}h$ . Данная задача подробно рассмотрена в работе [11].

Значения  $n'$  и  $n''$  минералов определялись из (2) или (4) путем минимизации целевой функции, имеющей следующий вид:

$$F(n', n'') = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \frac{(P_T(n', n'', f_k) - P_{\ominus}(f_k))^2}{P_{\ominus}^2(f_k)}. \quad (5)$$

Эта функция представляет собой квадрат среднеквадратичного отклонения теоретической зависимости  $R$  и  $T$  от экспериментальных в диапазоне частот  $\Delta f$ , в котором  $n'$  и  $n''$  слоя можно считать постоянными ( $\sim 1$  ГГц). В выражении (5):  $P_T(n', n'', f_k)$  - теоретически рассчитанное из (2) или (4) значение  $R$  и  $T$ , при заданных параметрах оптимизации  $n'$ ,  $n''$  на частоте излучения  $f_k$ ;  $P_{\ominus}(f_k)$  - усредненные экспериментальные значения  $R$  и  $T$ , при той же частоте излучения;  $M$  - количество экспериментальных точек в интервале частот  $\Delta f$ . Для минимизации целевой функции был применен метод Розенброка [12]. Этот метод представляет собой типичный метод поиска, в котором направления минимизации полностью определяются на основании последовательных вычислений целевой функции. Метод Розенброка был успешно применен авторами при определении структурных параметров сухих нефтеносных песчаников [13].

Найденные значения  $n'$  и  $n''$  были аппроксимированы гладкими функциями от частоты излучения (рис. 4), которые могут быть использованы для вычисления комплексной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$ , или комплексного коэффициента преломления  $n = n' + in''$  минералов в диапазоне частот 10 – 40 ГГц.

Ниже представлены аппроксимационные выражения для расчета  $n'$  и  $n''$  в диапазоне частот 10 – 40 ГГц для следующих минералов:

сфалерит:

$$n' = 3.401400738 + 0.007632376688 \times f - 0.0008962616894 \times f^2, \\ n'' = 0.1619177432 \times \exp(-0.01272132559 \times f); \quad (6a)$$

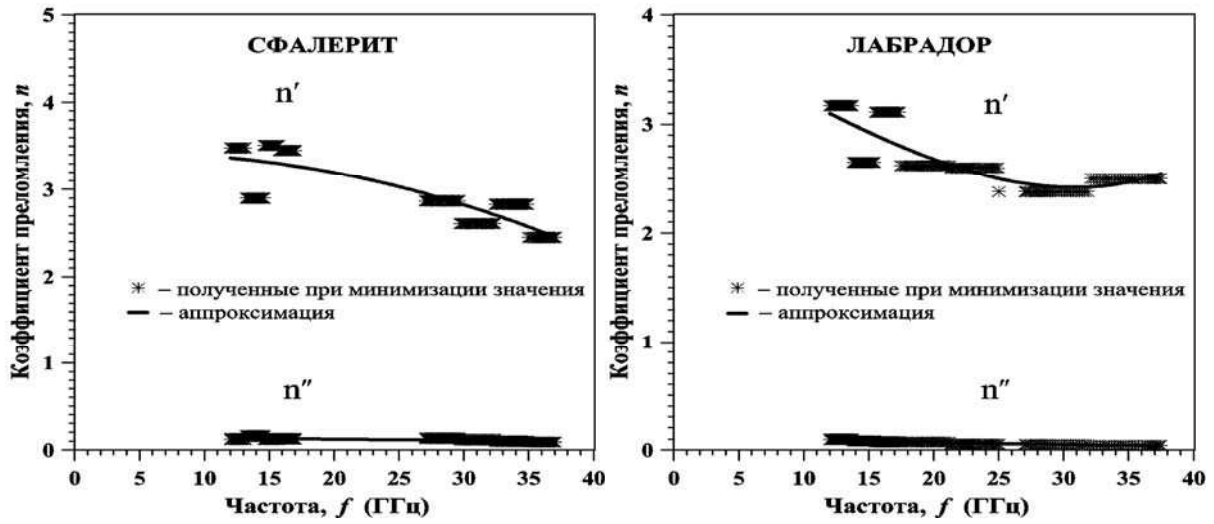


Рис. 4. Частотные зависимости действительной  $n'$  и мнимой  $n''$  части показателя преломления сфалерита (а) и лабрадора (б)

лабрадор:

$$\begin{aligned} n' &= 3.816469517 - 0.0551132433 \times f - 0.0008430252018 \times f^2 + 3.765400641 \times 10^{-5} \times f^3, \\ n'' &= 0.1372112434 \times \exp(-0.03359536575 \times f); \end{aligned} \quad (6б)$$

