

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ: ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Ожогина Е.Г., Рогожин А.А.

ФГУП «ВИМС», Москва

Отечественная минерально-сырьевая база по многим видам полезных ископаемых сегодня может быть расширена исключительно за счет создания эффективных технологий их переработки, изначально предусматривающих максимально возможное извлечение всех полезных минералов руды или породы и использование их физических, физико-химических, химических (технологических) свойств. В связи с этим изменились подходы к оценке качества минерального сырья. Благодаря интенсивному развитию физических методов исследования появилась возможность глубокого исследования полезных ископаемых уже на ранних стадиях изучения сырьевых объектов. Не менее важно изучение особенностей состава и строения руд и пород при геолого-экономической переоценке месторождений и рудопроявлений, которая сегодня проводится довольно интенсивно. При этом нередко сегодняшние данные о составе и морфоструктурных характеристиках минерального сырья не всегда соответствуют аналогичной информации 30-50-летней давности. И, естественно, это позволяет рассматривать ранее не перспективные объекты с иной точки зрения и в дальнейшем переводить их в промышленно значимые месторождения и (или) рудопроявления. В настоящее время минералогические исследования, проведенные комплексом физических методов, направленные на решение четко поставленных задач, позволяют получить необходимую и достаточную информацию о руде. На основании этой информации можно прогнозировать экономически обоснованную целесообразность вовлечения минерально-сырьевого объекта в переработку, технологию обогащения сырья, качество ожидаемых продуктов, определять экологические последствия освоения месторождения и, соответственно, планировать природоохранные мероприятия.

Необходимо также отметить, что сегодня практически стерлись границы между поисковой и технологической минералогией, и поэтому главной задачей прикладных минералогических исследований следует считать определение качественных характеристик руд месторождений (рудопроявлений) – их вещественного состава, выдержанности качества оруденения в геологических контурах и технологических свойств полезных ископаемых. Ориентация на комплексное использование сырья соответственно обуславливает и другие задачи, которые следует решать в рамках минералогических исследований. Это, в первую очередь – прогноз технологических показателей при переделе сырья и интерактивный контроль этих показателей минералого-аналитическими методами; рекомендации по направленному изменению технологических свойств руд.

Слияние двух основных направлений прикладной минералогии особо четко прослеживается при наноминералогических исследованиях минерального сырья. При выявлении и изучении наноразмерных минеральных фаз в тонкодисперсном природном и техногенном рудном сырье, которые сегодня уже однозначно представляют промышленную ценность и определяют комплексность руд, одновременно решаются вопросы прогнозирования запасов этих металлов в рудах и оценка качества комплексных руд. Например, золото в марганцевых, железо-марганцевых рудах, платиноиды в титан-железных и хромовых рудах, медь, никель, кобальт в металлургических шлаках. При этом также учитывается, что реальное строение минералов, содержащих нанофазы (структуры распада, эвтектики, блочность, кавернозность нанометрической размерности), может определять неизвестные ранее свойства руд в целом, проявляющиеся в процессе их переработки. Все эти моменты обязательно рассматриваются при оценке обогатимости тонкодисперсных руд в рамках рационального, экономически эффективного, комплексного, безотходного освоения месторождений полезных ископаемых.

В настоящее время совершенно очевидно, что содержание в руде компонентов, т.е. ее химический состав не может в полной мере определить технологию передела. На качество руд влияют минеральный состав, нередко весьма сложный, представленный несколькими ценными минералами иногда разных классов (оксиды, карбонаты, силикаты), присутствующими в значительных количествах (марганцевые руды). Или наоборот – полезные минералы встречаются в весьма незначительном количестве, например, сульфиды цветных металлов в металлургических шлаках, при этом они нередко представлены полиминеральными агрегатами. Не меньшее значение имеют морфоструктурные параметры минералов, слагающие современные руды. Гранулярный состав главных рудных минералов может меняться от долей микрометров до 20 и более миллиметров. При этом присутствуют рудные агрегаты (сростки), сформированные зернами со сложными морфометрическими характеристиками. Именно это будет негативно влиять на селективное разделение минералов и способствовать, в лучшем случае, формированию коллективных продуктов. И, естественно, только реальный состав и строение минералов определяют технологические свойства руды в целом. В рудах нередко присутствует несколько генераций и (или) разновидностей минералов (пирит, пирротин, халькопирит и другие в полиметаллических сульфидных рудах, магнетит, титаномагнетит – в железных и титан-железных рудах,

