

## **Тема «Мультимодальная микроскопия для определения характеристик руды»**

Современные микроскопы всех видов (оптические, электронные, сканирующие зонды) управляются программным обеспечением и имеют цифровое получение изображений. Эта настройка позволяет запускать многие интегрированные задачи под управлением процедур автоматизации, таких как, например, сканирование образцов и автоматическая фокусировка. Таким образом, можно объединить сканирование образцов, получение и хранение изображений, обработку, анализ и генерацию отчетов в одной процедуре.

В этом контексте мультимодальная микроскопия становится перспективной тенденцией. Мультимодальная микроскопия направлена на объединение дополнительных типов информации из данной выборки для создания многомерного набора данных. Метод генерирует многокомпонентные изображения, объединяя слои, полученные из разных методов микроскопии или из одного и того же микроскопа в различных условиях. Например, мультимодальная микроскопия может учитывать разные сигналы в сканирующей электронной микроскопии (SEM) и разные контрастные режимы в оптической микроскопии.

Ключевым этапом методологии мультимодальной микроскопии является регистрация изображений из заданного поля и / или набора полей. Регистрация изображения - это процесс наложения двух или более изображений одной и той же сцены, снятых в разных условиях или с разных датчиков.

Микроскопия руды является важным инструментом для характеристики руды. Как правило, анализ руды проводился в различных модальностях (стереоскопический, проходящий и отраженный свет, SEM и т. д.) для идентификации и количественного определения минералов, а также для определения минеральной текстуры и анализа выделения. Микроскопия проходящего и отраженного света, соответственно для прозрачных и непрозрачных минералов, является наиболее традиционными методами минералогической идентификации.

В течение последнего времени были разработаны и усовершенствованы разнообразные аналитические методы, основанные на различных свойствах минералов. Это такие свойства, как отражательная способность, цвет, отражающий плеохроизм, внутренние отражения, твердость, предпочтительная полировка, химическая реактивность, кристаллическая структура и кристаллическая текстура.

Однако для этих традиционных методов обычно требуется опытный минералог, и лишь немногие из них могут быть применены в автоматизированных системах. Таким образом, оптическая микроскопия оставалась в стороне в пользу SEM. На основе методов BSE и EDS были разработаны и запущены в эксплуатацию некоторые автоматизированные системы определения характеристик руды (Petruk, 1988; Sutherland &

Gottlieb, 1991; Gu, 2003). Эти системы специально разработаны для количественного анализа минералов. Они могут идентифицировать минералы, используя сигналы BSE и EDS, и выполнять процедуры количественной оценки с помощью интегрированного программного обеспечения для анализа изображений. Их возможности могут включать анализ частиц по частям, классификацию и количественную оценку минеральной фазы и анализ выделения минералов.

в методологиях определения характеристик руды. Фактически, в последние десятилетия исследования и разработки в области микроскопии в области прикладной минералогии были сфокусированы на СЭМ.

SEM является очень универсальным аналитическим инструментом. Он создает изображения посредством синхронизации сканирования электронным пучком из множества сигналов, которые поступают от взаимодействия электронного пучка с образцом. Таким образом, пиксели представляют интенсивности, пропорциональные сигналу, измеренному одним из детекторов SEM, таких как, например, детекторы обратно рассеянных электронов (BSE) или детекторы вторичных электронов (SE).

Наиболее используемым сигналом для характеристики руды является BSE, который может предоставить информацию о топографии и контраст атомного номера. Поэтому изображения BSE полированных образцов являются косвенно композиционными изображениями, в которых минеральные фазы могут быть соотнесены с характерными интенсивностями или уровнями серого, которые пропорциональны их средним атомным номерам.

На рисунке 1 показано изображение BSE железной руды, в котором можно распознать четыре фазы: смолу для засыпки (черный фон), кварц (темно-серый), гетит (серая частица в центре) и гематит (белый). В таблице 1 представлены химическая формула, цвет по RLM и среднее атомное число эпоксидной смолы и некоторых минералов.

