

ЛИТЕРАТУРА

1. Гос. баланс РФ. 2006.
2. Трубецкой К.Н., Чантурия В.А., Тигунов Л.П. и др. Марганец: Минерально-сырьевая база СНГ. Добыча и обогащение руд. Москва: Изд. Академии горных наук, 1999. 271 с.
3. Тигунов Л.П., Смирнов Л.А., Менаджиева Р.А. Марганец: геология, производство, использование. Екатеринбург: Изд. АМБ, 2006. 184 с.
4. Тигунов Л.П., Ожогина Е.Г., Литвинцев Э.Г. и др. Современные технологии обогащения и гидрометаллургического передела марганцевых руд // Горный Журнал. 2007. № 2. С. 78-84.

МОРФОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ РУД ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОТОМОГРАФИИ

Якушина О.А., Сычева Н.А., Ожогина Е.Г.

ФГУП «ВИМС», Москва

Активный рост объемов промышленного производства, вызвавший резко возросшее потребление металлургической продукции, обусловил рост потребности в минеральном сырье. Минерально-сырьевая база России для металлургии в целом значительна, однако по целому ряду металлов, в том числе черных, руды характеризуются невысоким качеством, месторождения расположены в удаленных труднодоступных районах и чаще всего не обеспечены инфраструктурой добычи и транспортировки, перерабатывающими предприятиями. Это касается железорудных и, особенно, марганцеворудных месторождений. Для разведанных отечественных месторождений средние содержание железа в 1,5 -2 раза ниже среднемировых – 30-35%, по сравнению с 55-60%, а марганца - 20%, и менее технологичное, чем в зарубежных странах, в том числе и странах СНГ, поскольку в них содержится значительное количество фосфора и железа [1, 2, 7].

В настоящее время увеличение сырьевой базы страны по ряду металлов и обеспечение металлургических производств отечественным рентабельным сырьем черных металлов может быть достигнуто не только за счет переоценки запасов и подготовки к освоению резервных месторождений, но, прежде всего, разработкой новых схем комплексной технологической переработки руд, обеспечивающих извлечение всех полезных компонентов с минимальными потерями, без которых они не могут быть экономически рентабельно и максимально полно освоены. Это, в свою очередь, требует детального изучения вещественного состава руды в целях получения наиболее полной и достоверной информации о минеральном составе, который определяет качество и технологические характеристики руды, поведение минеральных фаз в процессах обогащения.

Рудоподготовительные процессы имеют принципиально важное значение при разработке современных технологий обогащения руд, обеспечивающих наиболее полное извлечение из них полезных фаз. Максимально возможное раскрытие минералов определяется, с одной стороны, их природными морфоструктурными характеристиками (гранулометрический состав, морфометрические параметры), с другой стороны – способами и методами дезинтеграции исходного материала [3, 8]. В современных условиях в промышленную переработку вовлекаются руды, в которых, как показывает опыт, рудные минералы имеют достаточно сложные морфоструктурные характеристики. Они отличаются не только тесным срастанием рудных фаз, как между собой (например, марганцевые руды), так и с породообразующими минералами, неравномерным, нередко достаточно тонким гранулометрическим составом, а также неоднородностью непосредственно зерен рудных минералов. Все эти факторы негативно влияют на раскрытие полезных фаз в процессе дезинтеграции руды. Поэтому сегодня вопросы определения характера раскрытия рудных минералов по-прежнему актуальны. Традиционно раскрытие минералов определяется методами оптической микроскопии и оценивается по количеству свободных зерен полезного минерала, богатых, рядовых и бедных сростков его с другими минералами. С внедрением в последней четверти прошлого века в практику минералого-технологической оценки минерального сырья автоматического оптико-геометрического анализа (автоматического анализа изображений) появилась возможность количественной оценки степени раскрытия минералов.

Во Всероссийском научно-исследовательском институте минерального сырья (ВИМС) накоплен значительный опыт исследований руд черных металлов ряда резервных месторождений железа и марганца Центральной, Восточной Сибири и Дальнего Востока, что позволило определить рациональный комплекс физических методов минералого-технологического изучения сырья для получения данных о фазовом составе, распределении полезных минералов, их морфометрических и гранулометрических характеристиках, характере срастаний [8]. Методы оптической микроскопии, в частности, требуют изготовления специальных препаратов (искусственных полированных шлифов), что, естественно, увеличивает время анализа. Нами была предпринята попытка введения в комплекс минералогических исследований относительно нового метода стереологического анализа – *рентгеновской томографии (РТ)*. Привлекательность метода для решения прикладных минералогических задач состоит в его неdestructивности и экспрессности (длительность анализа до 10 мин), простоте процедуры съемки, отсутствии этапа предварительной подготовки объекта (распиловка, изготовление полированных шлифов, напыление и др.), что позволяет оперативно получать информацию о неоднородности/поликомпонентности состава исследуемого вещества, морфометрических и гранулометрических характеристиках индивидов в их естественной взаимориентации.