родохрозит, марганокальцит – в карбонатных марганцевых рудах), отличающиеся содержанием главных рудных компонентов, что, в первую очередь, определяет действительный поминеральный баланс руды. Из вышеизложенного следует, что сегодня для создания современных технологий переработки минерального сырья необходимы надежные количественные минералогические данные, желательны в объеме всего месторождения. Это в значительной степени отличает современный подход к оценке качества полезных ископаемых от аналогичных работ недавнего прошлого.

В настоящее время в ВИМС им. Н.М. Федоровского в рамках геолого-экономической переоценки месторождений и рудопроявлений руд черных, легирующих, редких металлов, а также при создании технологий вторичного передела техногенного сырья, содержащего преимущественно цветные металлы, широко используются прикладные минералогические исследования, позволяющие получать нередко новую, более полную информацию об объектах исследования.

В качестве примера рассмотрим современный подход к изучению состава и строения высокофосфористых окисленных марганцевых руд Порожинского месторождения (Красноярский край). На протяжении последних тридцати лет руды этого месторождения, являющегося одним из крупнейших в России, были исследованы достаточно детально, но при этом не удавалось создать эффективных технологий их передела. Минералогические исследования были направлены на решение нескольких конкретных вопросов: уточнение минерального состава и выявление особенностей сростания рудных минералов, а также их взаимоотношения с глинистыми минералами. Практически основной проблемой являлось определение характера распределения апатита в руде, содержание которого иногда достигало 16%.

Окисленные марганцевые руды представляют собой песчано-алеврито-глинистый материал, содержащий переменное количество тонкодисперсных марганцевых минералов, обломков туффилов и туфоалевролитов, неравномерно, иногда интенсивно, омарганцованных. Рудные куски и желваки (в основном марганцевые, иногда железо-марганцевые) присутствуют в подчиненном количестве, среди них преобладают внешне однородные рудные агрегаты – достаточно плотные и крепкие, несмотря на то, что в них четко фиксируются слои и пятна глинистого и железо-глинистого материала. Рудные агрегаты имеют почко- и гроздевидную, округлую, ажурную форму. Четко прослеживается концентрически-зональный рисунок. Слои имеют различную мощность, представлены как рудным (преобладает), так и нерудным материалом. Иногда отмечается сдвиг слоев за счет наложенной прожилковой минерализации. Структура скрытокристаллическая, метаколлоидная. Прожилки сложены преимущественно тонко-мелкокристаллическим рудным агрегатом (рис. 1).

Неравномерное развитие оксидов и гидроксидов марганца и железа определяет пятнистую, иногда прерывисто-полосчатую, линзовидную текстуры. Широко развиты руды с вторичными прожилковыми текстурами. Помимо прожилков, отмечаются разноориентированные сухие трещины. Наличие прожилков и трещин, разбивающих руды на блоки, способствует образованию брекчиевидных текстур. В незначительном количестве отмечаются рудные брекчии с четко проявленными брекчиевыми, брекчиевидными и цементными текстурами, на которые в свою очередь наложена более поздняя прожилковая минерализация. Минеральные агрегаты имеют в основном скрытокристаллическое строение, за исключением агрегатов, формирующих прожилки. В прожилках присутствуют мелко-среднекристаллические агрегаты.

Руды, имеющие землистую и порошковатую текстуры, сложены рыхлым аморфным и (или) скрытокристаллическим материалом, представленным преимущественно оксидами и гидроксидами марганца и железа, обладающими низкой твердостью. В тесной ассоциации с рудными минералами в них присутствуют слоистые алюмосиликаты, кварц и опал.