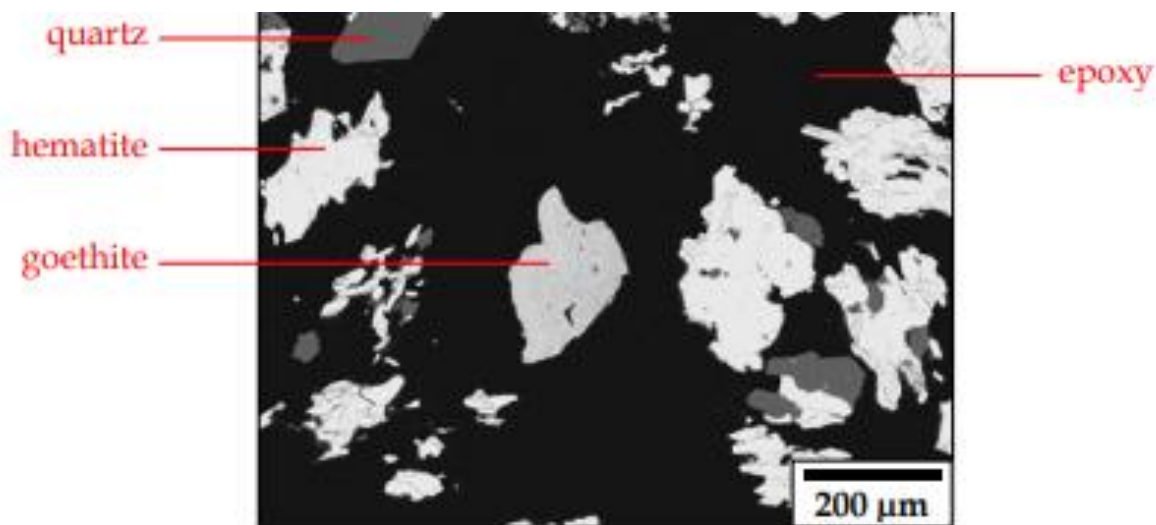


Рисунок 1 - изображение BSE железной руды

На основе методов BSE и EDS были разработаны и запущены в эксплуатацию некоторые автоматизированные системы определения характеристик руды (Petruk, 1988; Sutherland & Gottlieb, 1991; Gu, 2003). Эти системы специально разработаны для количественного анализа минералов. Они могут идентифицировать минералы, используя сигналы BSE и EDS, и выполнять процедуры количественной оценки с помощью интегрированного программного обеспечения для анализа изображений. Их возможности могут включать анализ частиц по частям, классификацию и количественную оценку минеральной фазы.

Таблица 1

Phase	Chemical formula	Colour on RLM	Average atomic number
Epoxy resin	$C_{21}H_{25}ClO_5$	Dark grey	7.90
Quartz	$SiO_2$	Dark grey	10.80
Goethite	$FeO.OH$	Grey / Brown	19.23
Hematite	$Fe_2O_3$	Light grey	20.59
Pyrite	$FeS_2$	Pale yellow	20.66
Magnetite	$Fe_3O_4$	Pinkish grey	21.02
Pentlandite	$(Fe,Ni)_9S_8$	Pale yellow	23.36
Chalcopyrite	$CuFeS_2$	Brass yellow	23.54
Covelline	$CuS$	Blue	24.64
Bornite	$Cu_5FeS_4$	Purple	25.34
Sphalerite	$ZnS$	Grey	25.39
Chalcocite	$Cu_2S$	Light grey	26.38
Native copper	$Cu$	Bright yellow	29.00

Тем не менее, в последние годы все шире используется оптическая микроскопия для определения характеристик руды. По сути, этому факту способствовали три факта: лучшая оптика, лучшие устройства для сбора цифровых изображений (Pirard, 1999) и появление цифровой микроскопии.

Цвет всегда был одним из наиболее важных свойств, используемых для идентификации минералов под микроскопом (Piller, 1966). Кроме того, есть некоторые важные минералы, которые не различимы в СЭМ, но могут различаться по цвету в микроскопе отраженного света, такие как, например, гематит и магнетит, которые являются основными железорудными минералами.

Гематит и магнетит имеют одинаковые средние атомные номера, соответственно, 20,59 и 21,02, и, следовательно, показывают сходные уровни серого на изображениях BSE, предотвращая их различие. Сегментация гематита и магнетита на изображениях такого типа требует сильного контраста изображения. Однако это контрастное условие позволяет избежать сегментации других существующих фаз. На практике даже системы на основе SEM для автоматизированной минералогии не могут различать гематит и магнетит, потому что различие этих минералов невозможно

посредством EDS из-за их сходного химического состава (Gomes & Paciornik, 2008).