магнетит:

$$\begin{aligned} n' &= 7.792675767 + 0.2432845855 \times f - 0.005616219296 \times f^2, \\ n'' &= 0.3015038712 - 0.01882945266 \times f + 0.0005043557748 \times f^2 - 4.736831848 \times 10^{-6} \times f^3. \end{aligned} \quad (6в)$$

В выражениях (6),  $f$  – частота излучения, выраженная в ГГц. Для определения действительной и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости, полученные значения  $n'$  и  $n''$ , необходимо подставить в следующие формулы:

$$\varepsilon' = n'^2 - n''^2, \quad \varepsilon'' = 2n'n''. \quad (7)$$

На рисунке 5 показаны рассчитанные частотные зависимости действительной и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости сфалерита для двух диапазонов: I – низкочастотного (12 – 37 ГГц), II – высокочастотного (70 – 300 ГГц). Для диапазона I,  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  вычислялись из

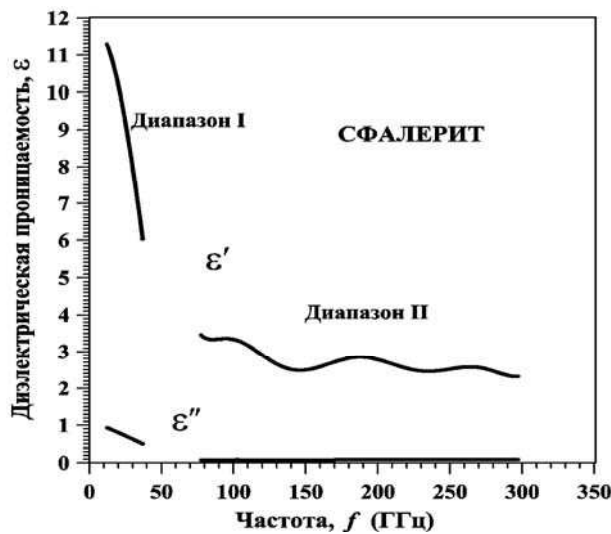


Рис. 5. Частотная зависимость действительной  $\varepsilon'$  и мнимой  $\varepsilon''$  части комплексной диэлектрической проницаемости сфалерита

выражений (6а) и (7), для диапазона II – из выражений приведенных в [11].

Из представленного рисунка видно, что два рассчитанных диапазона хорошо согласуются между собой, а зависимости, по внешнему виду, соответствуют соотношениям Крамерса – Кронига [3]. Аналогичные результаты были получены и для других минералов.

Для проверки полученных результатов, аппроксимационные выражения  $n'$  и  $n''$  минералов (6), были использованы для расчета  $R$  и  $T$  имеющихся образцов. Результаты расчета  $R$  и  $T$  для лабрадора, сфалерита и магнетита показаны на рисунках 6 и 7.

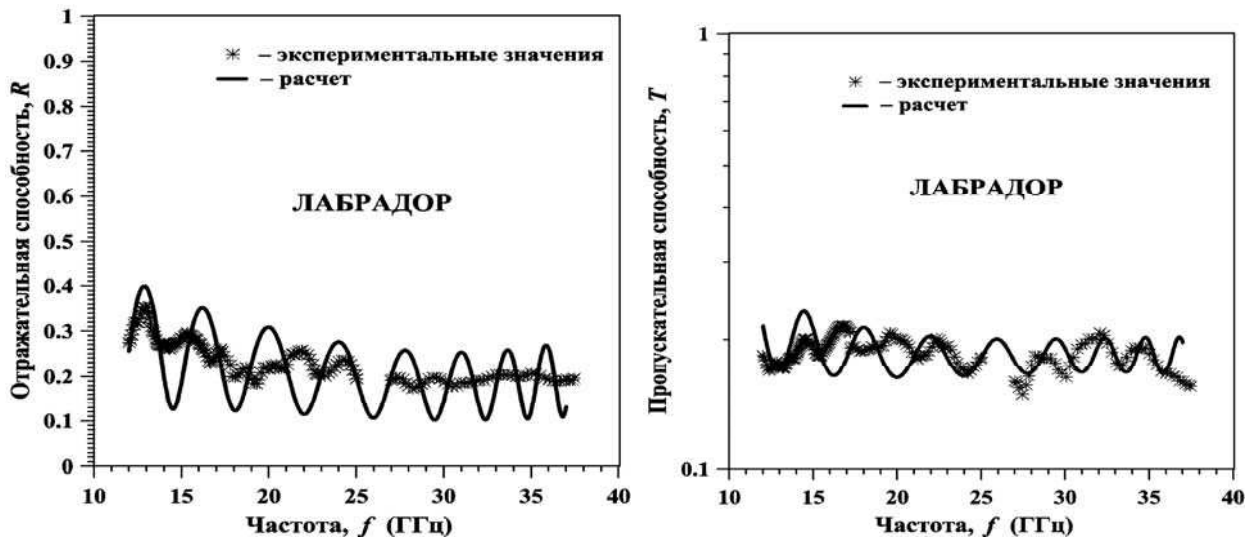


Рис. 6. Частотные зависимости отражательной (а) и пропускательной (б) способности лабрадора. Экспериментальные значения и теоретический расчет