Главный рудный элемент марганец присутствует в оксидной форме (MnO_2 44,9%) и входит в состав рудных минералов – оксидов и гидроксидов марганца. Железо связано преимущественно с минералами группы гетита-гидрогетита (Fe 5,22%). Комплекс породообразующих элементов связан в основном с нерудными минералами (кварц, опал, полевой шпат, слоистые алюмосиликаты).

В целом руды можно отнести к псиломелановому минеральному типу. Однако следует подчеркнуть, что количество рудных минералов, идентифицированных сегодня, больше, чем было диагностировано ранее. Содержание рудных минералов составляет 50-60%, и представлены они минералами группы псиломелана (псиломелан, рансьеит, криптомелан), пиролюзитом, нсутитом, якобитом, манганитом, тодорокитом, вернадитом, бернесситом, гетитом и гидрогетитом.

Псиломелан является главным минералом почковидных и гроздевидных образований, образует самостоятельные концентрические слои, а также встречается в ассоциации с пиролюзитом, нсутитом, криптомеланом в полиминеральных агрегатах. Иногда в таких агрегатах методами световой микроскопии фиксируются реликты манганита. Псиломелан практически всегда имеет метаколлоидное микростроение (рис. 2), индивидуализация отдельных зерен практически не наблюдается. Содержание марганца в метаколлоидном псиломелане равно 53,3-59,4% (по данным микрорентгеноспектрального анализа), иногда в нем присутствует калий (до 2,8%), что косвенно указывает на присутствие криптомелана.