С другой стороны, прозрачные минералы и заливочная смола, как правило, нельзя отличить по их зеркальной отражательной способности. Например, кварц и эпоксидная смола имеют практически одинаковую отражательную способность в спектре видимого света (Neumann & Stanley, 2008). На самом деле, это классическая проблема в рудной микроскопии, которая делает невозможным этот вид анализа с помощью микроскопии в отраженном свете.

На рисунке 2 показаны изображения образца железной руды, полученные с помощью микроскопии в отраженном свете и SEM. Сравнивая их, можно наблюдать, что сегментирование между кварцем и эпоксидной смолой в изображении BSE является простым, но оно не является столь очевидным в оптическом изображении.

С другой стороны, в оптическом изображении гематит и магнетит представляют различные цвета, соответственно светло-серый и розовато-серый, но имеют практически одинаковый уровень серого в изображении BSE.

Другой пример минералов со сложной диагностикой можно увидеть на рисунке 3. На нем показаны изображения того же поля образца медной руды, полученные с помощью микроскопии в отраженном свете и СЭМ. На оптическом изображении халькопирит может быть легко идентифицирован по его характерному латунному желтому цвету, но пирит и пентландит представляют очень похожий цвет (бледно-желтый). С другой стороны, на изображении BSE халькопирит и пентландит практически неразличимы из-за их одинаковых средних атомных номеров (23,54 и 23,36 соответственно). Тем не менее, пирит немного темнее пентландита, потому что пирит имеет более низкое среднее атомное число (20,66).

Для преодоления этих проблем балы разработан метод совместной микроскопии RLM-SEM. Эта методология помогает улучшить аналитическую способность SEM, добавляя информацию о зеркальном отражении (цвет) из RLM. Методология использовалась с некоторыми образцами минералов с целью различения фаз, которые не различимы ни RLM, ни сканирующим электронным микроскопам, но могут различаться посредством комбинированных техник.

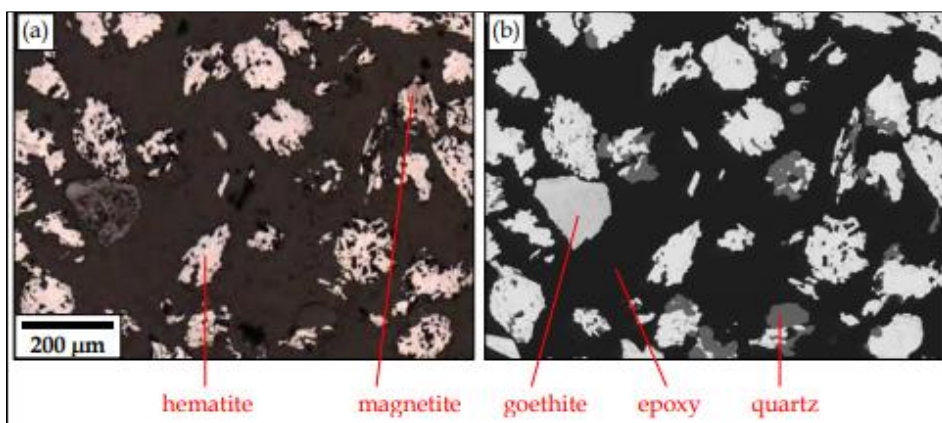


Fig. 2 Images of a iron ore sample acquired on (a) reflected light microscope and (b) SEM.

