

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН



Пр-2162

**В. В. Тихонов, Д. А. Боярский, О. Н. Полякова,  
А. Л. Дзарданов, Г. Н. Гольцман**

**ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
РАДИОФИЗИЧЕСКИХ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
СВОЙСТВ МИНЕРАЛОВ И ГОРНЫХ ПОРОД  
В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ**

Представлено к печати  
зам. директора ИКИ РАН  
Р. Р. Назировым

**МОСКВА  
2011**

## Лабораторные исследования радиофизических и диэлектрических свойств минералов и горных пород в микроволновом диапазоне

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

<sup>1</sup> Учреждение Российской академии наук

Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва

<sup>2</sup> Учебно-научный радиофизический центр Московского педагогического государственного университета, Москва

В данной работе приводятся результаты лабораторных исследований радиофизических и диэлектрических свойств ряда рудных минералов, сопутствующих им нерудных минералов, а также горных пород, представляющих собой богатую и бедную медную руду. Описываются методы измерения отражательной и пропускательной способности плоскопараллельных образцов минералов и горных пород в диапазоне частот 12...145 ГГц, а также способы и результаты расчета диэлектрических характеристик минералов из полученных экспериментальных данных. Приводятся аппроксимационные выражения для расчета действительной и мнимой части комплексного показателя преломления минералов в зависимости от частоты излучения в диапазоне 12...145 ГГц. Показана возможность разделения медной руды, по отраженному от нее микроволновому излучению, на богатую и бедную. Описан, предложенный авторами, «микроволновый способ разделения руд». В ходе работы исследовались минералы, являющиеся основными рудами при добыче железа, цинка, меди и титана: магнетит, гематит, сфалерит, халькопирит, пирит и ильменит, а также нерудные минералы: лабрадор и олигоклаз.

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

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 10-05-00037), а также при частичной поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

*Ключевые слова:* минералы, горные породы, богатая и бедная руда, микроволновое излучение, отражательная способность, пропускательная способность, диэлектрические свойства, комплексный показатель преломления.

## Laboratory Studies of Radiophysical and Dielectric Properties of Minerals and Rocks in Microwave Range

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

<sup>1</sup> Space Research Institute (IKI RAN), Moscow

<sup>2</sup> Educational-Scientific Radio Physical Centre  
Moscow Pedagogical State University

The paper discusses results of laboratory studies of radiophysical and dielectric properties of a number of ore minerals, associate barren minerals and rocks rich and poor in copper. Techniques to measure the reflection power and transmission coefficient of plain-parallel samples of minerals and rocks in the frequency range of 12...145 GHz are described, as well as computation methods and results for dielectric characteristics of the minerals based on the obtained experimental data. Approximation expressions are presented for the real and imaginary parts of complex index of refraction of the minerals depending on radiation frequency in the range of 12...145 GHz. A possibility is demonstrated to distinguish between rocks rich and poor in copper based on their microwave reflection properties. Microwave technique for ores distinguish is described. Minerals that are main mining ores for iron, zinc, copper and titan are under study: magnetite, hematite, sphalerite, chalcocopyrite, pyrite and ilmenite, as well as barren minerals labradorite and oligoclase.

Authors express sincere gratitude to the companies of Open Company TECHNOROS and Open Company RADOS (Krasnoyarsk) for given samples of minerals.

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project N. 10-05-00037), and also supported partly by FTP "Scientific and scientific-pedagogical personnel of innovative Russia" for 2009–2013 years.

*Keywords:* minerals, rocks, rich and poor ore, microwave radiation, reflectivity, transmissivity, dielectric properties, complex index of refraction.

## 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, исследование состояния дамб, подземных объектов и т. п. [1–10]. Одной из проблем, препятствующих развитию этого направления, является недостаточная исследованность диэлектрических характеристик горных пород и слагающих их минералов в микроволновом диапазоне [11–17].

Помимо дистанционного зондирования, данные о диэлектрических характеристиках природных минералов могут быть полезны в таких областях как геология, сейсмология, горнодобывающая промышленность и т. п. Так, например, во многих странах мира назрела одна из масштабных проблем — истощение запасов полезных ископаемых и, в то же время, накопление огромного количества отходов горнорудной промышленности, содержащих полезные продукты [18–22]. Промышленное использование этих отходов экономически целесообразно лишь после их предварительного обогащения, т. е. комплекса процессов переработки твердого минерального сырья с целью выделения полезных продуктов. В настоящее время в горнодобывающей промышленности для покускового отбора (сепарации) используется целый ряд методов: механические, электрические, магнитные, радиометрические и т. д. [19, 23–30]. Все эти методы основаны на использовании тех или иных физических и механических свойств минералов и, как правило, в процессе обогащения руды используются комбинации этих методов. Однако каждый из методов имеет ряд существенных недостатков: нестабильность работы спектрометрического тракта за счет влияния температуры, быстрый износ рабочего

элемента рентгеновского блока, информативность по поверхности породы (рентгенорадиометрические методы) [19, 29, 31], невозможность разделения немагнитных или слабомагнитных минералов (магнитные методы) [24, 27], невозможность разделения крупных кусков минералов (более 5 мм) и минералов с близкой электропроводностью (электрические методы) [24, 27], вредность для обслуживающего персонала (радиометрические методы) [21], высокая себестоимость (большинство методов) и т.д. В связи с этим представляется перспективным исследование возможности покусковой сепарации руды с использованием методов микроволновой спектроскопии. Это обусловлено, во-первых, большей глубиной проникновения электромагнитного излучения в кусок руды (порядка нескольких длин волн), т.е. большей информативностью, во-вторых, связано с безопасностью обслуживающего персонала, так как мощность источника микроволнового излучения составляет при этом порядка  $10^{-3} \dots 10^{-2}$  Вт, что на 1–2 порядка меньше мощности излучения сотового телефона.

Составной частью горных пород являются минералы, отличающиеся друг от друга по химическому составу и физическим свойствам (цвету, блеску, твердости и т.п. [11, 17, 32–40]). С электродинамической точки зрения горные породы представляют собой сложную среду, состоящую из частиц (кристаллов, зерен) различных минералов, имеющих разные диэлектрические свойства. По своим диэлектрическим характеристикам эти минералы можно условно разделить на три группы: диэлектрики (кварц, полевые шпаты и др.), полупроводники (сульфиды, некоторые окислы) и металлы (медь, золото, платина, железо) [11, 17, 32–37, 40].

Минералы второй группы являются рудными минералами, т.е. в их составе присутствуют один или несколько металлов. Эти минералы непрозрачные, с металлическим или полуметаллическим блеском, относительно хорошо проводят тепло и электричество. Диэлектрические свойства таких минералов в микроволновом диапазоне до настоящего времени практически не исследовались [11–17].

Исследование диэлектрических свойств рудных минералов в микроволновом диапазоне является технически сложной задачей из-за сильного поглощения электромагнитного излучения в среде. Комплексная диэлектрическая проницаемость вещества не поддается прямому измерению. Действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости могут быть рассчитаны

по измеряемым величинам путем привлечения соответствующей теории [41]. Такими измеряемыми значениями могут быть коэффициент отражения и пропускания, тангенс угла потерь, угол Брюстера и др. [42–45]. В настоящее время существует большое разнообразие методов и приборов для определения комплексной диэлектрической проницаемости твердых, жидких и сыпучих сред в микроволновом диапазоне. Это резонансные, волноводные, квазиоптические и др. методы [42–46]. Каждым из этих методов исследуются в основном однородные материалы и, как правило, диэлектрики.

В настоящей работе собраны и обобщены результаты исследований радиофизических и диэлектрических свойств рудных и нерудных минералов, а также горных пород, содержащих рудные минералы, выполненных авторами в течение нескольких лет и частично опубликованных в ряде отечественных и зарубежных изданий [47–55].

## 1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

### 1.1. Характеристики образцов минералов

Для проведения лабораторных измерений были подготовлены образцы следующих минералов: магнетита (магнитный железняк)  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (Fe — 72,4 %), халькопирита (медный колчедан)  $\text{CuFeS}_2$  (Cu — 34,6 %, Fe — 30,5 %), пирита (серный или железный колчедан)  $\text{FeS}_2$  (Fe — 46,6 %), гематита (красный железняк)  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Fe — 70 %), сфалерита (цинковая обманка)  $\text{ZnS}$  (Zn — 67,1 %) и ильменита (титанистый железняк)  $\text{FeTiO}_3$  (Fe — 36,8 %, Ti — 31,6 %) [17, 33, 37, 38, 40]. Эти минералы являются основными рудами на железо (магнетит, гематит, ильменит, пирит), цинк (сфалерит), медь (халькопирит) и титан (ильменит). Все минералы имеют относительно малое удельное сопротивление на низких частотах ( $10^{-5}$ ... $10^6$  Ом·м) и считаются полупроводниками [11, 17, 32–37, 40]. Также были подготовлены образцы двух нерудных минералов, относящихся к классу силикатов, группе полевых шпатов, серии плагиоклазов: лабрадора и олигоклаза (изоморфная смесь альбита —  $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$  и анортита —  $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$  в различных концентрациях) [17, 33, 37, 38, 40]. Оба эти минерала являются типичными представителями несущей породы (породообразующими минералами) [17, 32, 37, 38]. Они имеют высокое удельное сопротивление

на низких частотах ( $10^{11} \dots 10^{12}$  Ом·м) и считаются диэлектриками [11, 17]. Эти минералы используются как ценный подолочный и облицовочный строительный материал. В частности, лабрадор был применен в отделке Мавзолея Ленина и колонн Храма Спасана-крови в Санкт-Петербурге, им облицованы многие станции

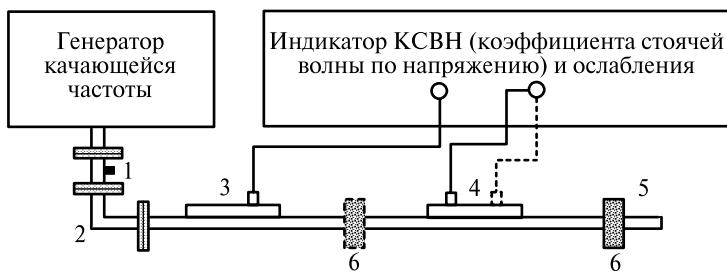


**Рис. 1.** Фотографии исследуемых минералов: *а* — магнетит; *б* — халькопирит; *в* — пирит; *г* — гематит; *д* — сфалерит; *е* — ильменит; *ж* — лабрадор; *з* — олигоклаз. Слева — образец, справа — минерал. Фотографии минералов взяты из открытых источников (<http://www.catalogmineralov.ru> и <http://www.wikipedia.org>)

Московского метрополитена. Лучшие образцы лабрадора с красивой иризацией с конца XVIII в. использовались в ювелирных изделиях. Необходимо отметить, что нам не удалось получить мономинеральные образцы нужных размеров (~1 см). Кристаллы таких размеров в природе встречаются достаточно редко и, как правило, являются музейными экспонатами [17, 38]. Исследуемые образцы представляли собой сростки нескольких кристаллов одного минерала с небольшими примесями других минералов. Для рудных минералов количество пор (мелких пустот) и примесей нерудных минералов (кварц, плагиоклазы) у каждого образца не превышало 10 %. Для нерудных минералов количество примесей рудных минералов также не превышало 10 %. На рис. 1 (см. с. 6) представлены фотографии всех исследуемых в данной работе минералов и их образцов.