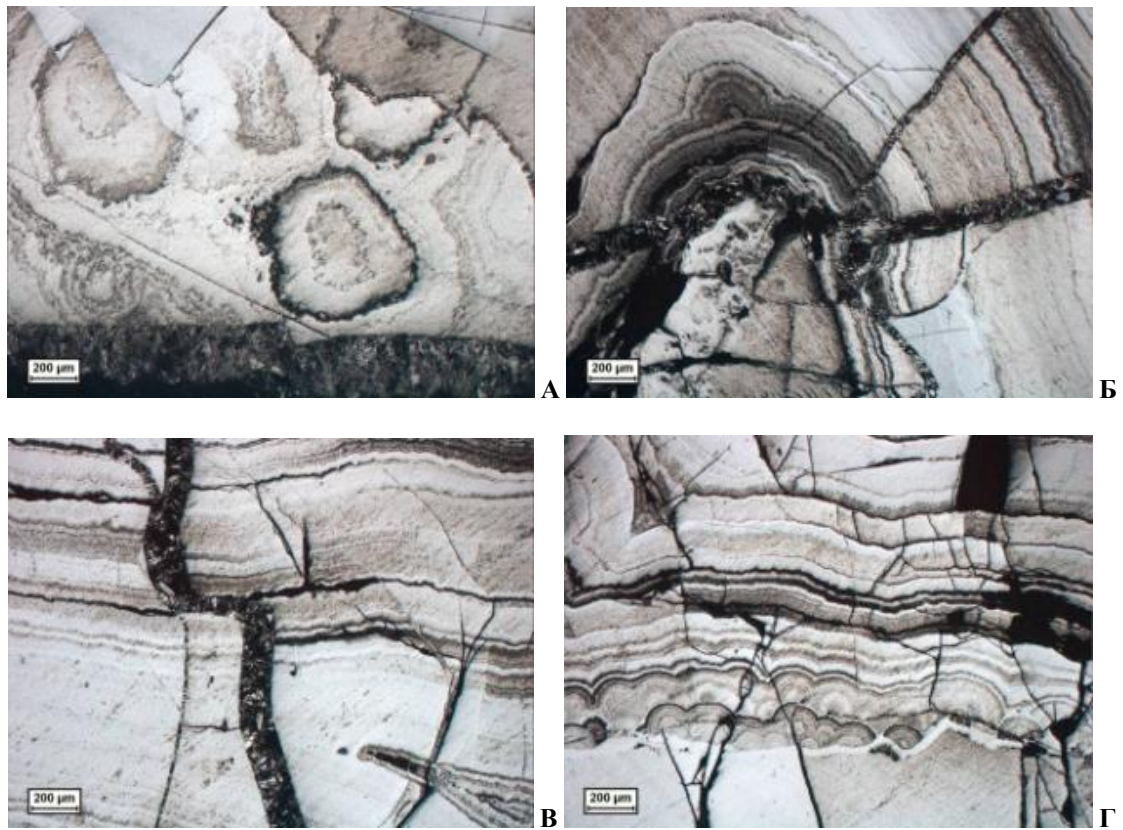


Рис. 1. А, Б - марганцевая руда колломорфной текстуры с наложенной прожилковой минерализацией. Никели параллельны. В, Г - концентрически-зональные рудные агрегаты с наложенной прожилковой минерализацией. Никели параллельны

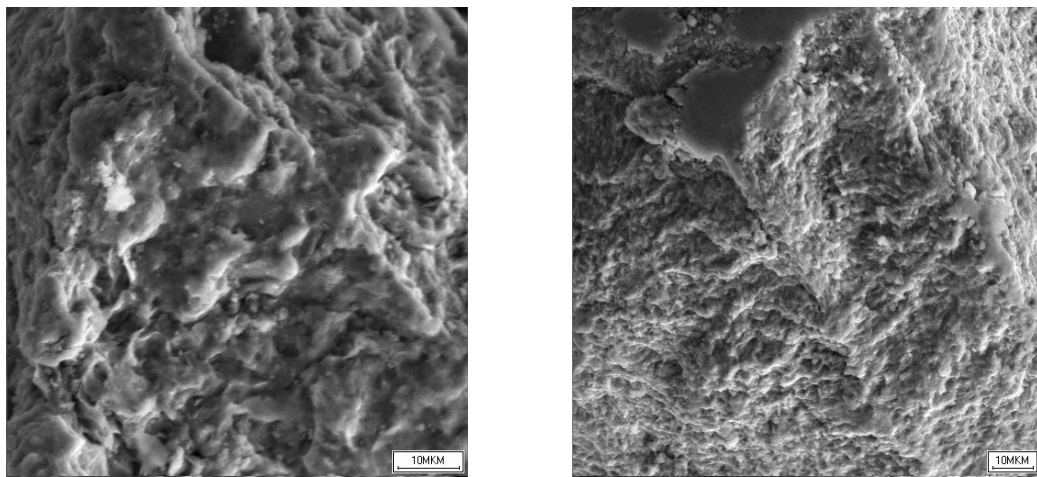


Рис. 2. Псиломелановый агрегат метаколлоидного микростроения (растровый электронный микроскоп)

Псиломелан также присутствует в землистом песчано-алеврито-глинистом материале в тонкодисперсном виде, тесно ассоциируя с рансьеитом, тодорокитом, вернадитом. Тонкодисперсные гидроксиды марганца надежно идентифицируются рентгенографическим методом. Полиминеральные марганцевые агрегаты обычно имеют скрытокристаллическое строение. Выделения псиломелана не всегда четко фиксируются в массе других гидроксидов марганца, но отличаются от них по составу. Как правило, в целом агрегаты существенно псиломеланового состава землистых руд отличаются более низким содержанием марганца (41,2-47,4%) по сравнению с псиломеланом, слагающим почковидные агрегаты.

Плотность псиломелана (возможно с примесью других марганцевых минералов, т.к. выделить достаточно чистую мономинеральную фракцию практически невозможно) 3,82-3,96 г/см³. Микротвердость существенно псиломеланового агрегата 488-526 кгс/мм², при этом участки, в которых явно присутствует криптомелан отличаются несколько более высокой твердостью (до 600 кгс/мм²).

Нсутит ранее в окисленных рудах Порожинского месторождения не отмечался. Установлено, что он образует немногочисленные округлые выделения, индивидуализированные слои в концентрически-зональных образованиях. Содержание марганца в нсутите составляет порядка 58,0%. В основном встречается в тесной ассоциации с псиломеланом и криptomеланом. Отличается от них несколько более высоким отражением и слабо ямчатой поверхностью, наблюдаемой в отраженном свете (последнее, видимо, связано с особенностью полировки этого минерала). Плотность единичных существенно нсутитовых агрегатов равна 4,12-4,18 г/см³. Микротвердость 511-524 кгс/мм².

