

УДК 537.8

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МИКРОВОЛНОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОРТИРОВКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУД

А. Л. Дзарданов<sup>1</sup>, В. В. Тихонов<sup>2</sup>, О. Н. Полякова<sup>1</sup>, В. В. Митяшкин<sup>3</sup>, М. В. Сидорова<sup>1</sup>,  
С. В. Антипов<sup>3</sup>, Г. Н. Гольцман<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский педагогический государственный университет,

<sup>2</sup> Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН

<sup>3</sup>ООО «Микроволновые технологии обогащения и сортировки руд»

Получена 3 октября 2013 г.

**Аннотация.** В работе приводятся результаты измерения отражательной способности образцов медной руды с высоким ( $> 3\%$ ) и низким ( $< 3\%$ ) процентным содержанием полезного минерала халькопирита в диапазоне частот 12-38 ГГц. Отличие отражательных способностей для «богатых» и «бедных» образцов руды было положено в основу метода сортировки медной руды с использованием микроволнового зондирования.

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

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг.

**Ключевые слова:** микроволновое излучение, отражательная способность, медная руда.

**Abstract:** The paper discusses results of reflectivity measurements of copper ore samples in the 12...38 GHz frequency range. The «rich» sample contains more than 3 % by weight of mineral chalcopyrite, and the "poor" sample contains less than 3 % by weight of one. The difference of reflection coefficients for "rich" and "poor" copper samples is used to create a sorting method of copper ore based on microwave probing.

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 FTP "Scientific and scientific-pedagogical personnel of innovative Russia" for 2009-2013 years.

**Key words:** microwave radiation, reflectivity, copper ore.

### **Введение**

В горнорудной промышленности многих стран мира назрела одна из масштабных проблем — истощение запасов полезных ископаемых и, в то же время, накопление огромного количества отходов горнорудной промышленности, содержащих полезные продукты [1, 2]. 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 [2-4]. 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), невозможность разделения немагнитных или слабомагнитных минералов (магнитные методы), невозможность разделения крупных кусков минералов (более 5 мм) и минералов с близкой электропроводностью (электрические методы), вредность для обслуживающего персонала (радиометрические методы), высокая себестоимость (большинство методов) и т.д. В связи с этим представляется перспективным исследование возможности

покусковой сепарации руды с использованием методов микроволнового зондирования. 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 0.001 Вт, что на 1-2 порядка меньше мощности излучения сотового телефона.

## 2. Результаты исследований

На основе проведенных исследований диэлектрических свойств минералов [5-7], 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  $< 3\%$ ).

Частотные зависимости отражательной  $R(f)$  способности плоскопараллельных образцов медной руды в диапазоне частот 12...38 ГГц измерялись на панорамном измерителе коэффициента стоячей волны и ослабления [5-7]: 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. (диапазон 12...17 ГГц). Для диапазона частот 25...38 ГГц использовался волноводный переход с ячейки № 1 на волновод размером 8\*3,6 мм. Схема экспериментальной

установки для измерения коэффициента стоячей волны и ослабления приведена на рис. 1.



Рис. 1. 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.

Толщина образцов медной руды была не менее 1 см., поэтому пропускательная способность составляла величину ниже 0.0001 во всем исследуемом диапазоне и прибором не фиксировалась.

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, которая является функцией физических параметров, составляющих среду компонент (диэлектрическая проницаемость, объемный фактор и др.) [8, 9]. Для определения эффективной диэлектрической проницаемости вещества (горной породы) была использована «рефракционная» модель, которая успешно используется при интерпретации данных дистанционного зондирования почвенного покрова и грунтов [10].

Расчет отражательной способности слоя горной породы проводился для различных объемных содержаний в среде рудных и нерудных минералов [6].

Сопоставление теоретических и экспериментальных зависимостей показало их хорошее соответствие. На рисунке 2 приведены экспериментальные и теоретические частотные зависимости отражательной способности для двух образцов медной руды - «богатой» и «бедной». 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 переотражение излучения, которое в модельных расчетах не учитываются.

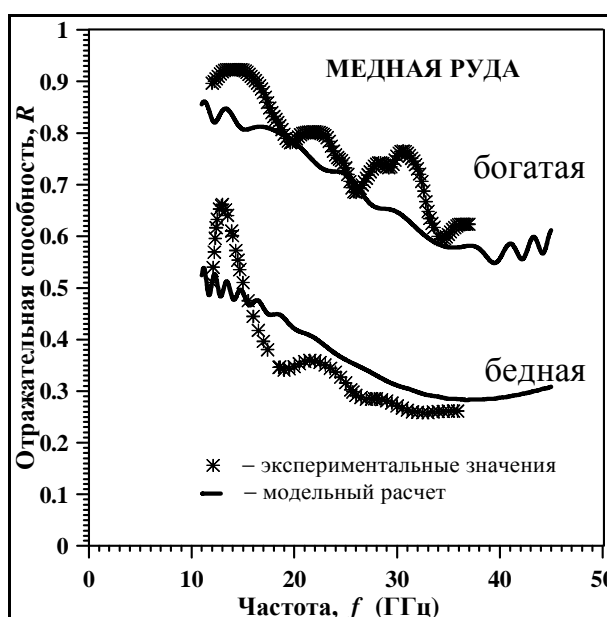


Рис.2 Частотные зависимости отражательной способности образцов медной руды.