Не полное совпадение рассчитанных частотных зависимостей  $R$  и  $T$  с экспериментальными результатами объясняется тем, что образцы не являлись однородным минералом, а представляли собой сростки кристаллов одного минерала с небольшим количеством примесей других минералов. Образцы, на самом деле представляли собой значительно более сложную среду, чем та, которая показана на рисунке 3. В первом приближении эту среду можно представить многослойной структурой. Отражательная способность такой структуры будет определяться отражением излучения от всех границ раздела. Однако, как показано в [11], учет более сложной структуры среды не приведет к существенному изменению полученных результатов.

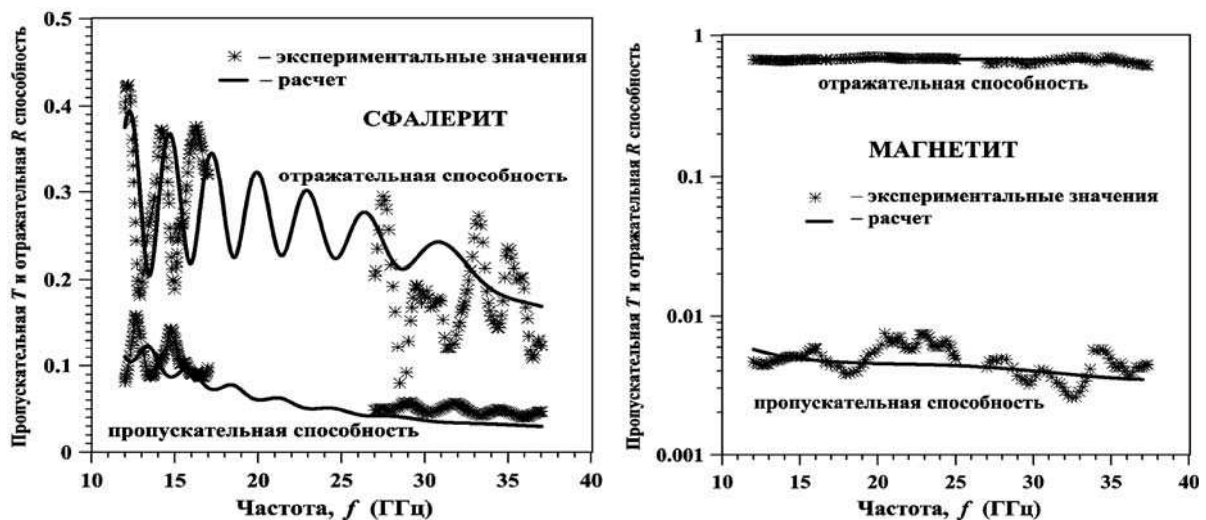


Рис. 7. Частотные зависимости отражательной и пропускательной способности сфалерита (а) и магнетита (б). Экспериментальные значения и теоретический расчет

## Заключение

Проведенные исследования и полученные результаты показали пригодность предложенной методики для определения диэлектрических характеристик рудных и нерудных минералов.

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

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 06-05-65195).

## Литература

1. Справочник физических констант горных пород. Под ред. С. Кларка. М.: Мир, 1969. 544 с.
2. Яковлев О.И. Космическая радиофизика. М.: Научная книга, 1998. 432 с.
3. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 664 с.
4. Соболев Р.Н. Методы оптического исследования минералов: Справочник. М.: Недра, 1990. 288 с.
5. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М. Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. 403 с.
6. Ананьев В.П., Потанов А.Д. Основы геологии, минералогии и петрографии. М.: Высшая школа, 2005. 400 с.
7. Батти Х., Принг А. Минералогия для студентов. М.: Мир, 2001. 432 с.
8. Петр Корбел и Милан Новак. Минералы. Иллюстрированная энциклопедия. М.: Лабиринт Пресс, 2004. 296 с.
9. Лебедев И.В. Техника и приборы сверхвысоких частот. Том 1. М.: Государственное энергетическое издательство Ленинград, 1961. 512 с.
10. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
11. 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. Сборник научных статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2007. Выпуск 4. Т. II. С.147-155.
12. Химмельблау Д.М. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 534 с.
13. Боярский Д.А., Гершензон В.Е., Гершензон Е.М., Гольцман Г.Н., Птицина Н.Г., Тихонов В.В., Чулкова Г.М. О возможности определения микроструктурных параметров нефтеносной породы по данным радиофизических измерений // Радиотехника и электроника, 1996. Т. 41. № 4. С. 441–447.