Метод рентгеновской томографии, в мировой практике известный как X-ray CT (Computed Tomography), является разновидностью промышленной интроскопии, или дефектоскопии, применяемой изначально как инструмент неразрушающего контроля внутренних параметров исследуемого объекта для выявления наличия отклонения от однородности (дефектности). Применять метод для изучения геологических объектов было предложено в начале 1990-х гг. [10]. В основе метода рентгеновской томографии лежит реконструкция (восстановление) пространственного распределения величины линейного коэффициента ослабления (ЛКО) рентгеновского излучения в плоском слое объекта исследования на основе компьютерной математической обработки теневых проекций. Экспериментальные исследования выполнены на промышленном рентгеновском микротомографе ВТ-50-1 «Геотом» (ПРОМИНТРО, Россия), изготовленном специально для решения геологических задач. Условия съемки: источник рентгеновского излучения – микрофокусный рентгеновский аппарат типа РЕИС-150М, рабочее напряжение рентгеновской трубки $U = 100 \text{ kV}$, блок детекторов со сцинтилляторами CsJ (Na), шаг сканирования 3 мкм.

Исследование проводится в три этапа: 1) просвечивающая рентгенографическая съемка всего объекта (или его части) как предварительный анализ его внутреннего строения, 2) съемка томограммы по выбранному сечению в образце, 3) расчет экспериментальных и теоретических значений ЛКО для определения фаз и выявления микроструктурных параметров. Интерпретация результатов исследования, выявление особенностей распределения минеральных фаз (форма и размеры, характер сростаний и др.), осуществляется путем визуального и компьютерного анализа получаемых томограмм и расчета теоретических значений ЛКО (при расчетах задается элементный состав и плотность исследуемых фаз), сопоставляемых с данными предварительного минералогического изучения руд (пород). Выделение фазовой неоднородности проводится по оригинальной программе анализа изображений TomAnalysis [4]. Ход РТ-анализа и интерпретация результатов выполняется в соответствии с Методическими рекомендациями НСОММИ № 130 [5].

Применение метода рентгеновской томографии для определения морфоструктурных характеристик, определяющих раскрытие рудных минералов марганцевых (Усинского, Тынинского, Сейбинского, Кайгадатского), железных (Тагарского), титано-магнетитовых (Куранахского) месторождений позволяет сегодня говорить о перспективности метода, однако отсутствие отечественных серийных томографов, нацеленных на решение прикладных минералогических задач, обеспеченных нормативно-методической документацией, не способствует широкому внедрению РТ-анализа в практику минералогических работ, направленных, в том числе, на технологическую оценку минерального сырья.

Ниже остоно»ВИМС»я на примерах использования метода рентгеновской томографии для решения задач технологической минералогии железных и марганцевых руд.

Усинское месторождение марганцевых руд расположено в Кемеровской обл. в центральной части Кузнецкого Алатау является самым крупным в России – его балансовые запасы составляют 98,5 млн. т. Руды вулканогенно-осадочного генезиса, представлены карбонатным (родохрозитовые и манганокальцитовые) типом [11].

Рентгенотомографическим методом были определены минеральный состав, морфометрические и гранулометрические характеристики главных рудных минералов карбонатных руд. По диапазонам значений ЛКО (α_{Al}) в образцах установлено от 5 до 8 фаз (табл. 1, рис. 1, 2). С учетом минералогических данных, выделены: глинистые минералы, опал, кальцит, марганцовистый кальцит, манганокальцит, родохрозит, гидрооксиды и оксиды марганца. Фиксируется три фазы родохрозита, различающиеся по поглощению (α , равны 2,35-2,49; 2,62-2,73 и 2,80-2,87). Наиболее сильнопоглощающим является родохрозит I генерации, присутствующий в подчиненном количестве по отношению к родохрозиту II. Манганокальцит, судя по значениям ЛКО, представлен также тремя разновидностями, при этом наименьшее поглощение (α , 1,14-1,28) имеет манганокальцит, выполняющий прожилки, являющийся более поздним по времени образования. Манганокальцит первых двух разновидностей (α , 1,60-1,88 и α , 1,34-1,45) обычно встречается в тесной ассоциации. Области и зоны распространения слоистых алюмосиликатов (α , <0,60), индивиды оксидов и гидроксидов марганца (α , > 3,0).

