

Таким образом, установлена возможность снижения скорости и величины извлечения фосфора в водную среду в результате механохимического синтеза алюмофосфатного комплекса, что явилось основой создания нового фосфор-цеолитного удобрения пролонгированного действия.

В заключении с полным основанием можно рекомендовать изложенные механохимические процессы для укрупненных и полупромышленных исследований.

Таблица 3. Влияние механической активации цеолит-фосфатной смеси на содержание водо- и лимоннорастворимых форм P_2O_5

Состав смеси, %		Время активации, мин.	Извлечение P_2O_5 , %	
Цеолит	Фосфат кальция		В раствор лимонной кислоты	В водную среду
-	100	-	45.3	40.4
-	100	2	47.0	37.6
-	100	5	42.8	33.8
80	20	2	46.3	11.6
80	20	5	48.4	6.0
70	30	0.5	45.0	34.1
70	30	1	43.5	33.7
70	30	2	46.1	15.3
70	30	5	44.2	7.2
70	30	10	45.0	4.3
50	50	0.5	45.3	37.0
50	50	1	45.1	35.4
50	50	2	44.0	21.3
50	50	5	46.2	9.1
50	50	10	45.1	4.8

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рибиндер П.А.* Новая технология дисперсных материалов. Избранные труды. Физико-химическая механика. М.: Наука, 1979. С. 336-347.
2. *Ходаков Г.С.* Физика измельчения. М.: Наука, 1972. 207 с.
3. *Молчанов В.И., Юсупов Т.С.* Физические и химические свойства тонкодиспергированных минералов. М.: Наука, 1981. 160 с.
4. *Юсупов Т.С.* Технологическая минералогия // Горные науки, освоение и сохранение недр земли. М.: Из-во Академии горных наук, 1997. С. 392-411.
5. *Болдырев В.В., Авакумов Е.Г.* Механохимия твердых неорганических веществ // Успехи химии. 1971. Т. 40. С. 1835-1856.
6. *Ляхов Н.З., Болдырев В.В.* Механохимия неорганических веществ. Анализ факторов, интенсифицирующих химический процесс. Изв. СО АН СССР. 1983. № 12. Сер. хим. наук. Вып. 5. С. 3-8.
7. *Лаптева Е.С., Юсупов Т.С., Бергер А.С.* Физико-химические изменения слоистых силикатов в процессах механической активации. Новосибирск: Наука, 1981. 87 с.
8. *Юсупов Т.С., Королева С.М., Щербакова М.Я.* К проблеме направленного изменения флотуемости минералов на основе механических воздействий. ФТПРПИ: Из-во «Наука», Сиб. отд., 1987. № 5. С. 94-97.
9. *Чайкина М.В.* Механохимия взаимодействия природных цеолитов с фосфатами кальция. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2002.
10. *Юсупов Т.С., Шумская Л.Г., Болдырев В.В.* Механохимическое взаимодействие природных цеолитов с фосфатами кальция. Док. АН, 1999. Т. 364. № 4. С. 508-511.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РУД ПРИ СОЗДАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИХ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ

Ожогина Е.Г., Рогожин А.А.

ФГУП «ВИМС», г. Москва

Главными проблемами недропользования сегодня являются истощение запасов богатых руд и вынужденное вовлечение в переработку низкокачественного минерального сырья как природного, так и

техногенного происхождения. При этом постоянно ужесточаются требования к экологической безопасности горнодобывающих и горноперерабатывающих производств. В связи с этим резко возрастает роль минералого-аналитических исследований руд, позволяющих проводить их технологическую оценку на всех стадиях геологоразведочных работ, а также при геолого-экономической переоценке месторождений полезных ископаемых. В рамках технологической оценки минерального сырья обычно проводится прогнозирование экономически обоснованной целесообразности его вовлечения в переработку на современном этапе развития технологий, методы обогащения, качество ожидаемых продуктов, контроль эффективности перерабатывающего производства и управления им, определение экологических последствий переработки и природоохранные мероприятия.