На основе проведенных исследований, авторами был разработан и запатентован «Микроволновый способ разделения руд» [11]. Данное изобретение относится к способам контроля полезных ископаемых по количественному содержанию полезного компонента в них, и может быть использовано на горнорудных предприятиях.

Целью 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 по напряжению (КСВН) сигнала, отраженного от кусков руды. Разделение кусков руды по количеству полезной компоненты происходит путем сравнения измеренного КСВН отраженного сигнала с заданным значением КСВН.

На рисунке 3 показана схема сортировки руды по количественному содержанию полезного компонента в ней. Способ разделения руды по количественному содержанию полезного компонента в ней предусматривает подачу отдельных кусков (2) с ленты транспортера (1) в зону контроля, где располагается блок приемно-передающей системы (3) и исполнительный механизм (4). Облучение кусков руды непрерывным модулированным по амплитуде микроволновым излучением и измерение КСВН производится в блоке приемно-передающей системы.

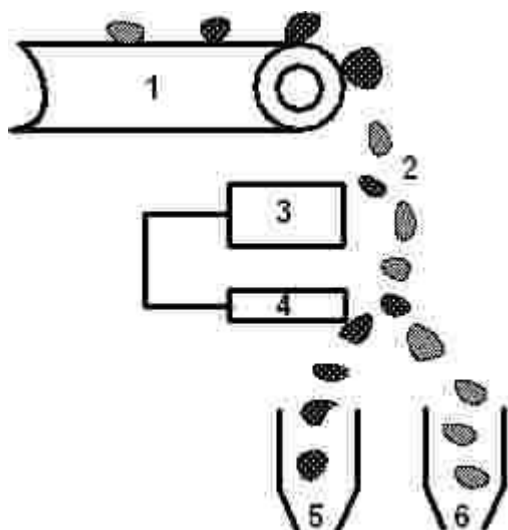


Рис. 2. Схема сортировки руды. 1 - транспортер, 2 - руда, 3 - приемно-передающая система, 4 - исполнительный механизм, 5 и 6 - бункеры.

Перед началом измерений производится калибровка. Измеряется КСВН нескольких образцов руды с различным содержанием полезного компонента в них, выбирается заданное значение КСВН. Далее в зону контроля с ленты

транспортера поступают сортируемые куски руды, измеряется КСВН данных кусков, проводится сравнение измеренного значения КСВН с заданным значением и подается сигнал на исполнительный механизм. Если измеренное значение КСВН больше порогового значения - кусок породы поступает в бункер 5, в противном случае - в бункер 6.

Изобретенный метод позволяет повысить скорость и качество сортировки полезных ископаемых за счет 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.

### **3. Выводы**

Техническими преимуществами предложенного способа перед известными являются следующие: интенсивность отраженного сигнала не зависит от облучаемой площади сортируемых кусков породы, что повышает точность сортировки; повышение быстродействия за счет непрерывной регистрации отраженного сигнала; а также 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.

Авторы высказывают искреннюю признательность компаниям ООО «ТЕХНОРОС» и ООО «РАДОС» г. Красноярска за предоставленные образцы минералов и горных пород. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 10-05-00037), а также при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы.

### **Литература**

1. Старостин В.И. Минерально-сырьевые ресурсы мира в третьем тысячелетии. // Соровский образовательный журнал, 2001. Т. 7. № 6. С. 48-55.

2. Чантурия В.А. Современные проблемы обогащения минерального сырья в России // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1999. № 3. С. 107-121.
3. Ревнивцев В.И., Азбель Е.И., Баранов Е.Г. и др. Под ред. В.И. Ревнивцева. Подготовка минерального сырья к обогащению и переработке. М.: «Недра», 1987. 307 с.
4. Леонов С.Б., Белькова О.Н. Исследование полезных ископаемых на обогатимость. М.: «Интермет инжиниринг», 2001. 631 с.
5. V. V. Tikhonov, D. A. Boyarskii, O. N. Polyakova, A. L. Dzardanov, and G. N. Gol'tsman. Radiophysical and Dielectric Properties of Ore Minerals in 12-145 GHz Frequency Range. // Progress In Electromagnetics Research B, 2010, Vol. 25, pp. 349-367.
6. Тихонов В.В., Боярский Д.А., Полякова О.Н., Дзарданов А.Л., Гольцман Г.Н. Лабораторные исследования радиофизических и диэлектрических свойств минералов и горных пород в микроволновом диапазоне. Препринт ИКИ РАН, Пр-2162, 2011, 40 стр.
7. А. Л. Дзарданов, В. В. Тихонов, Д. А. Боярский, О. Н. Полякова, Г. Н. Гольцман. Комплексный показатель преломления рудных минералов в микроволновом диапазоне. // Журнал Радиоэлектроники. 2012. № 10. 17 стр.
8. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: «Мир», 1986. 664 с.
9. 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.
10. Шутко А.М. СВЧ - радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: «Наука», 1986. 192 с.



11. 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. Опубликовано в бюллетене № 14 20.05.08.