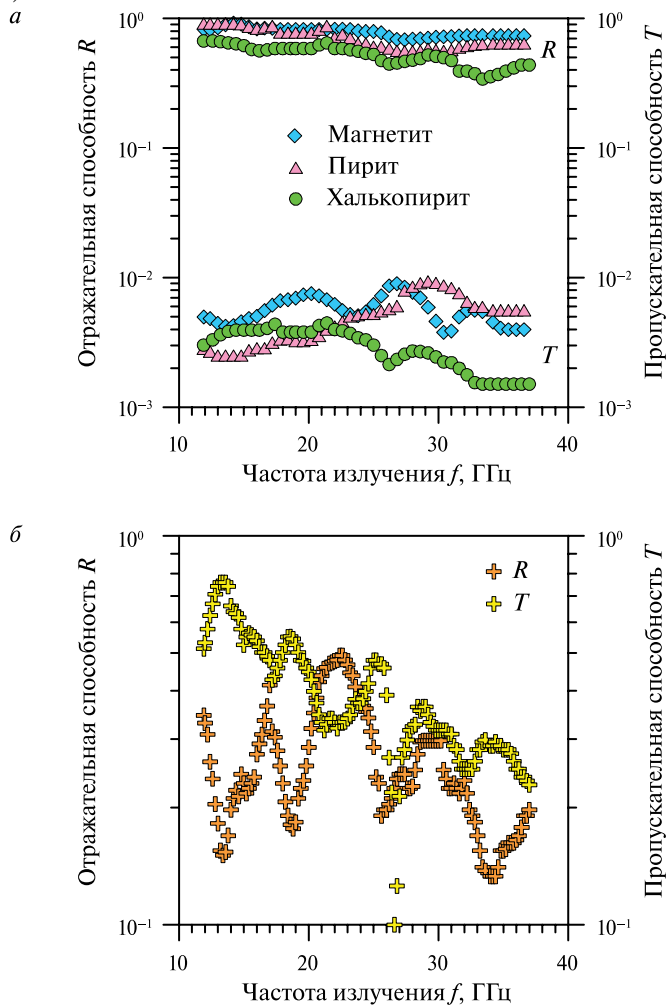
## 1.2. Диапазон частот 12...38 ГГц

Частотные зависимости отражательной  $R(f)$  и пропускательной  $T(f)$  способности плоскопараллельных образцов минералов в диапазоне частот 12...38 ГГц измерялись на панорамном измерителе коэффициента стоячей волны и ослабления [42–46]: P2-67 (диапазон частот 12...17 ГГц), P2-66 (диапазон частот 17...26 ГГц), P2-65 (диапазон частот 25...38 ГГц). Для проведения измерений образцы изготавливались под волноводную ячейку № 1 размером 11×5,5 мм (диапазон 17...26 ГГц) и ячейку № 2 размером 16×8 мм



**Рис. 2.** Схема панорамного измерителя коэффициента стоячей волны и ослабления: 1 — аттенюатор; 2 — волноводный переход; 3 — направленный ответвитель падающей волны; 4 — направленный ответвитель отраженной волны; 5 — согласованная нагрузка; 6 — образец. Пунктир — расположение элементов при измерении ослабления

(диапазон 12...17 ГГц). Для диапазона частот 25...38 ГГц использовался волноводный переход с ячейки № 1 на волновод размером  $8 \times 3,6$  мм. Схема экспериментальной установки для измерения коэффициента стоячей волны и ослабления приведена на рис. 2 (см. с. 7).



**Рис. 3.** Спектральные зависимости  $R(f)$  и  $T(f)$  в диапазоне частот 12...38 ГГц для образцов трех рудных минералов (*a*) и лабрадора (*б*). Толщина образцов (см): магнетит — 0,55; пирит — 0,48; халькопирит — 0,57; лабрадор — 0,665



В основу панорамных измерителей положен принцип раздельного выделения и непосредственного детектирования сигналов падающей и отраженной волны. При измерении отражения (см. рис. 2) сигнал, пропорциональный амплитуде напряжения волны, падающей на исследуемый образец, выделяется направленным ответвителем падающей волны. Сигнал, отраженный от исследуемого образца, выделяется направленным ответвителем отраженной волны. По шкальному устройству производится непосредственный отсчет коэффициента стоячей волны по напряжению  $\rho$ . Отражательная способность  $R$  определяется как [42–44, 46]:

$$R = \left( \frac{\rho - 1}{\rho + 1} \right)^2. \quad (1)$$

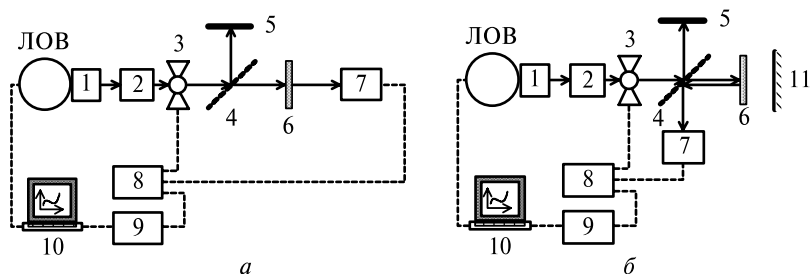
При измерении пропускания (см. рис. 2), определяется ослабление сигнала (в децибелах), прошедшего через образец, которое потом пересчитывается в пропускательную способность  $T$  [42–44, 46]. В эксперименте удавалось измерять значения  $T$  до  $10^{-4}$ . Погрешность измерений  $R$  и  $T$  не превышала 5 %.

В ходе эксперимента были получены зависимости  $R(f)$  и  $T(f)$  для трех рудных минералов: халькопирита, пирита и магнетита, а также для лабрадора (рис. 3, см. с. 8). Измерения отражательной и пропускательной способности в диапазоне частот 12...38 ГГц для других минералов не проводились. Из-за хрупкости этих минералов [17, 37, 40] не удалось подготовить необходимые образцы в соответствии с размерами волноводных ячеек.

### 1.3. Диапазон частот 77...145 ГГц

Зависимости  $R(f)$  и  $T(f)$  образцов минералов в диапазоне частот 77...145 ГГц измерялись с помощью миллиметрового спектрометра, собранного на лампах обратной волны (миллиметровый ЛОВ-спектрометр) [56]. Спектрометр состоял из генератора, измерительного квазиоптического тракта и приемного блока (рис. 4, см. с. 10).

В качестве источников монохроматического электромагнитного излучения использовались: в диапазоне частот 77...119 ГГц — генератор РГ4-14 (ЛОВ-71), а в диапазоне частот 126...145 ГГц — генератор Г4-161 (ЛОВ-76).



**Рис. 4.** Блок-схема миллиметрового ЛОВ-спектрометра: *а* — измерение  $T(f)$ ; *б* — измерение  $R(f)$ : 1 — рупор/волноводно-лучеводный переход; 2 — аттенюатор; 3 — модулятор; 4 — делитель луча; 5 — поглотитель; 6 — исследуемый образец; 7 — оптико-акустический преобразователь; 8 — синхродетектор; 9 — цифровой вольтметр; 10 — компьютер; 11 — зеркало

Измерительный квазиоптический тракт спектрометра был собран на базе лучеводов, которые обеспечивали одномодовое распространение электромагнитной волны путем поглощения остальных типов волн в диэлектрике с потерями.

Приемный блок состоял из приемника — ячейки Голя (приемный элемент оптико-акустического преобразователя), синхродетектора и цифрового вольтметра Agilent 34401 А.

Выходящее из ЛОВ монохроматическое излучение с помощью рупора (диапазон частот 77...119 ГГц) или волноводно-лучеводного перехода (диапазон частот 126...145 ГГц) поступало в измерительный тракт. Далее электромагнитное излучение модулировалось по амплитуде механическим модулятором с частотой 12,5 Гц и затем по квазиоптическому тракту подводилось к приемному блоку.

При измерении спектра пропускания образец помещался в держателе так, чтобы излучение падало на него нормально, а сам образец полностью перекрывал отверстие лучевода (см. рис. 4а). Электромагнитное излучение падало на слюдяную делительную пластину толщиной 0,03 мм. В частотном интервале 77...145 ГГц коэффициент пропускания пластины составлял 50 %. Часть излучения проходила через делительную пластину в измерительный канал, через исследуемый образец и фиксировалась приемником. Часть излучения отражалась от делительной пластины и поступала во второе плечо схемы. Там находился поглотитель, за счет которого

не возникало побочных резонансов из-за переотражения на делителе луча.

Перед началом измерений проводилась калибровка установки при отсутствии в держателе исследуемого образца. Уровень мощности падающего на приемник микроволнового излучения уменьшался калиброванным поляризационным аттенуатором, позволяющим ослаблять сигнал на 30 дБ.

Спектр пропускания  $T(f)$  записывался в два этапа. Сначала снималась частотная зависимость мощности сигнала без образца в держателе измерительного тракта  $P_1(f)$ , затем мощность сигнала при наличии образца в измерительном тракте  $P_2(f)$ . Абсолютная величина пропускательной способности образца получалась делением двух массивов чисел:

$$T(f) = \frac{P_2(f)}{P_1(f)}. \quad (2)$$

В эксперименте удавалось измерять значения  $T$  до  $10^{-7}$ .

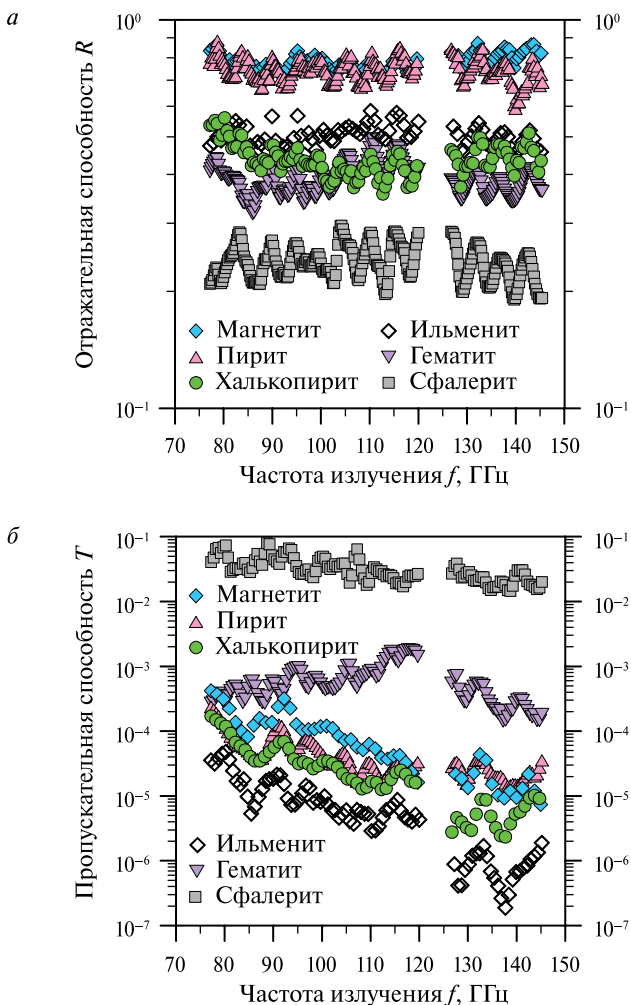
Спектр отражения  $R(f)$  также определялся в два этапа. Вначале снималась частотная зависимость мощности сигнала, отраженного от калибровочного зеркала  $P_3(f)$ , установленного в держателе на месте образца (см. рис. 4б). Сигнал отражался от делителя луча и фиксировался приемником. Затем снималась частотная зависимость мощности сигнала, отраженного от образца, установленного на месте зеркала  $P_4(f)$ . Абсолютная величина отражательной способности образца получалась делением двух соответствующих массивов чисел:

$$R(f) = \frac{P_4(f)}{P_3(f)}. \quad (3)$$

Процесс измерения на ЛОВ-спектрометре полностью автоматизирован и контролировался компьютером с помощью современного программного обеспечения. Данные с генератора и цифрового вольтметра поступали на компьютер и обрабатывались программой, написанной в среде программирования Lab VIEW.