Прикладные минералогические исследования полезных ископаемых в настоящее время отличаются от аналогичных минералогических работ второй половины прошлого века. Это обусловлено в первую очередь существенным прогрессом в научном, методическом, техническом и инструментально-аппаратурном обеспечении минералого-аналитических исследований природных и техногенных объектов и технологий их переработки (развитие информационных компьютерных технологий, создание новых поколений аналитической и технологической аппаратуры, развитие нанотехнологий и пр.). Также следует учитывать, что постоянно возрастающая интеграция России в мировую экономическую систему привела к необходимости соблюдения международных стандартов и норм при выполнении измерений и сертификации продукции.

Во Всероссийском научно-исследовательском институте минерального сырья на протяжении нескольких десятилетий создаются технологии переработки руд черных, легирующих, редких, благородных металлов, нерудного сырья, базирующиеся на глубоком изучении их вещественного состава. Поэтому сегодня совершенно четко сформировались основные направления минералогических работ:

- прогнозная оценка технологических свойств минерального сырья, включая прогноз экологических показателей освоения месторождений;
- оценка эффективности перерабатывающего производства и управление производством
 - входной контроль сырья и реагентов,
 - операционный контроль – контроль продуктов на всех стадиях технологического процесса,
 - контроль качества товарной продукции и отходов производства;
- оценка экологических последствий передела сырья (производственный экологический контроль);
- оценка технологической безопасности предприятия.

В зависимости от вида сырья и характера необходимой информации применяются определенные методы минералогического и химического анализов. В связи с тем, что в последние годы технологи нередко сталкиваются с практически небогатимыми и труднобогатимыми рудами, отличающимися полиминеральным составом, сложным текстурно-структурным рисунком, высокой дисперсностью, гетерогенностью промышленно ценных минералов, близостью физических свойств рудных и породообразующих минералов, используется комплекс методов, в который обычно входят оптическая микроскопия, рентгенография и химический анализ. Остальные методы применяются по мере необходимости для решения конкретных вопросов. Как показывает опыт, определение технологических свойств (плотность, микротвердость, удельная магнитная восприимчивость и др.) конкретных минералов успешно можно проводить минералогическими методами.

При важности всех направлений минералогических исследований руд при создании технологий их переработки главным является оценка технологических свойств минерального сырья. Это связано с тем, что содержание в рудах компонентов (химический состав) не может в полной мере определить технологию их переработки. На обогатимость руд влияют минеральный состав, морфоструктурные параметры, в том числе гранулометрический состав и морфометрические характеристики рудных минералов, реальный состав минеральных фаз, определяющий распределение полезных компонентов (поминеральный баланс), их строение и физические (технологические) свойства.

Сегодня можно говорить об оценке технологических свойств как в рамках минералогического обеспечения разрабатываемых технологий переработки руд, так и о прогнозной технологической оценке сырья методами прикладной минералогии. В первом случае это полноценное изучение исходных руд комплексом минералого-аналитических методов, позволяющее получить надежную всестороннюю информацию о сырье. Как правило, такие исследования подтверждены технологическими испытаниями и отличаются детальностью. При этом исследованию подвергаются продукты обогащения, что позволяет определять их качество и при необходимости вносить коррективы в разрабатываемые технологии. Следует также отметить, что при минералогическом изучении продуктов обогащения можно получить более значимую информацию о составе и строении рудообразующих минералов, чем при изучении исходной руды в целом.

Прогнозная технологическая оценка руд на ранних стадиях ГРП проводится на ограниченном по массе материале (масса проб составляет 5-20 кг) и предусматривает проведение минералогических исследований, не сопровождающихся технологическими испытаниями. Как правило, такие исследования не включают глубокого изучения материала и проводятся в сжатые сроки. Однако они позволяют определить качество сырья и в общих чертах прогнозировать его поведение в технологических процессах. Это в свою очередь способствует определению промышленной ценности месторождения и (или) рудопроявления. Следует отметить, что в последние годы количество таких работ в значительной степени увеличилось. В первую очередь это связано с

открытием мелких проявлений в основном руд черных металлов (марганцевых, железных и хромовых), которые возможно не будут иметь в дальнейшем промышленного значения.