Таблица 1

Данные РТ-анализа карбонатных марганцевых руд Усинского месторождения

Кл. крупн., мм	Выделяемые фазы и их α , (Al-бразец сравнения)									
-15 ÷ +10	0,37	0,60-0,76	1,10-1,25	1,41-1,45	1,78-1,92	2,11-1,30	2,35-2,44	2,80-2,87	3,02-3,06	>3,06
-10 ÷ +6		0,96-1,03	1,14-1,28	1,34-1,44	1,60 1,76-1,81	2,16-2,22	2,30-2,49	2,62-3,00	3,07; 3,70; 3,93; 4,31; 4,51; 4,72	5,73; 6,8; 10,80
-3,2 ÷ +1					1,62, 1,86-1,97	2,03-2,22		3,11	3,30-3,54	
Минералы	глинистые	кальцит, марганцовистый кальцит	манганокальцит-1	манганокальцит-2	родохрозит III генерации	родохрозит II генерации	родохрозит I генерации	оксиды и гидрооксиды Mn (зерна)		

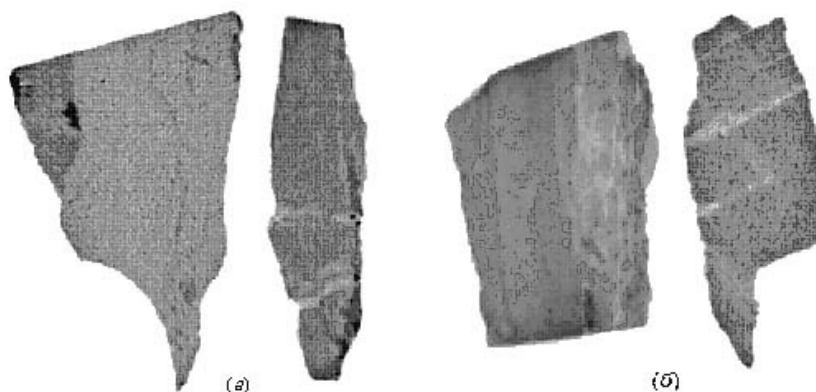


Рис. 1. Томограммы карбонатных марганцевых руд Усинского месторождения: (а) родохрозитовая руда и (б) манганокальцитовая руда; родохрозит I генерации темное, родохрозит II генерации серое, прожилки манганокальцита – светло-серое, гидроксиды марганца – черное.

Карбонатные руды вулканогенно-осадочного генезиса обычно содержат значительное количество силикатов марганца. В рудах Усинского месторождения содержание марганцевых силикатов, по данным рентгенографического анализа, достигает 20%. Особый интерес с технологической точки зрения представляют силикаты марганца тодорокит и пирохсмангит, образующие вкрапленность в главных рудных минералах – родохрозите и манганокальците. Рентгенотомографическим анализом с обработкой изображений по программе Tom-Analysis удалось установить не только содержание, но и характер распределения силикатов марганца в родохрозите и манганокальците, имеющих меньшее значения ЛКО ($a_s < 0,60$), чем эти минералы. Это имеет принципиально важное значение, т. к. оптическими методами в данном случае не всегда удастся различить эти минералы из-за близости их оптических свойств.

На рис 2. приведена томограмма зерна родохрозита гетерогенного строения. Основная часть зерна сложена родохрозитом II генерации (55,22%), в котором достаточно равномерно распределены силикаты марганца (9,58%). В родохрозите I генерации (34,23%) присутствуют лишь единичные включения гидроксидов марганца (1,09%). Полученные данные позволили однозначно решить вопрос о невозможности извлечения силикатов марганца из рудных карбонатных минералов механическими методами, т.к. их размеры не превышают первые десятки микрометров, фактор формы равен 0,89 (табл. 2).