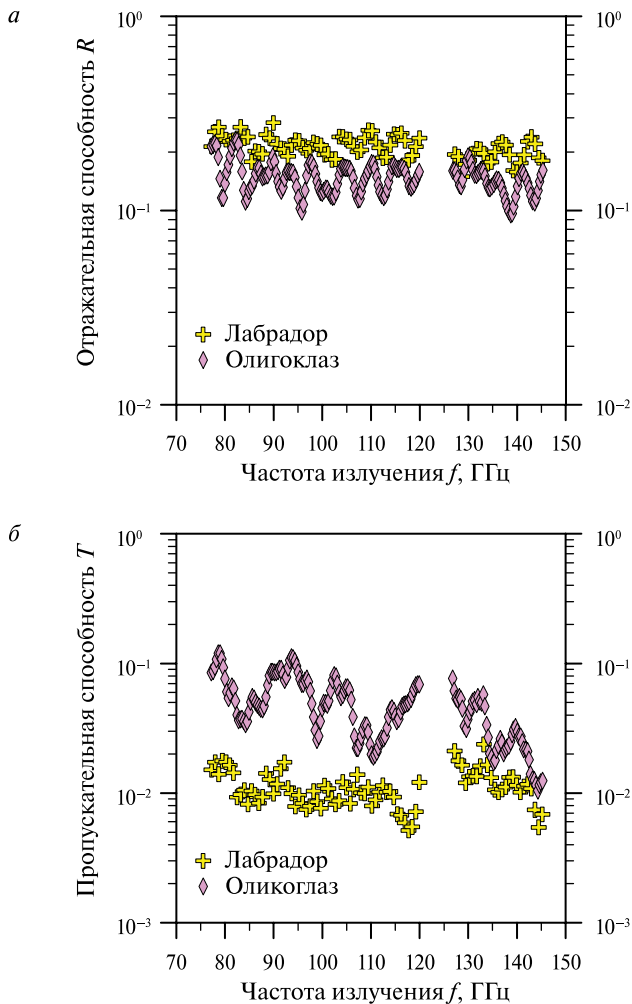
Основные параметры спектрометра, используемого в эксперименте: мощность рабочего излучения — 4...6 мВт; относительное частотное разрешение —  $\Delta\nu/\nu \approx 10^{-4}$ ; отношение сигнал/шум —  $10^4 \dots 10^6$ ; эквивалентная мощность шума (NEP) —  $1 \cdot 10^{-10}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>; динамический диапазон — не менее 60 дБ; вольтваттная чувствительность —  $1,5 \cdot 10^5$  В/Вт; степень поляризации

рабочего излучения — 99,99%; рабочая температура — 300 К. Время записи спектра, содержащего 100 точек (амплитудный спектр  $T(f)$  или  $R(f)$ ), — 100 с. Погрешность измерений составляла не более 3 %.



**Рис. 5.** Спектральные зависимости  $R(f)$  (а) и  $T(f)$  (б) в диапазоне частот 77...145 ГГц для образцов рудных минералов. Толщина образцов (см): магнетит — 1,283; пирит — 1,275; халькопирит — 1,33; ильменит — 2,01; гематит — 1,98; сфалерит — 1,963

Результаты спектральных измерений  $R(f)$  и  $T(f)$  всех исследуемых минеральных образцов представлены на рис. 5 (см. с. 12) и 6.



**Рис. 6.** Спектральные зависимости  $R(f)$  (а) и  $T(f)$  (б) в диапазоне частот 77...145 ГГц для образцов нерудных минералов. Толщина образцов (см): лабрадор — 1,28; олигоглаз — 1,32

## 2. РАСЧЕТ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для определения действительной  $\varepsilon'$  и мнимой  $\varepsilon''$  части комплексной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$ ) минералов из экспериментальных спектральных зависимостей  $R(f)$  и  $T(f)$  была рассмотрена следующая задача (рис. 7): на плоскопараллельный слой вещества (среда 2), находящийся в вакууме (среда 1), под углом  $\theta = 0^\circ$ , падает плоская электромагнитная волна с интенсивностью  $I_0$ . Слой имеет толщину  $h$  и комплексный показатель преломления  $n = n' + in''$ . Интенсивности излучения  $I_R$  и  $I_T$ , отраженного от слоя и прошедшего сквозь слой, с учетом многократного отражения от границ будут определяться следующими соотношениями [57]:

$$I_R = RI_0, \quad I_T = TI_0, \quad (4)$$

где  $R$  и  $T$  — отражательная и пропускательная способность, которая связана с коэффициентами отражения  $r$  и пропускания  $t$  следующим образом [57]:

$$R = |r|^2, \quad T = |t|^2, \quad (5)$$

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

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. Действи-

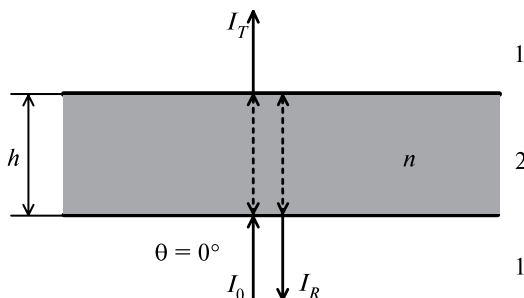


Рис. 7. Схема задачи

тельная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости связана с действительной и мнимой частями комплексного показателя преломления следующими соотношениями:

$$\varepsilon' = n'^2 - n''^2, \quad \varepsilon'' = 2n'n'' . \quad (6)$$

Для определения  $n'$  и  $n''$  вещества необходимо решить систему уравнений (5). Эта система уравнений не поддается аналитическому решению и решается численными методами. Каждый диапазон, в котором были получены зависимости  $R(f)$  и  $T(f)$  минералов (12...38 и 77...145 ГГц), был разбит на одинаковые небольшие частотные интервалы шириной  $\Delta f$ . Предполагалось, что в частотном интервале  $\Delta f$  действительная и мнимая части комплексного показателя преломления минерала остаются постоянными. В каждом интервале частот  $\Delta f$ , путем минимизации целевой функции  $F(n', n'')$  определялись значения  $n'$  и  $n''$ . Целевая функция

$$F(n', n'') = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \left( \frac{(R_t(n', n'', f_k) - R_e(f_k))^2}{R_e^2(f_k)} + \frac{(T_t(n', n'', f_k) - T_e(f_k))^2}{T_e^2(f_k)} \right) \quad (7)$$

представляла собой сумму квадратов коэффициентов вариации теоретических зависимостей отражательной и пропускательной способности в интервале частот  $\Delta f$ . В выражении (7):  $f_k$  — частота излучения в интервале  $\Delta f$ ;  $R_t(n', n'', f_k)$  и  $T_t(n', n'', f_k)$  — теоретически рассчитанные из (5) значения отражательной и пропускательной способности при заданных параметрах оптимизации  $n'$  и  $n''$  на частоте излучения  $f_k$ ;  $R_e(f_k)$  и  $T_e(f_k)$  — экспериментальные значения отражательной и пропускательной способности при той же частоте излучения;  $M$  — количество экспериментальных точек в интервале частот  $\Delta f$ .

Для минимизации целевой функции был применен метод Розенброка [58]. 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 песчаников [59, 60].

Алгоритм вычислений имел следующий вид:

1. Задавались разумные ограничения на  $n'$  и  $n''$ :  $1 < n' \leq 50$ ,  $n'' > 0$ .

2. Для диапазона 12...38 ГГц выбирался интервал  $\Delta f = 2$  ГГц, для диапазона 77...145 ГГц —  $\Delta f = 5$  ГГц. На каждом участке  $\Delta f$  задавалось значение  $n'$  с шагом 0,01 от 1 до 50. При этих значениях минимизировалась целевая функция (7) и определялось значение  $n''$ .
3. С помощью полученного массива  $n'$  и  $n''$ , на интервале  $\Delta f$ , из (5) определялись теоретические  $R$  и  $T$ , которые сравнивались с экспериментальными  $R$  и  $T$ . Наилучшее совпадение теоретических и экспериментальных  $R$  и  $T$  давало конечные величины  $n'$  и  $n''$ .

Найденные значения  $n'$  и  $n''$  аппроксимировались гладкими функциями от частоты излучения. Ниже приведены полученные аппроксимационные выражения  $n'$  и  $n''$  для всех исследованных минералов:

*магнетит, диапазон 12...145 ГГц*

$$\begin{aligned}
 n' &= 32,02744215 - 0,5259548602f - 0,06491391718f^2 + \\
 &+ 3,608474987 \cdot 10^{-3} f^3 - 7,125902056 \cdot 10^{-5} f^4 + 6,751320507 \cdot 10^{-7} f^5 - \\
 &- 3,113051295 \cdot 10^{-9} f^6 + 5,632545142 \cdot 10^{-12} f^7, \\
 n'' &= 2,520151324 - 0,3127286757f + 0,01875754576f^2 - \\
 &- 5,916173864 \cdot 10^{-4} f^3 + 1,067064015 \cdot 10^{-5} f^4 - \\
 &- 1,144566958 \cdot 10^{-7} f^5 + 7,234628417 \cdot 10^{-10} f^6 - \\
 &- 2,491158837 \cdot 10^{-12} f^7 + 3,606967497 \cdot 10^{-15} f^8;
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

*пирит, диапазон 12...145 ГГц*

$$\begin{aligned}
 n' &= 45,10123824 + 0,4750837566f - 0,2770431487f^2 + \\
 &+ 1,360410159 \cdot 10^{-2} f^3 - 2,920310577 \cdot 10^{-4} f^4 + 3,327239518 \cdot 10^{-6} f^5 - \\
 &- 2,093060363 \cdot 10^{-8} f^6 + 6,862839841 \cdot 10^{-11} f^7 - 9,151452873 \cdot 10^{-14} f^8, \\
 n'' &= 0,7031046195 + 1,990480306 \times 10^{-2} f - 1,619627954 \cdot 10^{-3} f^2 + \\
 &+ 3,351891491 \cdot 10^{-5} f^3 - 3,167624788 \cdot 10^{-7} f^4 + 1,430090796 \cdot 10^{-9} f^5 - \\
 &- 2,501858921 \cdot 10^{-12} f^6;
 \end{aligned}
 \tag{9}$$



*халькопирит, диапазон 12...145 ГГц*

$$\begin{aligned}n' &= 30,7418328 - 4,336389741f + 0,3595593963f^2 - \\ &- 1,675195689 \cdot 10^{-2} f^3 + 4,558620163 \cdot 10^{-4} f^4 - 7,481423268 \cdot 10^{-6} f^5 + \\ &+ 7,497642831 \cdot 10^{-8} f^6 - 4,489031854 \cdot 10^{-10} f^7 + 1,475466346 \cdot 10^{-12} f^8 - \\ &+ 2,048994751 \cdot 10^{-15} f^9, \\ n'' &= 4,228240003 - 0,4926839851f + 2,904899281 \cdot 10^{-2} f^2 - \\ &- 9,16536036 \cdot 10^{-4} f^3 + 1,661034607 \cdot 10^{-5} f^4 - 1,791686078 \cdot 10^{-7} f^5 + \\ &+ 1,138378562 \cdot 10^{-9} f^6 - 3,936338708 \cdot 10^{-12} f^7 + 5,715979178 \cdot 10^{-15} f^8;\end{aligned}\tag{10}$$