В качестве примера минералогического изучения руд при разработке технологии их обогащения рассмотрим железомарганцевую руду Кайгадатского месторождения (Кузнецкий Алатау, верховье р. Б. Кайгодат), отобранную по всей мощности рудного тела № П-2.

Руда красно-коричневого и сургучного цвета характеризуется плотным монолитным сложением. Первичная текстура руды массивная и лишь местами отмечается тонкая прерывистая и линзовидная слоистость, обусловленная наличием слоев в различной степени обогащенных гематитом. Для руд типичны вторичные (наложенные) текстуры: прожилковые и вкрапленные. Основная масса прожилков, а также многочисленные вкрапленники, имеющие различные размеры и формы, сложены манганокальцитом. Значительно реже отмечаются тонкие прожилки гидроксидов железа.

Структура руды тонко-скрытокристаллическая. Прожилки выполнены разномасштабным (от мелко- до крупнокристаллического) материалом пан- и гипидиоморфнозернистого строения. Иногда в карбонатных прожилках наблюдаются сферолитовые структуры.

Содержание марганца в пробе составляет 9,24% (MnO-11,93%), железа 14,23% (Fe₂O₃-20,34%), в значительном количестве присутствует кремнезем (40,25%), а также глинозем (6,59%) и оксид кальция (7,84%). Содержание фосфора составляет 0,04%.

Руда имеет сложный полиминеральный состав. Рудообразующие минералы образуют тонкие срастания друг с другом за исключением вторичных минеральных фаз (карбонатов и реже гидроксидов марганца), которые присутствуют в индивидуализированных зернах. Поэтому идентификация отдельных минералов методами оптической микроскопии практически невозможна. Комплексирование минералогических методов, среди которых ведущее место занимал рентгенографический анализ, позволило определить минеральный состав данной пробы. Главным рудным минералом является гематит, содержание которого составляет 17%. Марганцевые минералы, представленные якобитом (6%), манганитом (5%), гаусманитом (2%), пироксмангитом (5%), манганокальцитом (3%) и тодорокитом (3%), относятся к категории второстепенных. В пробе содержится значительное количество породообразующих минералов: кварца (17%), опала и халцедона (17%), полевого шпата (12%), в подчиненном количестве встречаются эпидот (5%), гранат (5%), пироксен (3%). В продуктах обогащения обнаружены также родонит, бементит, фриделит, доломит, магнетит, хёгбомит (ильмено-корунд), пентландит, самородная медь, хлорит.

Главный рудный минерал гематит, а не браунит, как было принято до сих пор считать [1], образует тонкие срастания как с минералами марганца (якобитом, манганитом и пироксмангитом), так и породообразующими фазами (кварц, опал, халцедон). Рентгенографическим анализом установлено, что гематит имеет межплоскостные расстояния выше, чем обычно, присущие гематиту, прокаленному при 800°C в течение трех дней (33-664 ICPSDS, 1974), т.е. гематиту без значимых изоморфных примесей.

Исследование агрегатов существенно гематитового состава методом растровой электронной микроскопии с энергодисперсионной приставкой подтвердило их гетерогенный состав. Отмечено постоянное присутствие кварца, реже опала, якобита и пироксмангита, эпизодически встречаются и другие примесные фазы. Судя по энергодисперсионному спектру, такие агрегаты имеют кремнисто-железо-марганцевый состав (с переменным содержанием основных компонентов) и обычно в незначительном количестве содержат титан, кальций, медь, хром, алюминий и калий.

В кварц-гематитовой матрице иногда наблюдаются индивидуализированные зерна якобита размером менее 0,03 мм, имеющие гипидиоморфную форму. Диагностика якобита проведена рентгенографическим анализом по следующим межплоскостным расстояниям (d, Å): 4,9₍₁₀₎, 3,0₍₄₀₎, 2,56₍₁₀₀₎, 2,127₍₂₀₎, 1,630₍₂₀₎, 1,50₍₃₀₎. Плотность якобита 4,81-4,84 г/см³, удельная магнитная восприимчивость 187·10⁻⁸ м³/кг, точка Кюри соответствует 300°C (изучение проведено на фракционированном по магнитным свойствам материале).