Пиролозит представлен двумя морфологическими разновидностями. Пиролозит скрытокристаллического строения образует колломорфные выделения нередко весьма сложной конфигурации, в которых он присутствует в ассоциации с криptomеланом и псиломеланом. В почковидных выделениях в ассоциации с пиролозитом этой разновидности отмечается манганит. Микростроение пиролозита обычно метакolloидное. Содержание MnO в пиролозите равно 95,9-96,4%.

Пиролозит второй разновидности обладает мелко-среднекристаллическим строением и обычно выполняет пространства между выделениями пиролозита и псиломелана скрытокристаллического строения и образует прожилки. Часто им выполнены трещинки и стенки пустот. В полированных шлифах отмечаются агрегаты пиролозита гипидиоморфнозернистой структуры, сформированные кристаллами копьевидной, клиновидной, длиннопризматической и игольчатой формы, как правило, с четко выраженной штриховкой, размером 0,05-0,27 мм. Электронно-микроскопическим исследованием марганцевых агрегатов подтверждено присутствие двух разновидностей пиролозита, преобладающей из которых в рудах является скрытокристаллическая (метакolloидная) разновидность. Кристаллическизернистый пиролозит в виде агрегатов присутствует в подчиненном количестве и развит крайне неравномерно. Содержание MnO в нем несколько ниже, чем в скрытокристаллической разновидности и равно 94,1%.

Пиролозит в весьма незначительном количестве (около 1%) также обнаружен в ассоциации с тонкодисперсными гидроксидами марганца и железа в песчано-алеврито-глинистом материале.

По физическим свойствам пиролозит практически не отличается. Плотность его выше других марганцевых минералов 5,16-5,20 г/см³. Микротвердость минерала в основном составляет 617-645 кгс/мм², иногда снижается до 489 кгс/мм² (мелкокристаллический агрегат прожилков).

Криptomелан встречается не повсеместно, выполняет пространства между выделениями скрытокристаллического пиролозита, присутствует в концентрических слоях в ассоциации с псиломеланом и нсутитом. Иногда фиксируются явные элементы структур замещения: фонарные, каемчатые, футлярные на фоне общей скрытокристаллической массы рудного агрегата. Содержание марганца в криptomелане 56,88-56,93%, калия - 2,24-2,36%. Очень редко отмечаются тончайшие прожилки тонкокристаллического криptomелана в скрытокристаллическом пиролозите. Плотность минерала 4,32-4,52 г/см³, микротвердость 588-681 кгс/мм².

Якобит идентифицирован рентгенографическим методом и в дальнейшем обнаружен минераграфическим анализом. Минерал представлен округлыми изометричными выделениями, отличающимися внутренними красными рефlekсами. Создается впечатление, что якобит подвержен окислению, за счет чего образуется тонкая прерывистая корочка, предположительно состоящая из пиролозита и гетита.

Электронно-микроскопическими исследованиями фиксируются гнездовидные скопления якобита в скрытокристаллическом марганцевом (существенно псиломелановом) агрегате, состоящие из достаточно плотно прилегающих зерен изометричной формы со сглаженными очертаниями. Содержание Fe₂O₃ равно 67,4%, MnO – 24,1%.

Тодорокит и вернадит надежно идентифицируются рентгенографическим методом. Присутствуют в тонкодисперсном состоянии, иногда в ассоциации с ними встречается бернессит. В полированных шлифах наблюдаются низкоотражающие участки руды, имеющие явно неоднородное строение, иногда пористые. Микрорентгеноспектральным анализом установлено, что агрегаты, сформированные преимущественно этими минералами, отличаются наиболее низкими содержаниями марганца. Так, в агрегатах, в которых преобладает тодорокит, содержание Mn не превышает 36,3%, в тодорокит-вернадитовых агрегатах содержание марганца варьирует от 15,6% до 26,17%. Следует отметить, что в таких агрегатах, наряду с переменным количеством глинистого и кремнистого (опал, вулканическое стекло), присутствуют кальцийсодержащие фазы, представленные рансьеитом и родохрозитом, возможно манганодоломитом.