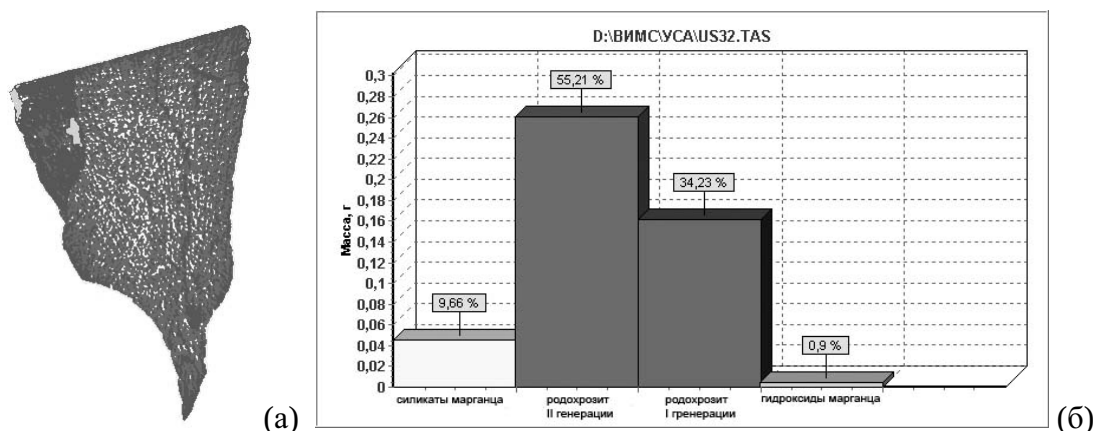


Рис. 2. Родохрозитовая руда Усинского месторождения, обработка по программе «TomAnalysis»: томограмма и гистограмма процентного соотношения выделенных фаз (родохрозит I генерации темное, родохрозит II генерации – серое, прожилки манганокальцита – светло-серое, гидроксиды марганца – черное).

Таблица 2

Пример расчета морфометрических параметров для родохрозита II генерации по программе «TomAnalysis», критерий выборки – площадь индивида

Морфометрические параметры				
Класс крупности, - 1 мм	Миним., мкм	Максим., мкм	Среднее, мкм	Среднеквадратичное отклонение
Площадь	900	900	900	0
Длина	30	30	30	0
Ширина	30	30	30	0
Периметр	120	120	120	0
Удлинение	1	1	1	0
Фактор формы	0,89	0,89	0,89	0
Компактность	1	1	1	0
Масса	0	0	0	0

Сейбинский рудный узел расположен в экономически хорошо освоенном Курагинском районе Красноярского края. Руды гипергенного генезиса. Минералогическими исследованиями установлено, что марганцевые руды имеют весьма сложный полиминеральный состав и неоднородное строение, что позволяет их отнести к категории труднообогатимых. Главными рудными минералами являются пиролюзит и минералы гр. псиломелана (криптомелан, псиломелан, голландит), содержание которых в руде достигает 65%. Главными породообразующими минералами являются кварц и слоистые алюмосиликаты, из железосодержащих фаз в руде отмечаются гетит, гидрогетит, иногда гематит и в весьма незначительном количестве пирит.

Для выявления особенностей распределения и характера взаимоотношения рудообразующих минералов в технологической пробе исходной руды на первом этапе лабораторного изучения был проведен рентгеномографический анализ. На томограммах (рис. 3) выделено от 6 до 12 фаз, причем их средняя размерность порядка 50-100 мкм: т.о. руды тонко-скрытокристаллические. Рудные фазы представлены минералами группы псиломелана с α выше 4,22, пиролюзита α 3,20-3,90, гематитом α 2,5-2,7, гетитом и гидрогетитом α 1,60-2,3 и 1,4-1,5 соответственно; нерудные фазы представлены глинистым минералами α 1,2-1,36 и менее 0,70; кварцем α 0,9, установлены отдельные зерна пирита с α 4,0-4,08

Таблица 3

Данные РТ-анализа марганцевых руд Сейбинского месторождения

Образец,	Выделяемые фазы и их α (к Al – образцу сравнения)											
2-11_1	<0,65	1,03	1,36	1,49	1,85	2,27		3,14				
2-11_2	<0,50	0,79	1,28		1,84			3,10				
3-3_1	<0,50	0,95	1,24						3,59-3,77		4,22	4,63-5,09
3-3_2	<0,55	1,00				2,37		3,26				5,22; 7,09
4-6_1	<0,64	0,90	1,35			2,24			3,63	4,08	4,50-4,58	
4-6_2	<0,40	0,98	1,35	1,45	1,61	2,25-2,34		3,30	3,58-3,88		4,40	
5-1_1	<0,70	0,93	1,34		1,72		2,68		3,55			
5-1_2	<0,65		1,30		1,70		2,60		3,53			
6-8_1	<0,50	0,92	1,33		1,58	2,11	2,56	3,36	3,60	4,00	4,34	6,66
6-8_2	<0,70	0,90	1,34		1,75		2,47-2,57	3,10	3,76-3,81		4,25-4,30	5,35
Минералы	монтмориллонит	кварц	глинистые	гидрогетит	гетит	гематит	пиролюзит	пирит	минералы гр. псиломелана			