*сфалерит, диапазон 77...145 ГГц*

$$\begin{aligned}n' &= 1,135383285 + 3,192460104 \cdot 10^{-2} f - 1,448182453 \cdot 10^{-4} f^2, \\ n'' &= 5,678088171 \cdot 10^{-2} - 3,129785173 \cdot 10^{-4} f + 8,396955542 \cdot 10^{-7} f^2;\end{aligned}\tag{11}$$

*ильменит, диапазон 77...145 ГГц*

$$\begin{aligned}n' &= -0,7877085347 + 0,1219783154f - 5,409869773 \cdot 10^{-4} f^2, \\ n'' &= 0,2611383566 - 2,181707959 \cdot 10^{-3} f + 7,895999332 \cdot 10^{-6} f^2;\end{aligned}\tag{12}$$

*гематит, диапазон 77...145 ГГц*

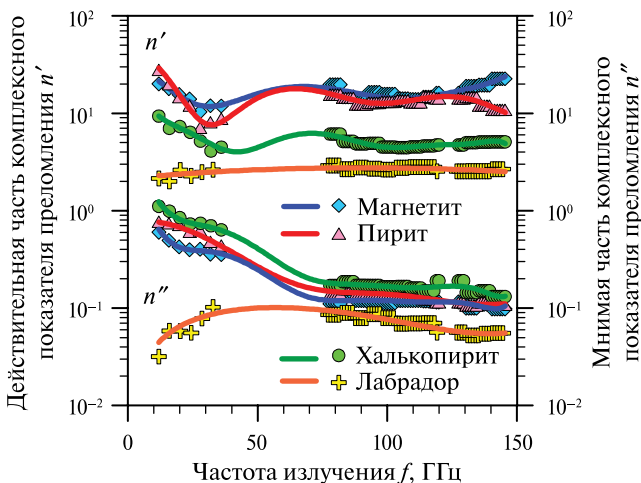
$$\begin{aligned}n' &= 272,3284042 - 9,972816121f + 0,1367914484f^2 - \\ &- 8,20183364 \cdot 10^{-4} f^3 + 1,815397425 \cdot 10^{-6} f^4, \\ n'' &= -2,659658611 + 0,1073701638f - 1,511691203 \cdot 10^{-3} f^2 + \\ &+ 9,125208162 \cdot 10^{-6} f^3 - 2,009006668 \cdot 10^{-8} f^4;\end{aligned}\tag{13}$$

*лабрадор, диапазон 12...145 ГГц*

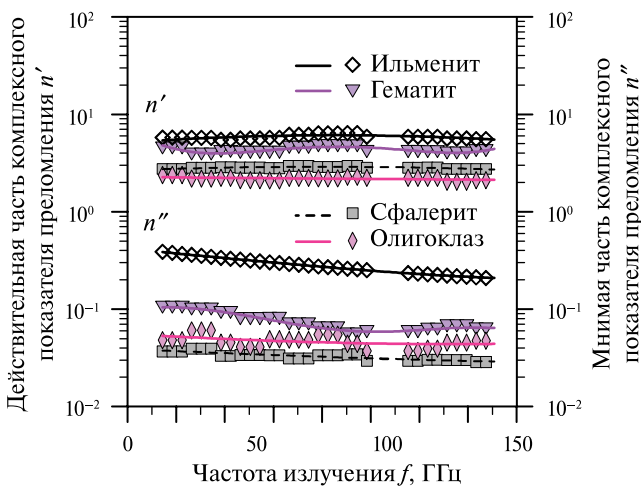
$$\begin{aligned}n' &= 1,887677117 + 2,82412794 \cdot 10^{-2} f - 2,766233122 \cdot 10^{-4} f^2 + \\ &+ 7,900018102 \cdot 10^{-7} f^3, \\ n'' &= -0,03300847532 + 6,871984677 \cdot 10^{-3} f - 1,140154282 \cdot 10^{-4} f^2 + \\ &+ 7,276458374 \cdot 10^{-7} f^3 - 1,658718564 \cdot 10^{-9} f^4;\end{aligned}\tag{14}$$

*олигоклаз, диапазон 77...145 ГГц*

$$\begin{aligned}n' &= 2,474560446 - 3,179198929 \cdot 10^{-3} f + 5,352741874 \cdot 10^{-6} f^2, \\ n'' &= 0,0931222676 - 7,216304462 \cdot 10^{-4} f + 2,641409177 \cdot 10^{-6} f^2.\end{aligned}\tag{15}$$



**Рис. 8.** Частотные зависимости действительной и мнимой частей комплексного показателя преломления магнетита, пирита, халькопирита и лабрадора в диапазоне 12...145 ГГц. Символы — значения, полученные при использовании вычислительного алгоритма, кривые — аппроксимации полученных значений



**Рис. 9.** Частотные зависимости действительной и мнимой частей комплексного показателя преломления ильменита, гематита, сфалерита и олигоклаза в диапазоне 77...145 ГГц. Символы — значения, полученные при использовании вычислительного алгоритма, кривые — аппроксимации полученных значений

В выражениях (8)–(15)  $f$  — частота излучения, выраженная в гигагерцах.

Действительная  $\epsilon'$  и мнимая  $\epsilon''$  части комплексной диэлектрической проницаемости минералов вычисляются из выражений (6), в которых значения  $n'$  и  $n''$  определяются из (8)–(15). Приведенные аппроксимационные функции могут быть использованы для вычисления  $n'$  и  $n''$  или  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  минералов в соответствующем диапазоне частот.

На рис. 8 и 9 (см. с. 18) представлены значения действительной и мнимой частей комплексного показателя преломления минералов, полученные из экспериментальных данных при численном решении системы уравнений (5), а также аппроксимационные зависимости этих значений, рассчитанные из выражений (8)–(15).

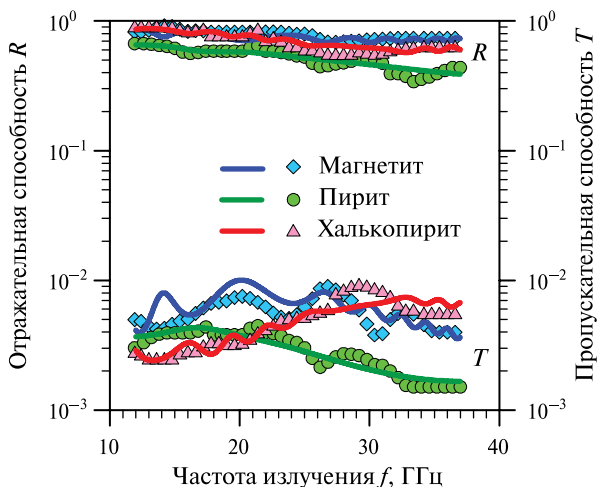
### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для проверки полученных результатов аппроксимационные выражения  $n'$  и  $n''$  минералов (8)–(15) были использованы для расчета  $R$  и  $T$  имеющихся образцов.

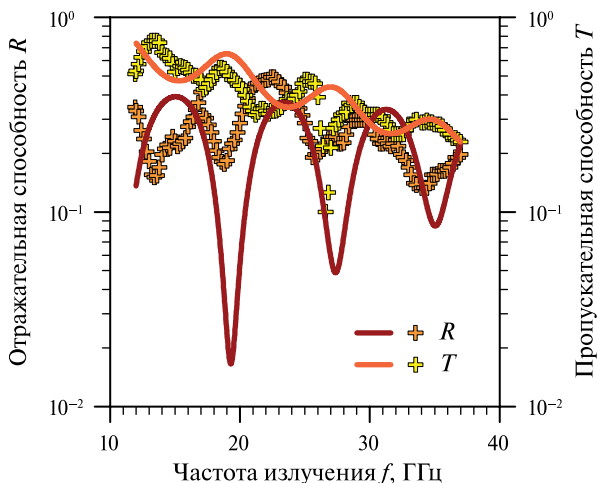
Результаты расчета в диапазоне частот 12...38 ГГц для рудных минералов представлены на рис. 10 (см. с. 20), а для лабрадора — на рис. 11 (см. с. 20). Как видно из рисунков, расчетные зависимости  $R$  и  $T$  минералов от частоты излучения хорошо соответствуют экспериментальным данным. Имеющиеся расхождения между экспериментальными и теоретическими зависимостями связаны, на наш взгляд, с неоднородностью исследуемых образцов. Причины этих расхождений будут рассмотрены ниже.

Сопоставление экспериментальных значений и расчетных зависимостей  $R(f)$  и  $T(f)$  в диапазоне частот 77...145 ГГц для всех исследуемых минералов представлены на рис. 12 (см. с. 21) и 13 (см. с. 22). Из данных рисунков видно, что расчетные зависимости совпадают с экспериментальными значениями. Однако они представляют собой плавные кривые (за исключением сфалерита, лабрадора и олигоклаза), тогда как экспериментальные зависимости имеют ярко выраженный осциллирующий вид.

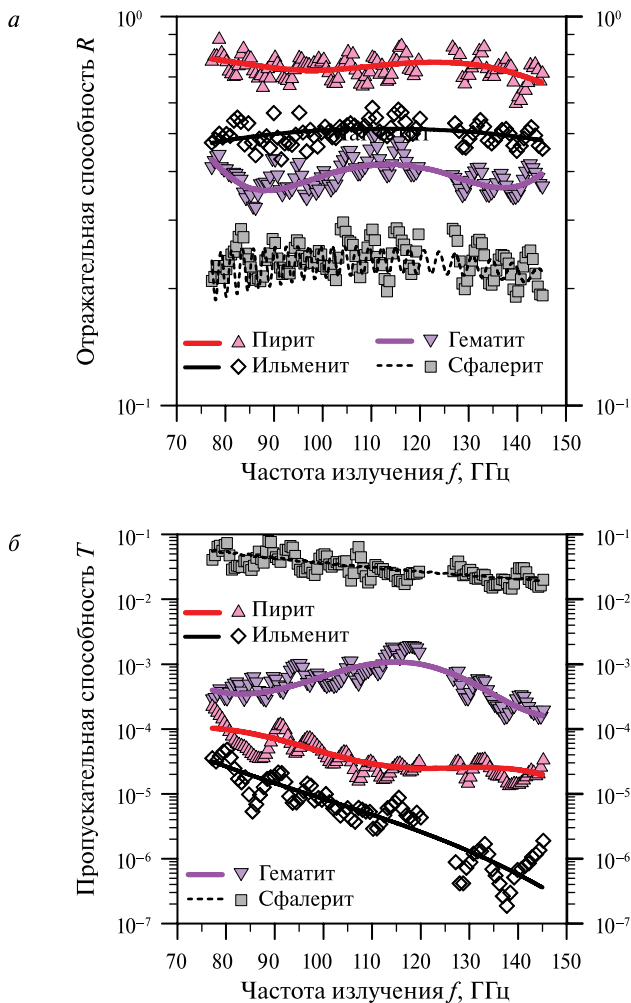
Неполное совпадение рассчитанных частотных зависимостей  $R$  и  $T$  с экспериментальными результатами объясняется тем, что исследуемые образцы не являлись однородным минералом, а представляли собой сростки кристаллов основного минерала, разделенных тонкими прослойками ( $\leq 1$  мм) других минералов.