При изучении магнитных свойств якобита обнаружено, что в тесной ассоциации с ним присутствует минерал, также обладающий структурой шпинели, но имеющий значительно более высокую точку Кюри (>750o). Детальные рентгенографические исследования позволили идентифицировать эту фазу, как хёгбомит (ильмено-корунд). На дифрактограммах хёгбомит проявляется следующими межплоскостными расстояниями (d, Å): 2,45(30), 2,44(100), 2,36(30), 2,08(50). Хёгбомит в рудах Кайгадатского месторождения идентифицирован впервые. Однако, известно, что он присутствует в марганцевых рудах в древней метаморфической толще хр. Прелужного (Украина) в ассоциации с бементитом, эпидотом и манганокальцитом [2].

В якобитовых агрегатах присутствует гаусманит, определенный рентгенографическим анализом. Тонкие срастания гаусманита и якобита (вреденбургит), вероятно, представляют собой продукт распада твердого раствора.

Впервые в рудах этого месторождения установлен манганит, представленный тонко-скрытокристаллическим агрегатом, в котором редко фиксируются отдельные зерна призматической формы размером менее 0,02 мм. Надежная диагностика манганита проведена рентгенографическим анализом по наличию на дифрактограммах следующих межплоскостных расстояний (d, Å): 3,40₍₁₀₀₎, 2,64₍₆₀₎, 2,40₍₃₀₎, 1,67₍₃₀₎. Плотность манганита 3,95-4,02 г/см³.

Силикаты марганца, типичные для метаморфогенных руд, прежде всего, представлены пироксмангитом, присутствующим в кварц (опал)-гематитовой матрице в виде бесцветных пластинчатых кристаллов размером 0,054-0,082 мм. Плотность пироксмангита 3,66-3,68 г/см³.

Многочисленные разноориентированные прожилки, секущие руду, выполнены разнозернистым (от тонко-до крупнокристаллического) манганокальцитом, зерна которого имеют ромбоэдрическую, скалеоноэдрическую, призматическую и ксеноморфную форму. Реже отмечаются сферолиты и их фрагменты. Плотность манганокальцита варьирует от 2,75 г/см³ до 2,86 г/см³. Разброс значений плотности, вероятно, связан с изменяющимся количеством марганца в структуре минерала.

Породообразующие минералы (кварц, опал, халцедон), с одной стороны, входят в состав обломков яшм и кремнистых пород, с другой стороны, тесно ассоциируют с рудными минералами. Все эти фазы в значительной степени ожелезнены, за счет чего имеют красноватый или сургучно-красный цвет. Обломки кремнистых пород характеризуются массивной и тонкослоистой текстурой и тонко- и скрытокристаллическим строением. Обломки кварца размером менее 0,1 мм в различной степени корродированы и замещены гематитом, за счет чего нередко имеют заливообразные очертания. Полевой шпат, представленный плагиоклазом (альбит-анортитом), входит в основном в состав обломков мелко-тонкокристаллических полевошпатово-кварцевых пород. Непосредственно в железо-марганцевой руде плагиоклаз практически не присутствует.