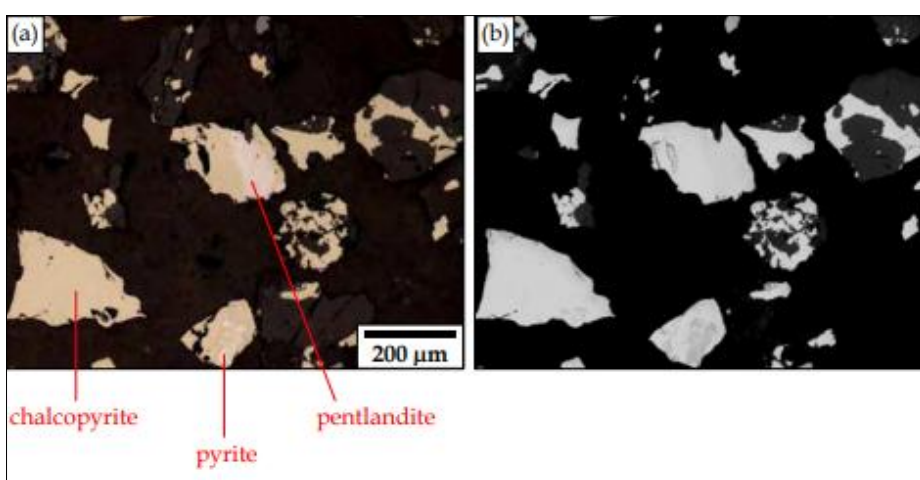


Fig. 3. Images of a copper ore sample acquired on (a) reflected light microscope and (b) SEM.

Совместная микроскопия RLM-SEM состоит из четырех последовательных этапов: получение изображения в RLM; получение изображения в SEM; постановка на учет; и обработка и анализ изображений. Поэтому при разработке совместной микроскопии RLM-SEM для обоих использованных микроскопов были реализованы автоматические процедуры для полевого сканирования и получения изображений.

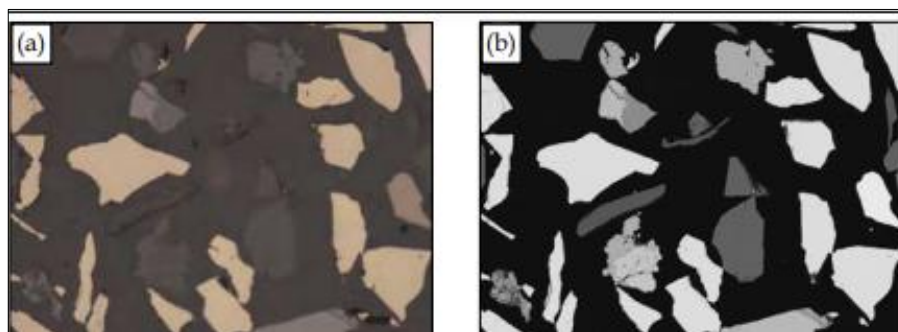


Рисунок 4. Изображения образца медной руды, полученного: а –RLM; в- SEM

Образец медной руды имеет сложную минералогию, состоящую в основном из тринадцати минералов, которые затем были взяты в качестве отдельных классов (кварц, три разных силиката, апатит, магнетит, пентландит, халькопирит, ковеллин, борнит, сфалерит, халькоцит и самородная медь). Помимо минеральных фаз в качестве класса была взята эпоксидная смола. Таким образом, этап обучения включал выборку пикселей из четырнадцати классов. На практике 6000 пикселей каждой фазы были интерактивно выбраны из нескольких изображений.

Обозначенные изображения RLM были преобразованы из RGB в цветовые системы. Результатом классификации было изображение уровня серого на поле, в котором каждая фаза была представлена отдельным уровнем серого. Таким образом, пиксели, классифицированные как первая фаза, имеют интенсивность один, пиксели, распознаваемые как вторая фаза, имеют интенсивность два и так далее. Следовательно, подходящая справочная таблица может быть применена для того, чтобы приписать разные псевдоцветы каждой фазе и, следовательно, облегчить их визуализацию.