**Рис. 10.** Спектральные зависимости  $R(f)$  и  $T(f)$  в диапазоне частот 12...38 ГГц для образцов трех рудных минералов. Символы — эксперимент, линии — расчет из (5) с учетом (8)–(10). Толщина образцов (см): магнетит — 0,55; халькопирит — 0,57; пирит — 0,48

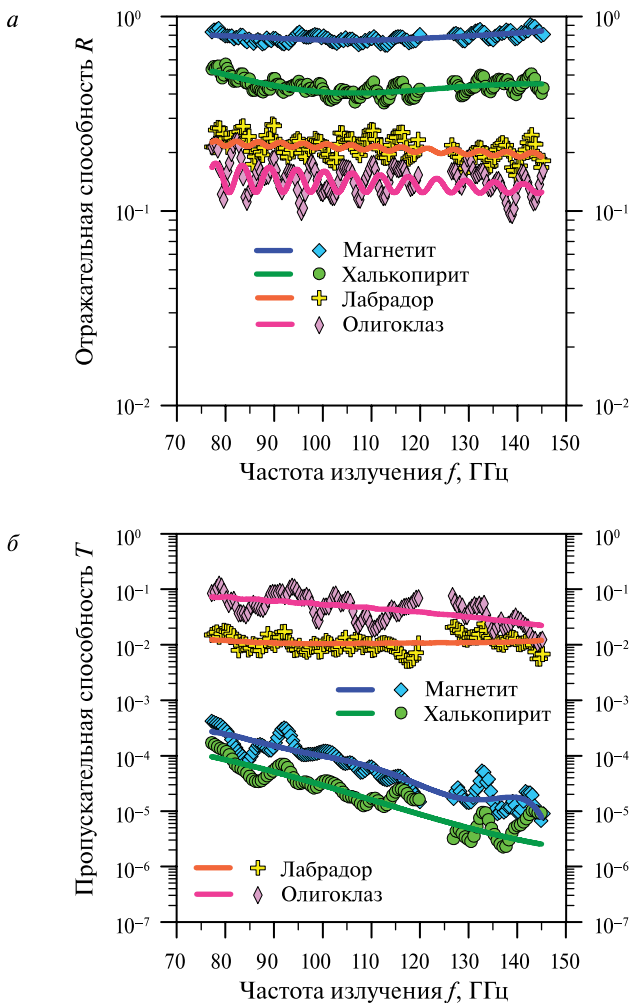


**Рис. 11.** Спектральные зависимости  $R(f)$  и  $T(f)$  в диапазоне частот 12...38 ГГц для лабрадора. Символы — эксперимент, линии — расчет из (5) с учетом (14). Толщина образца — 0,665 см



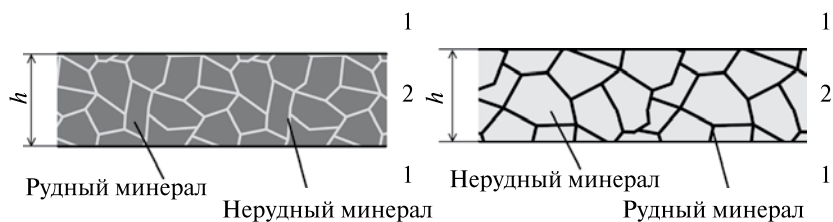
**Рис. 12.** Зависимости  $R(f)$  — (а) и  $T(f)$  — (б) в диапазоне 77...145 ГГц для образцов четырех рудных минералов. Символы — эксперимент, линии — расчет. Толщина образцов (в сантиметрах): пирит — 1,275; ильменит — 2,01; гематит — 1,98; сфалерит — 1,963

Для образцов рудных минералов такими примесями являлись нерудные минералы — кварц, плагиоклазы и т. п. Примесями в образцах лабрадора и олигоклаза были рудные минералы — пирит, гематит, халькопирит, магнетит и пирротин.



**Рис. 13.** Зависимости  $R(f)$  (а) и  $T(f)$  (б) в диапазоне 77...145 ГГц для образцов рудных и нерудных минералов. Символы — эксперимент, линии — расчет. Толщина образцов (в сантиметрах): магнетит — 1,283; халькопирит — 1,33; лабрадор — 1,28; олигоклаз — 1,32

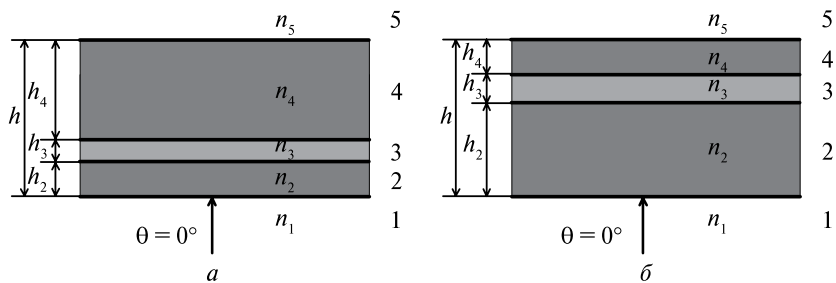
Приблизительная схема такой среды показана на рис. 14 (см. с. 23), где крупные области — это кристаллы основного минерала, а прожилки — мелкозернистая фракция примесных минералов.



**Рис. 14.** Схематический вид исследуемых образцов: *a* — для рудных минералов; *б* — для нерудных минералов

В первом приближении такую среду можно представить многослойной структурой, где слой основного минерала чередуется с очень тонким слоем примесного минерала. Таким образом, для образцов нерудных минералов, на переотражение излучения от внешних границ образца (нерудный минерал — вакуум) будут накладываться переотражения излучения от внутренних слоев (нерудный минерал — рудный минерал). Поскольку расчет  $R$  и  $T$  был выполнен для сплошного образца (выражение (5)), то этим и объясняется неполное совпадение рассчитанных и экспериментальных зависимостей  $R(f)$  и  $T(f)$  для нерудных минералов (см. рис. 11 и 13).

Поглощение в слоях рудного минерала велико, поэтому отражательная способность образца рудного минерала будет определяться отражением излучения от границ первых двух слоев структуры — слоя рудного и слоя нерудного минералов. Вклад в отражательную способность отражения излучения от границ других слоев будет незначителен, и его можно не учитывать. Величина пропускательной способности такой среды будет определяться пропусканием излучения всех слоев и переотражением от границ последних двух слоев. Переотражение излучения от границ остальных слоев не окажет существенного влияния на значение  $T$  из-за сильного поглощения в рудном минерале. Таким образом, для расчета  $R$  и  $T$  образцов рудных минералов необходимо рассмотреть задачу отражения и пропускания излучения трехслойной средой, показанной на рис. 15 (см. с. 24). На рисунке: среда 1 и 5 — вакуум с показателем преломления  $n_1 = n_5 = 1$ ; среда 2 и 4 — слои рудного минерала толщиной  $h_2$  и  $h_4$  с комплексным показателем преломления  $n_2 = n_4$ ; среда 3 — слой нерудного минерала толщиной  $h_3$  и комплексным показателем преломления  $n_3$ ; толщина всего образца —  $h = h_2 + h_3 + h_4$ . На рис. 15а представлена схема



**Рис. 15.** Схема задачи для расчета  $R$  (а) и  $T$  (б) образцов рудных минералов с учетом слоистости среды

задачи для расчета отражательной способности  $R$  образцов рудных минералов. Здесь средой 4 заменены все последующие слои рудного и нерудного минералов, лежащие за слоями 2 и 3, на рис. 15б — схема задачи для расчета пропускательной способности  $T$  образцов рудных минералов. Здесь средой 2 заменены все предыдущие слои рудного и нерудного минералов, лежащие перед предпоследним и последним слоями (слои 3 и 4).

Отражательная  $R$  и пропускательная  $T$  способность многослойной плоскопараллельной среды, находящейся в вакууме, при условии падения излучения на поверхность среды под углом  $\theta = 0^\circ$ , определяется из следующих выражений [57]:

$$R = |r_l|^2, \quad r_l = \frac{M_{11} + M_{12} - M_{21} - M_{22}}{M_{11} + M_{12} + M_{21} + M_{22}}; \quad (16)$$

$$T = |t_l|^2, \quad t_l = \frac{2}{M_{11} + M_{12} + M_{21} + M_{22}},$$

где  $r_l$  — коэффициент отражения среды, состоящей из  $l$  слоев;  $t_l$  — коэффициент пропускания среды, состоящей из  $l$  слоев;  $M_{11}$ ,  $M_{12}$ ,  $M_{21}$ ,  $M_{22}$  — элементы характеристической матрицы слоистой среды. Характеристическая матрица слоистой среды  $M(h)$  определяется как произведение характеристических матриц каждого слоя [57]. Для нашего случая:

$$M(h) = M_2(h_2)M_3(h_3)M_4(h_4) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

где  $M_2(h_2)$ ,  $M_3(h_3)$  и  $M_4(h_4)$  — характеристические матрицы соответствующего слоя. Для рассматриваемой задачи характеристическая матрица отдельного слоя запишется как [57]:



$$M_k(h_k) = \begin{bmatrix} \cos \beta_k & \frac{-i}{n_k} \sin \beta_k \\ -in_k \sin \beta_k & \cos \beta_k \end{bmatrix}, \quad (18)$$

где  $\beta_k = \frac{2\pi}{\lambda} n_k h_k$ ;  $\lambda$  — длина волны излучения;  $n_k$  и  $h_k$  — комплексный показатель преломления и толщина слоя;  $k$  — номер соответствующего слоя (см. рис. 15). Используя (18), найдем из (17) элементы характеристической матрицы трехслойной среды, представленной на рис. 15. Подставив найденные  $M_{11}$ ,  $M_{12}$ ,  $M_{21}$ ,  $M_{22}$  в (16), определим выражения для коэффициента отражения  $r_3$  и коэффициента пропускания  $t_3$  трехслойной среды:

$$r_3 = \left( \begin{aligned} & r_{12} + r_{23} e^{2i\beta_2} + r_{34} e^{2i(\beta_2+\beta_3)} + r_{45} e^{2i(\beta_2+\beta_3+\beta_4)} + r_{12} r_{23} r_{34} e^{2i\beta_3} + \\ & + r_{12} r_{23} r_{45} e^{2i(\beta_3+\beta_4)} + r_{12} r_{34} r_{45} e^{2i\beta_4} + r_{23} r_{34} r_{45} e^{2i(\beta_2+\beta_4)} \end{aligned} \right) \times \quad (19)$$

$$\times \left( \begin{aligned} & 1 + r_{12} r_{23} e^{2i\beta_2} + r_{23} r_{34} e^{2i\beta_3} + r_{34} r_{45} e^{2i\beta_4} + r_{12} r_{34} e^{2i(\beta_2+\beta_3)} + \\ & + r_{23} r_{45} e^{2i(\beta_3+\beta_4)} + r_{12} r_{23} r_{34} r_{45} e^{2i(\beta_2+\beta_4)} + r_{12} r_{45} e^{2i(\beta_2+\beta_3+\beta_4)} \end{aligned} \right)^{-1},$$

$$t_3 = \left( t_{12} t_{23} t_{34} t_{45} e^{i(\beta_2+\beta_3+\beta_4)} \right) \times \quad (20)$$

$$\times \left( \begin{aligned} & 1 + r_{12} r_{23} e^{2i\beta_2} + r_{23} r_{34} e^{2i\beta_3} + r_{34} r_{45} e^{2i\beta_4} + r_{12} r_{34} e^{2i(\beta_2+\beta_3)} + \\ & + r_{23} r_{45} e^{2i(\beta_3+\beta_4)} + r_{12} r_{23} r_{34} r_{45} e^{2i(\beta_2+\beta_4)} + r_{12} r_{45} e^{2i(\beta_2+\beta_3+\beta_4)} \end{aligned} \right)^{-1},$$

где  $r_{k,k+1} = \frac{n_k - n_{k+1}}{n_k + n_{k+1}}$  — коэффициент отражения от границы раздела между средой  $k$  и средой  $k+1$ ,  $t_{k,k+1} = \frac{2n_k}{n_k + n_{k+1}}$  — коэффициент пропускания границы раздела между средой  $k$  и средой  $k+1$ ,  $k = 1, 2, 3, 4$ .