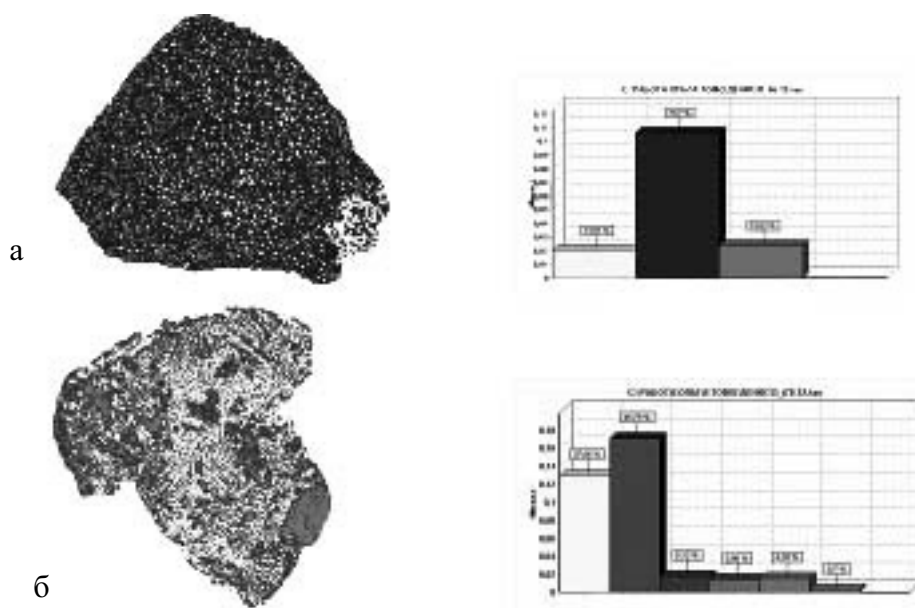


Рис. 3. Томограммы марганцевой руды Сейбинского месторождения: обработка по «TomAnalysis», и гистограммы процентного соотношения выделенных фаз (белое – кварц, серое – гидроксиды железа, черное – пиролюзит, темно-серое – минералы гр.псиломелана).

Судя по практически равномерной тонкой вкрапленности кварца и гидроксидов железа в марганцевом агрегате (рис. 3а) можно однозначно говорить о невозможности избавиться от них физическими методами обогащения. Характер взаимоотношения непосредственно марганцевых фаз (рис. 3б) определяет невозможность селективного разделения конкретных марганцевых минералов, что усугубляется и близостью их физических свойств. В тоже время структурные взаимоотношения минералов в руде указывают на перспективность методов химического обогащения.

Тагарское железорудное месторождение является наиболее крупным месторождением, как в составе Кодинской группы, так и в Средне-Ангарском районе Красноярского края. Промышленные скопления руды сосредоточены в гидротермально измененных и скарнированных кембрийских карбонатных толщах, приуроченных к зонам контакта секущих тел траппов и дорудных метасоматитов.

Данные рентгенотомографического анализа полностью подтвердили результаты петрографического и минераграфического исследования основных минеральных типов руд: магнетитового, магнетит-маггемит-мартитового и гетит-гидрогетитового. В то же время методом РТ-анализа удалось проследить характер мартитизации в природных агрегатах (рис. 4), обуславливающей в определенной степени неоднородность магнетита.