Текстурно-структурные особенности и полиминеральный состав руды не позволяют с уверенностью говорить об уровне раскрытия конкретных рудных минералов в разных классах дезинтегрированной пробы. Нами предпринята попытка оценить степень раскрытия главного рудного минерала гематита с помощью оптико-геометрического анализа. В качестве примера исследовалась железомарганцевая руда с содержанием гематита 15,43%. Размер зерен гематита изменяется от 0,001 мм до 0,019 мм. Основная часть индивидуализированных зерен гематита (81,42%) сосредоточена в материале крупностью менее 0,005 мм. В классе $-0,01+0,005$ мм концентрируется 12,65% зерен гематита. Около 12% зерен гематита приходится на класс крупности $-0,044+0,01$ мм. Помимо того, что зерна гематита весьма мелкие, они к тому же характеризуются высокой степенью изрезанности границ (2,38), что обуславливает сложный характер сростаний гематита с другими минералами. Именно поэтому в продуктах дробления и измельчения, даже в тонких классах присутствуют гетерогенные минеральные агрегаты – сростки гематита с марганцевыми и силикатными минералами. Зерна гематита имеют удлинение (1,97), выше среднего (1,4-1,8), что, вероятно, связано с природными морфологическими особенностями минерала, в частности, преобладанием таблитчатых и пластинчатых кристаллов.

Минералогическими исследованиями, проведенными комплексом современных методов выявлены особенности вещественного состава руд Кайгадатского месторождения, образовавшихся вулканогенно-осадочным путем и претерпевших значительные изменения в процессе метаморфизма [1], что в значительной степени определило качество и технологические свойства этих руд.

Полиминеральный состав руд, сложенный более чем двадцатью минералами, тесно ассоциирующими друг с другом, в том числе несколькими марганцевыми минералами, присутствующими в незначительном количестве, и их текстурно-структурный рисунок, в том числе гранулометрические и морфометрические характеристики главного рудного минерала – гематита (более 80% зерен этого минерала имеет размер менее 5 мкм и характеризуется высокой степенью изрезанности границ), позволяют априорно говорить о невозможности обогащения этих руд механическими методами. Данные минералогических исследований полностью подтвердились технологическими испытаниями, проведенными в ВИМСе.

В то же время бедные железо-марганцевые руды Кайгадатского месторождения оказались пригодными для плавки ферросилиция. Извлечение марганца в сплав составило около 90%. Полученные на основе руды Кайгадатского месторождения в промышленных условиях сплавы ферросилиция были успешно испытаны на Кузнецком металлургическом комбинате и Западно-Сибирском металлургическом заводе [3, 4].

Из приведенного примера следует, что детальное минералогическое изучение марганцевых руд комплексом минерало-аналитических методов позволяет априорно оценить их технологические свойства. В данном случае руды Кайгадатского месторождения, судя по особенностям их вещественного состава, оказались не пригодными для обогащения традиционными механическими методами и малопригодными для рентгенорадиометрической сепарации. В других случаях на основе минералогических исследований, можно более оптимистично оценить качество руд как потенциального объекта для экономически эффективной переработки, что в свою очередь способствует разработке рациональных технологических схем передела этого вида минерального сырья.

В идеальном случае опережающие минералогические исследования при технологической оценке руд позволяют получать надежные прогнозные количественные характеристики обогатимости сырья и сокращать объемы технологических исследований на 70-80% при минерало-технологическом картировании и опробовании и на 15% при лабораторных и полупромышленных испытаниях [5, 6]. Из литературных данных следует [7], что расходы на изучение вещественного состава типового месторождения составляют порядка 20% от стоимости технологических исследований. Таким образом, расходы на минералогические исследования составляют около 0,1% от стоимости продукции горнообогатительного комбината, получаемой за год. Как показывает опыт, в последние годы гораздо проще провести комплекс минерало-аналитических исследований руд на ранних стадиях ГРП или при геолого-экономической переоценке сырьевых объектов и определить их технологические свойства и, следовательно, потенциальные возможности промышленного использования полезных ископаемых, чем проводить дорогостоящие технологические испытания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быч А.Ф., Шварцберг В.П., Батырев А.И. Марганцевое оруденение в вулканогенно-осадочных толщах позднего докембрия и раннего палеозоя Кузнецкого Алатау // Марганцевое рудообразование на территории СССР. М.: 1984. С. 74-78.
2. Минералы. Справочник / Под ред. Ф.В.Чухрова. М.: Наука. Т.2. Вып. 3. 675 с.
3. Исследование возможности использования железо-марганцевых руд Кайгадатского месторождения для плавки ферросплавов / Н.В.Толстогузов, Г.И.Сальников, В.М.Минаев и др. // Марганцевое рудообразование на территории СССР. М.: 1984. С. 276-278.
4. Толстогузов Н.В. Использование карбонатных и бедных железо-марганцевых руд восточных районов для производства ферросплавов // Марганцевое рудообразование на территории СССР. М.: 1984. С. 271-275.
5. Борискин В.П., Сидоренко Г.А. Достижения и направления развития технологической минералогии в ВИМСе // Минеральное сырье. М.: ВИМС. 1997. № 1. С. 181-189.
6. Остроумов Г.А., Сидоренко Г.А., Борискин В.П. Определение объемов и сроков минералогических исследований в процессе технологических испытаний руд // Применение технологической минералогии для повышения эффективности использования минерального сырья. М.6 1987. С.57-61
7. Борискин В.П., Кузьмин В.И., Вейс Б.Т. Роль минералогических исследований в разработке безотходных или малоотходных технологических схем // Минералогический журнал. 1993. Т.15. Вып. 6. С. 15-22.

МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НЕРУДНОГО СЫРЬЯ: ПРОГНОЗ ОБОГАТИМОСТИ И КАЧЕСТВА ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ

Лыгина Т.З., Корнилов А.В.

ФГУП «ЦНИИГеолнеруд», г. Казань

Достижения в области освоения нерудного минерального сырья практически всегда основаны на комплексном его изучении с применением минералогических и технологических методов. В итоге устанавливается необходимая информация по вещественному составу, текстурно-структурному строению, физическим и химическим свойствам, возможным способам переработки и создания новых материалов не только для исходного минерального сырья, но и промежуточных и конечных продуктов его переработки. При этом для получения информации могут быть применены как современные методы исследований, так и известные (старые), поскольку возможности последних еще не исчерпаны и в ряде случаев они дают более глубокие и значимые сведения о полезном ископаемом.

«ЦНИИГеолнеруд» располагает значительным опытом практического применения методов технологической минералогии при изучении объектов нерудных полезных ископаемых.

Для некоторых видов сырья (например, керамзитовых и кирпичных глин) получать полную и всестороннюю информацию с прогнозированием и разработкой технологических схем переработки и возможности получения соответствующих образцов товарной продукции можно с применением комплекса современных минералогических методов (рентгеноструктурного анализа, оптико-люминесцентного изучения, ЯГР и ИК-спектроскопии, ЭПР, химического, термического и дифференциального термомагнитного анализов и др.).

Для других полезных ископаемых, например асбестов, слюд, графитов, установление возможности их использования в определенном направлении можно ограничить одними технологическими методами испытаний. Однако в этом случае, хотя и будут получены изделия, отвечающие требованиям стандартов, исходное сырье не будет детально изучено с точки зрения минералогии, не будут раскрыты фазовые превращения и т.д.

При определении полезных свойств основного и сопутствующих минералов нерудного полиминерального сырья возникает необходимость и в применении комплекса минералогических и технологических методов изучения. Следует помнить, что реальную информацию о полезности какого-либо минерала или минерального сырья можно получить только на основании его изучения совместно минералогическими и технологическими методами. К такому изучению полезного ископаемого целесообразно приступать на самых ранних стадиях геологоразведочного процесса [1, 2]. Во всех случаях результаты аналитических исследований должны иметь практическое значение и способствовать разработке эффективной технологии переработки нерудного сырья и получению из него полезной продукции.

В качестве примера эффективного применения комплекса аналитических методов исследования нерудного сырья можно привести результаты оценки качества мелкозернистой слюды (мусковита), находящейся в поверхностных отвалах 25-ти летнего возраста ГОКа «Карелслюда», и слюды, находящейся в недрах.

Электроннографическим способом было установлено, что оба мусковита относятся к диоктаэдрической слюде – мусковиту политипной модификации $2M_1$. При этом мусковит из отвала характеризуется средне-высокой степенью совершенства кристаллической структуры, мусковит из забоя – высокой.