Значения плотности и микротвердости агрегатов вернадит-тодорокитового и тодорокит-вернадитового состава в целом достаточно низкие и соответственно равны 2,64-3,31 г/см³ и 54-156 кгс/мм², что будет определять накопление этих минералов в шламовых классах.

Родохрозит практически не наблюдался методами световой оптики, в продуктах обогащения иногда идентифицировался рентгенографическим методом. Но достаточно надежно минерал установлен электронно-микроскопическими исследованиями. Присутствует в виде массивных агрегатов, состоящих из слабо ограненных зерен, в глинисто-марганцевом агрегате. Также отмечаются кристаллы ромбодрической формы в псиломелан - пиролозитовом агрегате.

Гетит и гидрогетит в полированных шлифах обнаруживают исключительно скрытокристаллическое строение. Они образуют самостоятельные выделения различной формы и размеров, а также присутствуют в тесной ассоциации с марганцевыми минералами, обычно в составе колломорфных образований. Нередко

встречаются в тонкодисперсных агрегатах в ассоциации с гидроксидами марганца и слоистыми алюмосиликатами. Микрорентгеноспектральным анализом установлено, что иногда гидроксиды железа формируют собственные концентрические слои в коллоидных марганцевых агрегатах, содержание железа в которых достигает 27,1%, а марганца - 3,5%.

Агрегаты, имеющие преимущественно гетит-гидрогетитовый и (или) гидрогетит-гетитовый состав, весьма неоднородны, что в значительной степени отражается на их составе и свойствах.

Значения физических параметров гидроксидов железа варьируют в значительных пределах. Плотность изменяется от 3,46 г/см³ до 4,28 г/см³. Микротвердость гетита колеблется от 532 кгс/мм² до 580 кгс/мм², а микротвердость гидрогетита обычно не превышает 545 кгс/мм².

Глинистые минералы представлены каолинитом, гидрослюдой, монтмориллонитом, присутствующими как в тонкой смеси, так и встречающимися индивидуально. Более детальное изучение глинистой составляющей показало не только ее различный минеральный состав, но и характер взаимоотношения слоистых алюмосиликатов с рудными минералами, а, следовательно, позволило подтвердить, что присутствие глинистых минералов в целом негативно влияет на процессы обогащения.

Особое внимание было уделено распределению апатита в руде. Ранее считалось, что он присутствует в виде мелких кристаллов размером менее 0,005 мм в псиломелане и крипомелане, а также образует самостоятельные желваки (практически фосфориты). Проведенные нами исследование позволили подтвердить присутствие мелко- тонкокристаллического апатита в минералах гр. псиломелана, содержание фосфора в которых составляет 0,22% и 0,29%. Наблюдаются кристаллы панидиоморфной и идиоморфной (призматической) формы в псиломелане, иногда прослеживается четкая приуроченность апатита к трещинам в рудном агрегате. Рентгеномографическим методом было выявлено, что иногда тонкокристаллический апатит образует скопления в марганцевых агрегатах. Размер зерен апатита в данном случае не превышает 0,01 мм, форма их преимущественно ксеноморфная, т.е. практически всегда отмечается весьма тесное и сложное срастание с рудными фазами с четко выраженной изрезанностью границ зерен минерала, что определяет невозможность его извлечения. Распределение апатита этой разновидности в рудах крайне неравномерно и, по-видимому, доля его в руде в целом незначительна. Тем не менее, совершенно очевидно, что апатит, присутствующий в виде тонких включений в рудных минералах, невозможно вскрыть при дроблении и измельчении и селективно выделить механическими методами.