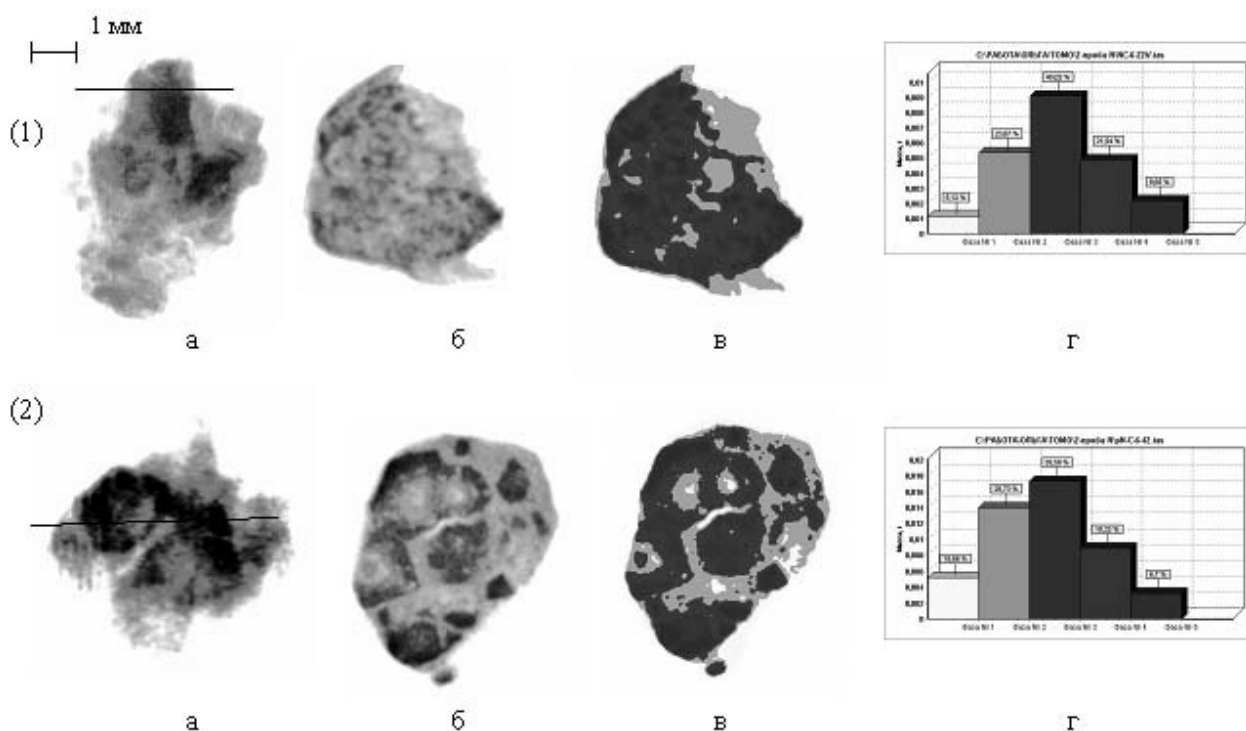


Рис. 4. Мартитизация магнетита, Тагарское месторождение: а) рентгенограмма, указана линия сечения, б) томограмма, в) обработка по программе «TomAnalysis», г) гистограмма процентного соотношения выделенных фаз.

На томограммах четко фиксируется несколько фаз, из которых главными являются магнетит, маггемит и гематит. Вероятно, частичное окисление магнетита первоначально приводит к образованию сильномагнитного минерала маггемита $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, диагностируемого рентгенографическим и минераграфическим анализами. Маггемит образуется как переходная фаза от магнетита к гематиту, поскольку маггемит, как и магнетит, имеет структуру типа шпинели, однако по составу соответствует гематиту, поэтому окисление магнетита до маггемита не потребует затрат энергии на преобразование структуры минерала. Окисление магнетита происходит локально, не во всем объеме минерала, что фиксируется на томограммах в виде «пятнистых» участков изменения ЛКО.

Рентгенотомографический анализ также подтвердил текстурную неоднородность рудных агрегатов, связанную с тесным срастанием рудообразующих фаз, которая негативно влияет на полное раскрытие, в частности, магнетита. Следует отметить, что специфические особенности состава и строения изученных руд создают определенные методические трудности в определении их морфоструктурных характеристик.