Выражения (19) и (20) были использованы для расчета  $R$  и  $T$  исследуемых минеральных образцов. При расчете  $n'$  и  $n''$  минералов определялись из (8)–(15). Толщины слоев ( $h_2, h_3, h_4$ ) для каждого образца выбирались произвольно, однако в соответствии с реально возможными значениями [17, 37–40]. Поскольку диэлектрические характеристики большинства нерудных минералов схожи между собой [11–17, 37], то в качестве нерудного минерала нами был выбран кварц,  $n'$  и  $n''$  которого хорошо известны в широком диапазоне частот [11–17, 34, 37, 40]. Отражательная способность

образцов определялась из схемы, показанной на рис. 15а, а пропускательная способность — из схемы, показанной на рис. 15б). Расчеты были выполнены для всех образцов рудных минералов.

Также с помощью (19) и (20) был выполнен расчет  $R$  и  $T$  для образцов лабрадора и олигоклаза. В этом случае образцы представлялись трехслойной средой, состоящей из двух слоев нерудного минерала, разделенных тонким слоем гематита.

На рис. 16 (см. с. 27), 17 (см. с. 28) показаны результаты сопоставления рассчитанных с помощью (19) и (20) зависимостей  $R(f)$  и  $T(f)$  с экспериментальными данными для всех рудных минералов, а также для лабрадора и олигоклаза.

Расчет  $R$  был выполнен при следующих параметрах образцов (в сантиметрах):

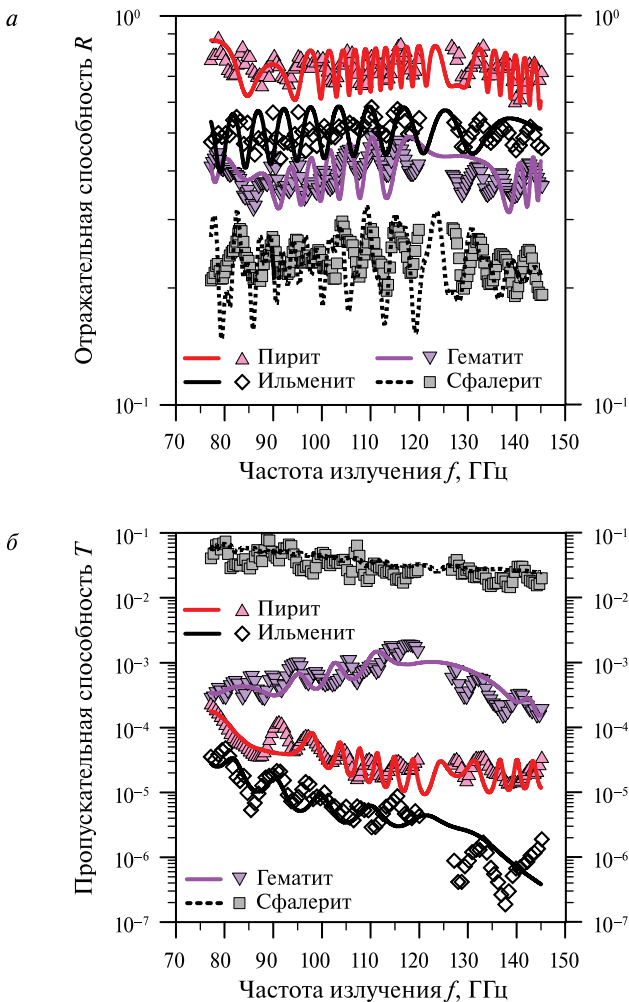
- пирит:  $h_2 = 0,25$ ;  $h_3 = 0,02$ ;  $h_4 = 1,005$ ;
- ильменит:  $h_2 = 0,35$ ;  $h_3 = 0,018$ ;  $h_4 = 1,642$ ;
- гематит:  $h_2 = 0,46$ ;  $h_3 = 0,01$ ;  $h_4 = 1,51$ ;
- сфалерит:  $h_2 = 0,74$ ;  $h_3 = 0,15$ ;  $h_4 = 1,073$ ;
- магнетит:  $h_2 = 0,32$ ;  $h_3 = 0,025$ ;  $h_4 = 0,938$ ;
- халькопирит:  $h_2 = 0,213$ ;  $h_3 = 0,011$ ;  $h_4 = 1,106$ ;
- лабрадор:  $h_2 = 0,65$ ;  $h_3 = 0,01$ ;  $h_4 = 0,62$ ;
- олигоклаз:  $h_2 = 1,06$ ;  $h_3 = 0,01$ ;  $h_4 = 0,25$ .

Расчет  $T$  был выполнен при следующих параметрах образцов (в сантиметрах):

- пирит:  $h_2 = 1,02$ ;  $h_3 = 0,008$ ;  $h_4 = 0,147$ ;
- ильменит:  $h_2 = 1,7$ ;  $h_3 = 0,11$ ;  $h_4 = 0,2$ ;
- гематит:  $h_2 = 1,64$ ;  $h_3 = 0,11$ ;  $h_4 = 0,23$ ;
- сфалерит:  $h_2 = 0,74$ ;  $h_3 = 0,15$ ;  $h_4 = 1,073$ ;
- магнетит:  $h_2 = 0,7$ ;  $h_3 = 0,32$ ;  $h_4 = 0,263$ ;
- халькопирит:  $h_2 = 1$ ;  $h_3 = 0,12$ ;  $h_4 = 0,21$ ;
- лабрадор:  $h_2 = 0,985$ ;  $h_3 = 0,013$ ;  $h_4 = 0,282$ ;
- олигоклаз:  $h_2 = 0,99$ ;  $h_3 = 0,03$ ;  $h_4 = 0,3$ ,

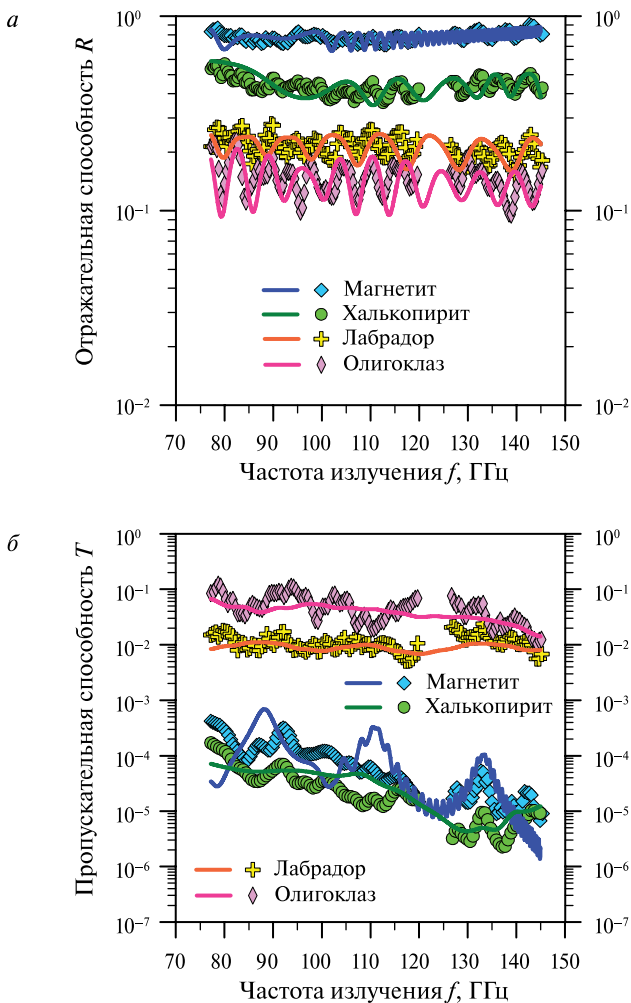
Как видно из данных рисунков, рассчитанные зависимости хорошо соответствуют экспериментальным данным.

Таким образом, осциллирующий вид экспериментальных частотных зависимостей  $R(f)$  и  $T(f)$  в диапазоне 77...145 ГГц связан с неоднородностью структуры исследуемых образцов — наличием внутренних границ раздела сред. Выражения (5) получены для однородного слоя среды. Поскольку все образцы (кроме сфалерита и нерудных минералов) сильно поглощают излучение, а толщина их



**Рис. 16.** Зависимости  $R(f)$  (*a*) и  $T(f)$  (*б*) в диапазоне 77...145 ГГц для образцов четырех рудных минералов. Символы — эксперимент, линии — расчет из (19) и (20). Толщина образцов (в сантиметрах): пирит — 1,275; ильменит — 2,01; гематит — 1,98; сфалерит — 1,963

$h \gg \lambda$ , то переотражение излучения от противоположной границы образца практически не влияет на величины  $R$  и  $T$ . Поэтому расчетные зависимости  $R(f)$  и  $T(f)$ , в диапазоне 77...145 ГГц, полученные из (5), имеют вид плавных кривых (см. рис. 12, 13).



**Рис. 17.** Зависимости  $R(f)$  (a) и  $T(f)$  (b) в диапазоне 77...145 ГГц для образцов двух рудных и двух нерудных минералов. Символы — эксперимент, линии — расчет из (19) и (20). Толщина образцов (в сантиметрах): магнетит — 1,283; халькопирит — 1,33; лабрадор — 1,28; олигоклаз — 1,32

В диапазоне 12...38 ГГц толщина образцов  $h < \lambda$ , а толщина прослоек  $h_3 \ll \lambda$ . В этом диапазоне образцы можно считать однородными и тонкими, поэтому расчет  $R$  и  $T$ , полученный из (5), практически совпадает с экспериментальными данными (см. рис. 10, 11).

Схема задачи, показанная на рис. 15, является приближением реальной структуры образцов (см. рис. 14). В минеральных образцах толщины слоев основных минералов и прослойки примесных минералов не постоянны, а слои имеют разрывы (рис. 14). Помимо этого, некоторые границы раздела сред внутри образца могут быть не параллельны внешним границам. Этим и объясняется небольшое различие теоретических и экспериментальных зависимостей  $R(f)$  и  $T(f)$  (см. рис. 10, 11, 16, 17).

Нетрудно также показать, что при  $h_3 \rightarrow 0$  (см. рис. 15), выражения (19) и (20) переходят в уравнения (5). Поскольку величина примесей в образцах не превышала 10 % и  $h_3 \ll h$ , то полученные аппроксимационные частотные зависимости  $n'$  и  $n''$  для исследуемых минералов (выражения (8)–(15)) можно считать с высокой степенью достоверными.

#### 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

На основе проведенных исследований диэлектрических свойств минералов была рассмотрена возможность идентификации горной породы по отраженному от нее микроволновому излучению.