Присутствие желваков апатита, которые должны были бы хорошо извлекаться методами рентгено-радиометрической сепарации (PPC), обнаружены не были. Специальное минералогическое изучение позволило установить интересную особенность взаимоотношения апатита с кварцем и опалом, определяющую невозможность его извлечения. Впервые обнаружено, что в руде в переменных количествах встречаются плотные желтовато-серые образования, имеющие плотность 3,19 г/см³. На сколе такие образования отличаются жирным блеском, непрозрачны и не люминесцируют.

Рентгенографическим, а затем рентгеномографическим анализами установлено, что такие образования, имеющие кварц-опаловый состав, в переменном количестве содержат апатит, характер распределения которого в них различный (рис. 3). Во-первых, это достаточно крупные (до 1 мм) гексагональные или панидиоморфные кристаллы апатита, облаченные в опаловую рубашку, толщина которой обычно менее 0,02 мм. Помимо этого, опал образует и включения непосредственно в апатите.

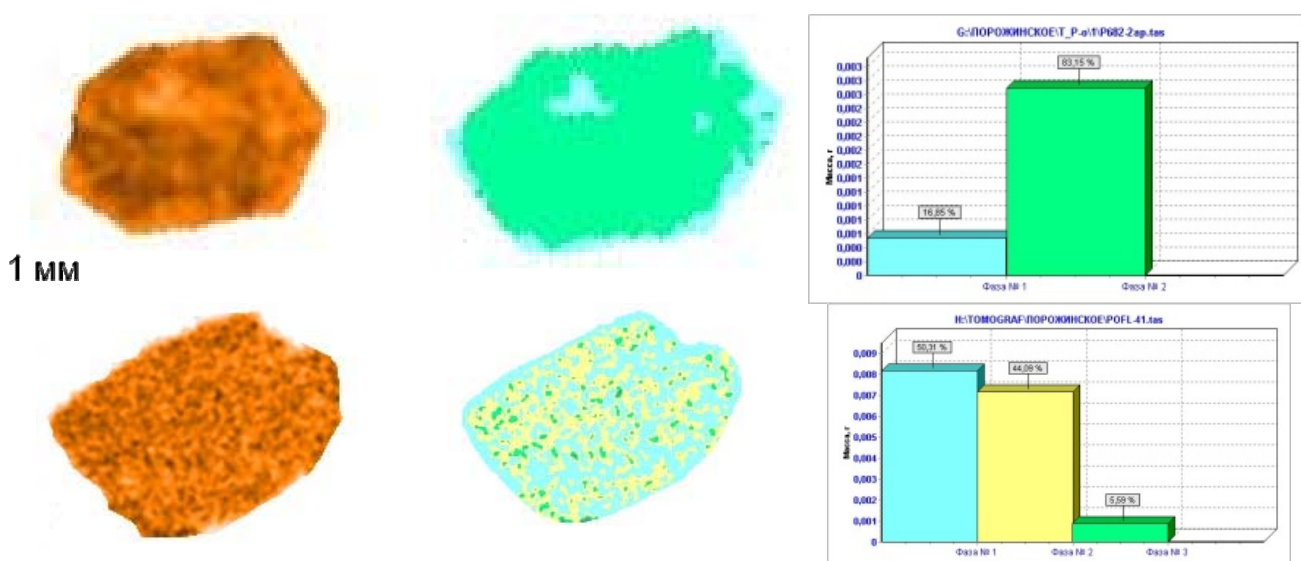


Рис. 3. Характер распределения апатита в кварц-опаловых агрегатах (зеленый – апатит, голубой – опал, желтый – кварц). Рентгенограмма, рентгеномограмма, гистограмма содержания минералов (программа обработки «TomAnalysis»)

Во-вторых, апатит образует тонкую неравномерную вкрапленность в кварц-опаловом агрегате. Размер зерен апатита - первые микрометры. В обоих случаях периферийная часть таких образований сформирована опалом. Это, с одной стороны, затрудняет диагностику апатита. Как правило, такие образования визуально принимаются за опал. С другой стороны, такое своеобразное строение апатитсодержащих агрегатов, видимо, в значительной степени определяет технологические свойства руд. Наличие опаловой рубашки негативно влияет на люминесцентные и флотационные свойства апатита, что делает практически невозможным его выделение методами РРС и флотации.