Проведенные исследования позволяют говорить о перспективности введения рентгенотомографического анализа в комплекс минералогических методов технологической оценки руд черных металлов. Использование РТ на начальном этапе лабораторных исследований позволяет получать оперативную информацию о составе руд, определять основные морфометрические и гранулометрические

характеристики минералов и давать прогнозную оценку минерального сырья на всех стадиях его изучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геологическое изучение и использование недр. Информационный сборник, М.: Геоинформцентр, 2003. Вып. 5, 6. С.38-53.
2. Козловский Е.А. Минерально-сырьевые проблемы России накануне XXI века. М.: Русский биографический ин-т, 1999. 401 с.
3. Изюмко В.М. Технологическая минералогия и оценка руд. СПб.: Наука, 1997.
4. Исследование фазовой и структурно-текстурной микронеоднородности объектов методом рентгеновской микротомографии // Методические рекомендации № 130 / Утверждены НСОММИ. М.: ВНИИГеосистем, 1999. 53 с.
5. Инструкция для пользователя по обработке изображений с помощью программы «TomAnalysis» // Утверждена ГНЦ РФ ВНИИГеосистем. М.: ВНИИГеосистем, 2003, 44 с.
6. Марганец // Под ред. акад. К.Н. Трубецкого. М.: Изд-во Акад. Горн. Наук, 1999, 271 с.
7. Новые минерально-сырьевые металлургические комплексы России (краткий обзор) / Под ред. Г.А. Машковцева. М.: «ВИМС», 2007, 44 с.
8. Ожогина Е.Г., Rogozhin A.A. Применение комплекса минералого-аналитических методов для технологической оценки руд черных и цветных металлов // Разведка и охрана недр. 2005. №4. С. 33-36.
9. Рентгенотомографический анализ карбонатных марганцевых руд. Методические рекомендации № 146 // Утверждены НСОММИ / Составители: Якушина О.А., Ожогина Е.Г., Броницкая Е.С., Козорезов Е.В., Хозяинов М.С. М.: «ВИМС». 2001. 19 с.
10. Хозяинов М.С., Вайнберг Э.И. Вычислительная микротомография – новая информационная технология неразрушающего исследования внутренней микроструктуры образцов геологических пород // Геоинформатика. 1992. №1. С. 42-50.
11. Якушина О.А., Ожогина Е.Г., Кузьмин В.И., Хозяинов М.С. Рентгенотомографический анализ карбонатных марганцевых руд. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2002. Т. 68. № 8. С. 26-31.
12. Якушина О.А., Ожогина Е.Г., Хозяинов М.С. Минералого-технологическая оценка карбонатных марганцевых руд с помощью рентгенотомографического анализа // Геоинформатика. 2002. № 4. С. 28-31.

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ПРОГНОЗНОЙ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА СЫРЬЯ (НА ПРИМЕРЕ СКАРНОВО-МАГНЕТИТОВОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ А4, ПРИПОЛЯРНЫЙ УРАЛ)

Файнштейн Г.Г.¹, Кузьмин В.И.¹, Комарицкий С.И.², Корепанов В.Б.²

¹ ФГУП «ВИМС», г. Москва; ² ОАО «Сосьвапромгеология»

На ранних поисково-оценочных стадиях изучения потенциального рудно-сырьевого объекта важно оценить качество сырья, поскольку целесообразность выполнения всего высокзатратного комплекса геологоразведочных работ для перевода рудопроявления в ранг промышленного месторождения во многом определяется экономически эффективной переработкой руды с получением кондиционных продуктов. Минералого-аналитические исследования проб, отобранных из вскрытых рудных тел, позволяют обоснованно дать такую прогнозную оценку.

Подобные исследования нами были проведены на малообъемных пробах скарно-магнетитового рудопроявления А-4. Объект расположен в Березовском районе Ханты-Мансийского автономного округа, в среднем течении реки Охтля, на северо-восточном и восточном склонах высотной отметки 388,7 м. Рудопроявление находится в непосредственной близости от проектируемой трассы железной дороги «Урал Промышленный - Урал Полярный». Это определяет его благоприятное экономико-географическое положение в связи с возможностью эффективного решения транспортных проблем при промышленной отработке месторождения в случае его положительной геологической оценки. В настоящее время на рудопроявлении предприятие ОАО «Сосьвапромгеология» проводит поисково-оценочные работы. Одновременно перед «ВИМС» была поставлена задача установления качества руд - важнейшего фактора, определяющего промышленную ценность рудно-сырьевого объекта.

Рудопроявление А-4 находится в Восточно-Уральской зоне, в восточной части Салатимской структурно-формационной подзоны. Как и многие другие рудные объекты восточного склона Урала, разведываемый участок приурочен к сложно дислоцированным зеленокаменным образованиям нижнепалеозойской рифтогенной формации ордовикско-нижнесилурийского времени заложения. Последующие преобразования в районе, вплоть до нижнедевонского времени, определялись процессами