В ходе работы исследовались образцы медной руды, полученные с месторождений «Северное» и «Котсель Ваара» Мурманской области, а также «Талнахское» Норильского промышленного района. Полезной компонентой этой горной породы являлся минерал халькопирит. Помимо халькопирита, в состав образцов входили сопутствующие рудные минералы — магнетит, пирит и сфалерит; 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  $>3\%$ ) и «бедные» (содержание халькопирита  $\leq 3\%$ ). На рис. 18 представлены фотографии одного из исследуемых образцов медной руды, а также кусок горной породы, содержащей медную руду.

**Рис. 18.** Фотографии исследуемого образца медной руды (слева) и куска горной породы, содержащей медную руду (справа)



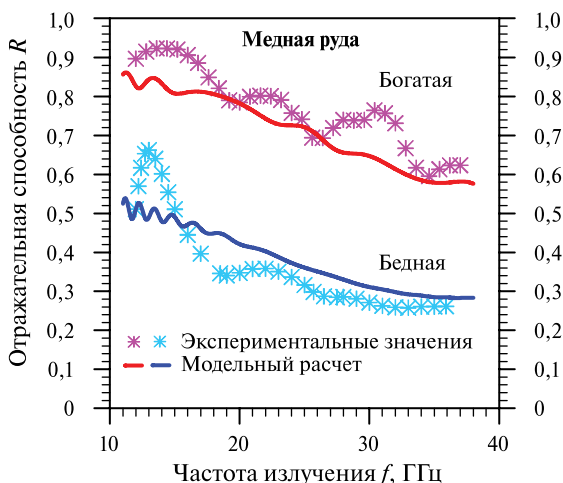
Измерения отражательной способности образцов горной породы проводились в диапазоне частот 12...38 ГГц на панорамном измерителе коэффициента стоячей волны и ослабления (см. п. 1.2. и рис. 2). Толщина всех образцов была не менее 1 см, поэтому пропускательная способность составляла величину ниже  $10^{-4}$  во всем исследуемом диапазоне и прибором не фиксировалась.

Из выражения (5) следует, что коэффициент отражения излучения зависит только от одной величины, характеризующей свойства среды, — это комплексный показатель преломления вещества  $n$ . Он и определяет электродинамические свойства среды. Как отмечалось во введении данной работы, с электродинамической точки зрения горные породы представляют собой дисперсную среду, состоящую из частиц разных минералов, имеющих разные размеры и форму. Диэлектрические свойства таких сложных сред моделируют однородной средой с эффективной диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon_{\text{эф}} = \epsilon'_{\text{эф}} + i\epsilon''_{\text{эф}}$ ), которая является функцией физических параметров, составляющих среду компонент (диэлектрическая проницаемость, объемный фактор и др.) [см., например, 41, 61, 62]. Комплексный показатель преломления вещества сложной среды (состоящей из многих компонент) можно найти из следующих выражений:

$$\begin{cases} n' = \text{Re}\left(\sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}\right), \\ n'' = \text{Im}\left(\sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}\right), \end{cases} \quad (21)$$

где  $n'$  и  $n''$  — действительная и мнимая части комплексного показателя преломления вещества, а  $\epsilon_{\text{эф}}$  — эффективная диэлектрическая проницаемость вещества. Для определения эффективной диэлектрической проницаемости вещества (горной породы) была использована «рефракционная» модель, которая успешно используется при интерпретации данных дистанционного зондирования почвенного покрова и грунтов [63]. Согласно этой модели, эффективная диэлектрическая проницаемость горной породы определялась из следующего выражения [63]:

$$\sqrt{\epsilon_{\text{эф}}} = \sum_{j=1}^n V_j \sqrt{\epsilon_j}, \quad (22)$$



**Рис. 19.** Частотные зависимости отражательной способности образцов медной руды

где  $V_j$ ,  $\epsilon_j$  — объемное содержание и комплексная диэлектрическая проницаемость компонент породы (воздуха и минералов).

Расчет отражательной способности слоя горной породы, согласно выражениям (5), проводился для различных объемных содержаний в среде рудных и нерудных минералов. Сопоставление теоретических и экспериментальных зависимостей показало их хорошее качественное и неплохое количественное соответствие. На рис. 19 приведены экспериментальные и теоретические частотные зависимости отражательной способности для 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 % несущей породы — лабрадора.

Неполное совпадение расчетов с экспериментальными результатами связано с тем, что различные минералы в породе (в том числе и в образце) распределены неравномерно, вследствие чего имеются границы раздела сред и на этих границах происходит преотражение излучения, которое в модельных расчетах не учитывается.

## 5. МИКРОВОЛНОВЫЙ СПОСОБ РАЗДЕЛЕНИЯ РУД

На основе проведенных исследований авторами был разработан и запатентован «Микроволновый способ разделения руд» [50]. Данное изобретение относится к способам контроля полезных ископаемых по количественному содержанию в них полезного компонента, и может быть использовано на горнорудных предприятиях.

Наиболее близкими к предлагаемому способу разделения руд являются два изобретения. Первое изобретение — «Способ покусковой сепарации полезных ископаемых» (патент Великобритании N. GB 2211299A), заключающийся в подаче кусков породы в зону контроля, где находится объемный СВЧ-резонатор, облучающий их микроволновым электромагнитным излучением. В данном способе осуществляется два вида контроля: в первом куски одинаковых размеров проходят через резонансную полость и по сдвигу резонансной частоты осуществляется качественное разделение кусков породы по различию действительной части диэлектрической проницаемости; во втором по изменению резонансной частоты объемного резонатора происходит сортировка кусков руды различных размеров, но с одинаковыми электродинамическими характеристиками. Недостатком этого способа является низкая производительность разделения из-за необходимости дополнительных временных затрат на подготовку кусков породы одинакового размера в первом виде контроля и ограничение на размеры сортируемых кусков — во втором.

Второе изобретение — «Способ контроля крупности дробленной руды и устройство для его осуществления» (авторское свидетельство СССР № 1788466A1 от 24.07.1990 г.). В данном методе осуществляется подача руды в зону контроля, облучение потока руды радиолокационным сигналом, регистрация отраженного сигнала, сравнение его параметров с заданными и осуществление контроля по результатам сравнения. При этом радиолокационный сигнал выбирается сверхширокополосным с длительностью импульса от 1 до 100 пс, облучающий радиолокационный сигнал дополнительно поляризуют. Основным недостатком данного способа является невозможность сортировки кусков руды с учетом их минерального состава, а также зависимость интенсивности отраженного сигнала от облучаемой площади куска.

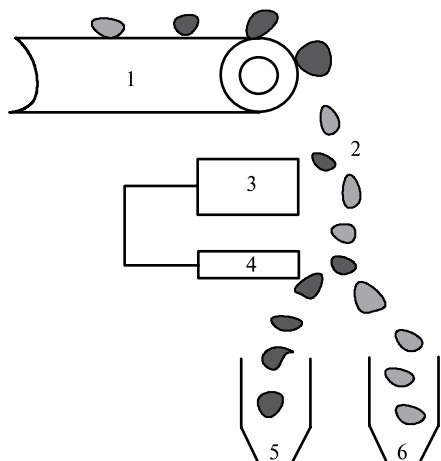
Целью нашего изобретения было расширение функциональных возможностей способа разделения руд путем определения



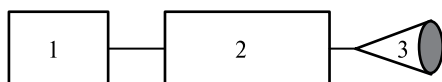
содержания полезного компонента в кусках руды на этапе сортировки. Поставленная цель была достигнута следующим образом: руда на позицию контроля подается в виде отдельных кусков, эти куски облучаются непрерывным микроволновым излучением, модулированным по амплитуде, далее измеряется коэффициент стоячей волны сигнала, отраженного от кусков руды. Разделение кусков руды по количеству полезной компоненты происходит путем сравнения измеренного коэффициента стоячей волны отраженного сигнала с заданным значением коэффициента стоячей волны.

На рис. 20 показана схема сортировки руды по количественному содержанию в ней полезного компонента.

Способ разделения руды по количественному содержанию в ней полезного компонента предусматривает подачу отдельных кусков 2 с ленты транспортера 1 в зону контроля, где располагаются блок приемно-передающей системы 3 и исполнительный механизм 4. Облучение кусков руды непрерывным модулированным по амплитуде микроволновым излучением и измерение коэффициента стоячей волны производится в блоке приемно-передающей системы.



**Рис. 20.** Схема сортировки руд по количественному содержанию в руде полезного компонента: 1 — транспортер; 2 — куски руды; 3 — приемно-передающая система; 4 — исполнительный механизм; 5 и 6 — приемные бункеры



**Рис. 21.** Приемно-передающая система: 1 — генераторный блок; 2 — блок измерения коэффициента стоячей волны; 3 — антенна

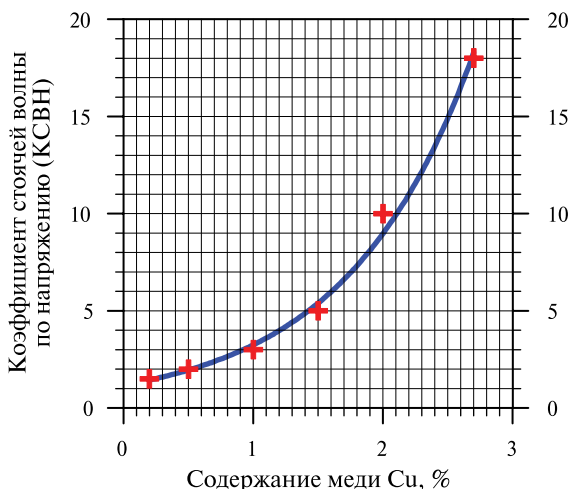
На рис. 21 представлена блок-схема приемно-передающей системы, состоящая из генераторного блока, блока измерения коэффициента стоячей волны и антенны с узкой диаграммой направленности.

Перед началом измерений производится калибровка. Измеряется коэффициент стоячей волны нескольких образцов руды с различным содержанием в них полезного компонента, выбирается заданное значение коэффициента стоячей волны. Далее в зону контроля с ленты транспортера поступают сортируемые куски руды, измеряется коэффициент стоячей волны данных кусков, проводится сравнение измеренного значения коэффициента стоячей волны с заданным значением и подается сигнал на исполнительный механизм. Если измеренное значение коэффициента стоячей волны больше порогового значения — кусок породы поступает (см. рис. 20) в бункер 5, в противном случае — в бункер 6.

При сепарации, например, медной руды разных классов крупности по содержанию в ней полезного компонента — меди — выбираются диапазоны частот, в зависимости от класса крупности кусков, так, чтобы глубина проникновения электромагнитного излучения в кусок руды составляла не меньше 5...10 мм. Данным способом можно контролировать куски медно-никелевой руды крупностью от 10 до 300 мм.

Коэффициент стоячей волны по напряжению для образцов медно-никелевой руды произвольной формы (класс крупности от 20 до 60 мм) с процентным содержанием меди 1...2,7 % принимает значения от 3 до 18. Для образцов с процентным содержанием меди 0,2...1 % КСВН принимает значения от 1,5 до 3 (рис. 22, см. с. 35).

Изобретенный метод позволяет повысить скорость и качество сортировки полезных ископаемых за путем покускового разделения горной породы (от 10 до 300 мм) и сбора информации о наличии полезного компонента в породе с глубины порядка половины длины волны — 5...10 мм.



**Рис. 22.** Зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению от концентрации полезного компонента — меди в медной руде. Класс крупности кусков — от 20 до 60 мм. Символы — экспериментальные значения, кривая — аппроксимация экспонентой

Технические преимущества предложенного способа перед известными:

- независимость интенсивности отраженного сигнала от облучаемой площади сортируемых кусков породы, что повышает точность сортировки;
- повышение быстродействия за счет непрерывной регистрации отраженного сигнала;
- покусковая подача сортируемых образцов различного класса крупности в зону контроля.