В заключение следует отметить, что современный подход к изучению состава и строения окисленных марганцевых руд Порожинского месторождения, основанный на данных количественного минералогического анализа, позволил выявить ряд особенностей руд, непосредственно определяющих их качество. Полученные результаты в значительной степени отличаются от ранее известных данных по минералогии этих руд и логично объясняют неэффективность применяемых технологий их обогащения.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ НА ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОМ КОМБИНАТЕ (НА ПРИМЕРЕ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД)

Пирогов Б.И.

ФГУП «ВИМС», Москва, pirogov_bi@inbox.ru

«Всесторонняя характеристика минералов как продуктов природных процессов, конечно, прерогатива собственно минералогической науки. Начало деятельности технологической минералогии может устанавливаться строго и объективно. Только полный совместный учет природных и техногенных качеств открывает возможность рационального использования сырья и интенсивного ведения технических процессов» (Д.П. Григорьев, 1988[1])

По запасам железных руд Россия занимает первое место в мире: на ее долю приходится почти треть мировых запасов ~ 100 млрд. т. Более половины - это крупные месторождения с запасами более 1 млрд. т в каждом. В обзоре ВИМСа [2] по состоянию минерально-сырьевой базы отечественной металлургии подчеркивается, что основным промышленным типом месторождений, в которых сосредоточена большая часть балансовых месторождений, являются железистые кварциты КМА, Кольского п-ва. Второй по значению тип – это скарново-магнетитовые руды месторождений Урала, Кузбасса, Приангарья и Южной Якутии. Подчиненное значение имеют другие промышленные типы. Однако, в разведанных российских месторождениях средние содержания Fe - 30-35%, что существенно уступает мировому уровню разрабатываемых гематит-мартит-магнетитовых месторождений Австралии, Индии, Бразилии, других регионов с содержанием Fe = 55-60%.

Огромные масштабы приняла сегодня открытая разработка железных руд различных генетических типов на крупных горно-обогатительных комбинатах России и стран СНГ. В СССР только в 80-е годы добывалось более 50% руд в карьерах с годовой производственной мощностью 20 млн. т и более. Средняя же мощность карьеров ГОКов, на долю которых приходилось более 85% добычи сырой руды, превысила 16 млн. т в год. Причем более одной трети всех руд добывалось из карьеров глубже 250 м (например, до 320 м — Сарбайский, Соколовский карьеры). Значительно увеличился объем вскрышных работ, в частности, объем скальной горной массы возрос на 22%. Широкое развитие получила циклично-поточная технология на добычных и вскрышных работах в России и на Украине. Произошли существенные сдвиги и в совершенствовании технологии обогащения железных руд. Так, на Лебединском ГОКе освоена технология получения магнетитовых концентратов с содержанием железа 70% для производства металлизированных окатышей на Оскольском электрометаллургическом комбинате. На многих предприятиях внедрена технология сухой магнитной сепарации на первой стадии обогащения, что позволило обеспечить повышение содержания Fe в концентрате (например, по ЦГОКу на 0.4-0.8%). Получила дальнейшее развитие проблема комплексного использования сырья.

На современном ГОКе геологическая служба является важнейшим звеном в технологической цепи добычи и обогащения руд. Особо возрастает ее роль в связи с концентрацией производства, внедрением циклично-поточной технологии добычи руд, необходимостью обеспечения обогатительных фабрик усредненным сырьем не только с учетом качества руд, но и их физико-механических и технологических свойств.

Сегодня особенно стал значимым системный инновационный подход к минералого-технологической оценке различных видов минерального сырья (МС), как природного, так и техногенного, на основе рационального сочетания методов рудоподготовки и передела при комплексном извлечении полезных компонентов с получением широкого спектра ликвидных товарных продуктов и новых нетрадиционных видов МС [2]. Оценивая в целом минералого-технологическую эволюцию недр в горнорудном производстве,