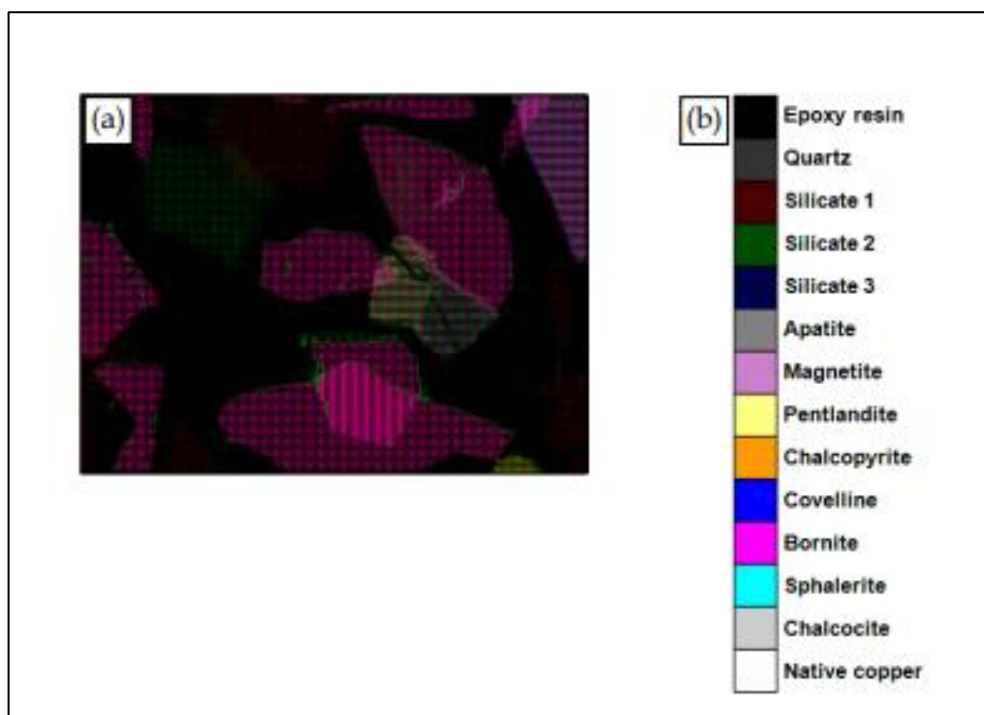


Рисунок 5 – Изображение образца медной руды, полученного методом RLM-SEM

Минералогический состав образца железной руды, представленного на анализ, был достаточно простой. Он состоял, в основном, из гематита, магнетита, гетита и кварца. Поэтому в данном тематическом исследовании были рассмотрены пять классов (эпоксидная смола, кварц, гетит, гематит и магнетит).

Процесс сегментации был разделен на две контролируемые процедуры классификации. Первая из них распознала эпоксидную смолу,

кварц, гетит и гематит-магнетитовую составную фазу посредством классификации пикселей на изображениях SEM с использованием интенсивности BSE в качестве функции в байесовском классификаторе.

Затем вторая процедура классификации позволила различить гематит и магнетит. Это было выполнено посредством классификации пикселей в составленных изображениях RLM-SEM. В этом случае их четыре компонента (R, G, B и интенсивность BSE) использовались в качестве признаков и использовался байесовский классификатор.

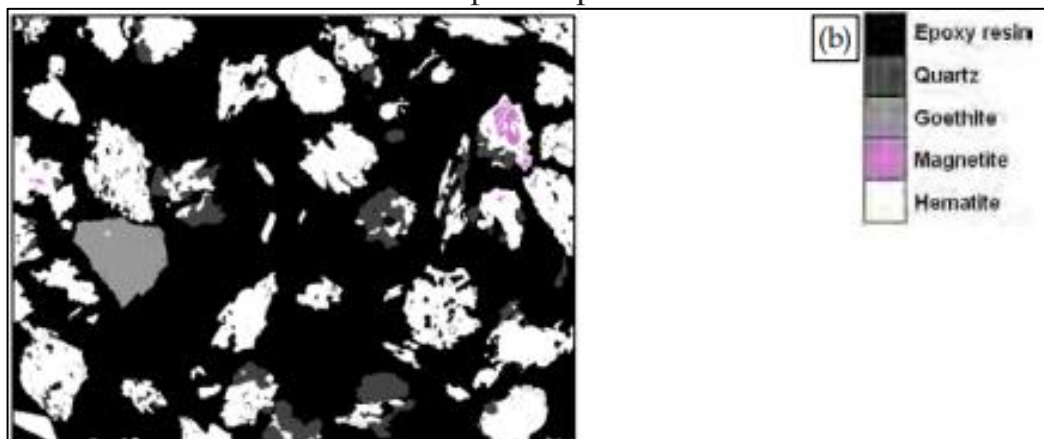


Рисунок 6 – изображение образца железной руды, полученного методом RLM-SEM

Информация от RLM и SEM представляет различные структуры и физические значения. Данные RLM состоят из вектора из трех 8-битных значений, которые обозначают зеркальное отражение в системе цветов RGB.

Мультимодальная микроскопия расширяет возможности традиционных методов микроскопии, улучшая распознавание минеральных фаз в рудах. Комбинируя оптическую микроскопию и сканирующую электронную микроскопию, она использует преимущества дополнительных контрастов, обеспечиваемых этими методами. Разработанный метод применим к другим материалам, для которых отдельные методы микроскопии не обеспечивают достаточного различия между соответствующими фазами.