Эти технические преимущества позволяют удешевить процесс сепарации при одновременном повышении точности определения полезных ископаемых по количественному содержанию полезного компонента.

### Заключение

В данной работе были исследованы отражательные и пропускательные характеристики рудных и нерудных минералов в микроволновом диапазоне электромагнитных волн. В процессе проведенных исследований были получены аппроксимационные

выражения для диэлектрических характеристик ряда рудных и нерудных минералов в диапазоне частот 12...145 ГГц.

Экспериментальные исследования и теоретическое моделирование отражательных характеристик горных пород, в частности медной руды, показало возможность разделения ее на «богатую» и «бедную» по отраженному от породы спектру микроволнового излучения. На основании этих исследований был разработан и запатентован «Микроволновый способ разделения руд» [50].

Проведенные исследования и полученные результаты будут полезны при радиофизических исследованиях минералов и горных пород, в геологии и горнодобывающей промышленности, а также при решении обратных задач дистанционного зондирования поверхности Земли и других планет.

### Литература

1. *Кронберг П.* Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии. М.: Мир, 1988. 352 с.
2. *Яковлев О. И.* Космическая радиофизика. М.: Науч. кн., 1998. 432 с.
3. *Sharkov E. A.* Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations. Chichester, UK: Springer/PRAXIS, 2003. 612 p.
4. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография / Под ред. А. Ю. Гринева. М.: Радиотехника, 2005. 416 с.
5. *Рис У. Г.* Основы дистанционного зондирования. М.: Техносфера, 2006. 336 с.
6. Аэрокосмический радиолокационный мониторинг Земли: Коллективная моногр. / Под ред. А. И. Кнащенко. М.: Радиотехника, 2006. 236 с.
7. *Быстров Р. П., Загорин Г. К., Соколов А. В., Фёдорова Л. В.* Пассивная радиолокация: методы обнаружения объектов. М.: Радиотехника, 2008. 320 с.
8. *Корчуганова Н. И., Корсаков А. К.* Дистанционные методы геологического картирования. М.: КДУ, 2009. 288 с.
9. *Цымбал В. Н., Яцевич С. Е., Ефимов В. Б., Курекин А. С., Матвеев А. Я., Гавриленко А. С., Бычков Д. М.* Применение радиофизических методов и средств для дистанционного обнаружения подповерхностных объектов с борта самолета-лаборатории // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 4. С. 274–284.
10. *Цымбал В. Н., Яцевич С. Е., Ефимов В. Б., Курекин А. С., Матвеев А. Я., Гавриленко А. С., Бычков Д. М.* Использование многочастотных радиолокационных данных для выявления геологических структур и месторождений полезных ископаемых дистанционными методами // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 2. С. 354–360.

11. Справочник физических констант горных пород / Под ред. С. Кларка. М.: Мир, 1969. 544 с.
12. *Campbell M. J., Ulrichs J.* Electrical properties of rocks and their significance for lunar radar observations // *J. Geophysical Research*. 1969. V. 74. N. 25. P. 5867–5881.
13. *Лещанский Ю. И., Лебедева Г. Н., Шумилин В. Д.* Электрические параметры песчаного и глинистого грунтов в диапазоне сантиметровых, дециметровых и метровых волн // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1971. Т. 14. № 4. С. 562–569.
14. *Золотарев В. М., Морозов В. Н., Смирнова Е. В.* Оптические постоянные природных и технических сред. Л.: Химия, 1984. 243 с.
15. *Mineral physics and crystallography: a handbook of physical constants* / Ed. T. J. Ahrens. The American Geophysical Union, 1995. 354 p.
16. *Романов А. Н.* Экспериментальные исследования диэлектрических свойств почвообразующих минералов и минеральных солей в микроволновом диапазоне. Барнаул: АГУ, 2002. 50 с.
17. *Захарова Е. М.* Атлас минералов россыпей. М.: ГЕОС, 2006. 276 с.
18. *Лисичкин Г. В.* Сырьевой кризис и проблемы добычи металлов из морской воды // *Соровский образовательный журн.* 1998. № 6. С. 65–70.
19. *Чантурия В. А.* Современные проблемы обогащения минерального сырья в России // *Физико-технич. проблемы разработки полезных ископаемых*. 1999. № 3. С. 107–121.
20. *Старостин В. И.* Минерально-сырьевые ресурсы мира в третьем тысячелетии // *Соровский образовательный журн.* 2001. Т. 7. № 6. С. 48–55.
21. *Родзевич Н. Н.* Геоэкология и природопользование. М.: Дрофа, 2003. 256 с.
22. *Магарил Е. Р., Локетт В. Н.* Основы рационального природопользования. М.: КДУ, 2008. 460 с.
23. Справочник по обогащению руд: Подготовительные процессы. М.: Недра, 1982. 367 с.
24. Справочник по обогащению руд: Основные процессы. М.: Недра, 1983. 383 с.
25. Справочник по обогащению руд: Специальные и вспомогательные процессы, испытания обогатимости, контроль и автоматика. М.: Недра, 1983. 385 с.
26. Справочник по обогащению руд: Обоганительные фабрики. М.: Недра, 1984. 360 с.
27. *Тихонов О. Н.* Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. М.: Недра, 1984. 207 с.
28. *Ревнивцев В. И., Азбель Е. И., Баранов Е. Г.* и др. Подготовка минерального сырья к обогащению и переработке / Под ред. В. И. Ревнивцева. М.: Недра, 1987. 307 с.
29. *Одеров С. И., Иванов П. А.* Лабораторные методы исследования вещественного состава полезных ископаемых. М.: МГГА, 1994. 117 с.
30. *Леонов С. Б., Белькова О. Н.* Исследование полезных ископаемых на обогатимость. М.: Интернет инжиниринг, 2001. 631 с.

31. *Дж С., Рид Б.* Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия в геологии. М.: Техносфера, 2008. 232 с.
32. *Белоусова О. Н., Михина В. В.* Общий курс петрографии. М.: Недра, 1972. 344 с.
33. *Юбельт Р, Шрайтер П.* Определитель горных пород. М.: Мир, 1977. 240 с.
34. *Соболев Р. Н.* Методы оптического исследования минералов: Справочник. М.: Недра, 1990. 288 с.
35. *Вертушков Г. Н., Авдонин В. Н.* Таблицы для определения минералов по физическим и химическим свойствам: Справочник. М.: Недра, 1992. 489 с.
36. *Вахромеев Г. С., Ерофеев Л. Я., Канайкин В. С., Номоконова Г. Г.* Петрофизика. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1997. 462 с.
37. *Батти Х., Принг А.* Минералогия для студентов. М.: Мир, 2001. 432 с.
38. *Корбел П., Новак М.* Минералы: Иллюстрированная энцикл. М.: Лабиринт Пресс, 2004. 296 с.
39. *Ананьев В. П., Потанов А. Д.* Основы геологии, минералогии и петрографии. М.: Высш. шк., 2005. 400 с.
40. *Бетехтин А. Г.* Курс минералогии. М.: КДУ, 2008. 736 с.
41. *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 664 с.
42. *Брандт А. А.* Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Физматгиз, 1963. 403 с.
43. *Тишер Ф.* Техника измерений на сверхвысоких частотах. М.: Физматгиз, 1963. 368 с.
44. *Харвей А. Ф.* Техника сверхвысоких частот. Т. 1. М.: Сов. радио, 1965. 784 с.
45. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook / Editor-in-Chief J.G. Webster. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999. [Электрон. текст] 1 CD-ROM.
46. *Данилин А. А.* Измерения в технике СВЧ. М.: Радиотехника, 2008. 184 с.
47. *Polyakova O. N., Tikhonov V. V., Boyarskii D. A.* Researches Radiophysical and Dielectric Behaviors of Ore Minerals in the Microwave Range // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. July 23–27, 2007. Barcelona. 3 p. [Электрон. текст] 1 CD-ROM.
48. *Полякова О. Н., Тихонов В. В., Мельников А. П., Боярский Д. А.* Экспериментальные исследования диэлектрических свойств рудных минералов в микроволновом диапазоне // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2007. Вып. 4. Т. 2. С. 147–155.
49. *Полякова О. Н., Тихонов В. В., Дзарданов А. Л., Боярский Д. А., Гольцман Г. Н.* Определение диэлектрических характеристик рудных минералов в диапазоне частот 10–40 ГГц // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 379–385.
50. *Гольцман Г. Н., Дзарданов А. Л., Тихонов В. В., Мельников А. П., Кацер И. И., Какорин В. И., Полякова О. Н.* Микроволновый способ разделения руд. Патент на изобретение № 2324549 от 20 мая 2008 г. Опубл. в бюл. № 14 от 20.05.08.

51. Полякова О. Н., Тихонов В. В., Дзарданов А. Л., Боярский Д. А., Гольцман Г. Н. Диэлектрические характеристики рудных минералов в диапазоне частот 10–40 ГГц // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 22. С. 36–43.
52. Тихонов В. В., Полякова О. Н., Гольцман Г. Н., Дзарданов А. Л., Боярский Д. А. Определение диэлектрических характеристик рудных минералов в микроволновом диапазоне // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51. № 12. С. 1071–1080.
53. Полякова О. Н., Тихонов В. В., Дзарданов А. Л., Боярский Д. А., Гольцман Г. Н. Моделирование диэлектрических свойств горных пород, содержащих рудные минералы // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2009. Вып. 6. Т. 2. С. 62–65.
54. Тихонов В. В., Полякова О. Н., Боярский Д. А., Гольцман Г. Н. Применение метода микроволновой спектроскопии для повышения эффективности добычи металлических руд // 8-я Международ. научно-практич. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». 27–28.10.2009, Санкт-Петербург: Сб. тр. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2009. Т. 1. С. 320–321.
55. Tikhonov V. V., Boyarskii D. A., Polyakova O. N., Dzardanov A. L., Goltzman G. N. Radiophysical and Dielectric Properties of Ore Minerals in 12–145 GHz Frequency Range // Progress in Electromagnetics Research V. 2010. V. 25. P. 349–367.
56. Гершензон Е. М., Голант М. Б., Негирев А. А., Савельев К. С. Лампы обратной волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. М.: Радио и связь, 1985. 135 с.
57. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
58. Химмельблау Д. М. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 534 с.
59. 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.
60. Boyarskii D. A. Method of Retrieval of Media Structural Parameters from Frequency Dependence of Transmission Coefficient // Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'96): Proc. 1996. V. 2. P. 1349–1351.
61. Хунн Дж. Е. Зависимость электромагнитных характеристик почвы от влажности, плотности почвы и частоты // ТИИЭР. 1974. Т. 62. № 1. С. 122–127.
62. Boyarskii D. A., Tikhonov V. V., Komarova N. Yu. Model of Dielectric Constant of Bound Water in Soil for Applications of Microwave Remote Sensing // Progress in Electromagnetics Research. 2001. PIER 35. P. 251–270.
63. Шутко А. М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. 192 с.

## **Оглавление**

Введение .....	3
1. Методика измерений .....	5
1.1. Характеристики образцов минералов .....	5
1.2. Диапазон частот 12...38 ГГц .....	7
1.3. Диапазон частот 77...145 ГГц .....	9
2. Расчет диэлектрических характеристик .....	14
3. Обсуждение результатов .....	19
4. Исследование горных пород .....	29
5. Микроволновый способ разделения руд .....	32
Заключение .....	35
Литература .....	36