

роваться на применение технологии внутрислоевого очищения подземных вод от железа.

Данный метод обезжелезивания подземных вод в пласте основан на создании в эксплуатируемом водоносном горизонте искусственных окислительных геохимических барьеров. Установки для внутрислоевого очищения подземных вод компактны и просты в изготовлении. Сооружаются такие установки, как правило, непосредственно на водозаборных скважинах и представляют собой комплект оборудования по подготовке и подаче в пласт аэрированной воды. Скважины при этом преобразуются в своеобразные станции водоподготовки. Исследования по внутрислоевого очищению подземных вод от железа выполнялись на системе водоснабжения г. Выкса Нижегородской области с учетом процесса коррозии водопроводных труб, приводящей к существенному повышению содержания железа в системе водоснабжения. Для условий водозабора в г. Выкса наиболее приемлемым оказался вариант стабилизационной обработки воды с использованием кальцинированной соды. Стабилизационная обработка воды по-

зволила полностью предотвратить эффект коррозии, и изменений качества воды в сети не наблюдалось.

Применение внутрислоевого обезжелезивания не требует большого капитального строительства, приобретения дорогостоящего оборудования и решения вопросов утилизации осадков. Стоимость установки с пусконаладочными работами невелика — первые сотни тысяч рублей.

Также довольно широко распространены в России подземные воды с повышенным содержанием бора. ЗАО «Баромембранная технология» изготавливает соответствующие установки водоподготовки для удаления бора. В настоящее время такие установки работают в Нижегородской области и Чувашии для водоснабжения небольших объектов.

Таким образом, в настоящее время нет никаких технико-технологических проблем освоения месторождений пресных подземных вод, осталось преодолеть проблемы нормотворческие и психологические.

© Коломиец А.М., 2019

Коломиец Алексей Маркович

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 549.08+553

Пирогов Б.И. (ФГБУ «ВИМС»)

СИСТЕМНОЕ МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РУД В СВЯЗИ С ИХ ОБОГАЩЕНИЕМ

*В статье на конкретных примерах железных руд различного генезиса рассмотрены принципы и методы оценки минералого-технологической неоднородности индивидов и агрегатов основных рудных и нерудных минералов на 3-х уровнях организации минерального вещества — текстурном, структурном, микро-наноуровне индивида с учетом двойственной природы формирования технологических свойств минералов. **Ключевые слова:** железные руды, принципы и методы оценки, неоднородность индивидов и агрегатов, двойственная природа свойств минералов.*

Pirogov B.I. (VIMS)

SYSTEMATIC MINERALOGICAL AND TECHNOLOGICAL STUDY OF ORES IN CONNECTION WITH THEIR ENRICHMENT

In article on concrete examples of iron ores of different Genesis deals with the principles and methods of evaluation of the mineralogical and technological heterogeneity of individuals and the aggregates of the main metallic and non-metallic minerals on 3 levels of the organization minerals — textural, structural, micro-nano-structure of the individual taking into

*account the dual nature of formation of technological properties of minerals. **Keywords:** iron ores, principles and methods of evaluation, heterogeneity of individuals and aggregates, dual nature of mineral properties.*

В СССР уже в 1930-е годы при изучении и минералого-технологической оценке (МТО) различных видов полезных ископаемых в Институте прикладной минералогии (ныне ВИМС) проф. Н.М. Федоровским был внедрен метод комплексного исследования и освоения промышленностью новых видов минерального сырья при совместной работе геологов, геохимиков, обогатителей, химиков-технологов. В его основу было положено изучение собственно минерала в связи с: 1) детальным минералогическим изучением физических, физико-химических и технологических — всех практически ценных свойств выявленного минерального сырья; 2) разработкой новых методов исследования минералов; 3) установлением минералогических критериев для поисков и оценки масштабности МПИ. Метод обеспечивал создание наиболее рациональных технологических схем обогащения минерального сырья. При этом внимание, прежде всего, уделялось поиску и оценке химико-металлургических характеристик сырья, что способствовало существенному расширению минерально-сырьевой базы страны. По сути, Н.М. Федоровский *положил начало системного подхода к МТО и созданию школы собственно технологической минералогии ВИМСа, которую достойно и успешно развил со своими учениками и соратниками А.И. Гинзбург, в тесном контакте с геологами и техно-*

логами. И сегодня эта школа является одной из ведущих далеко за пределами России.

Как показал многолетний опыт, оценивая минералогическо-технологические особенности различных типов руд, следует учитывать, что длительность разных стадий природных генетических процессов, закладывающих основы формирования технологических свойств минералов (ТСМ), исчисляется тысячелетиями. В то же время быстротекущие техногенные процессы, связанные с производительностью аппаратов, интенсивно разрушая естественную информационную структуру минералов, медленно передают ее новым продуктам процессов в более или менее сохранившемся виде. Именно поэтому важно при оценке руд использовать системный подход к выявлению минералогическо-технологических признаков, определяющих их обогатимость.

Уже в середине XX столетия, и особенно с 1980-х годов, у многих минералогов и технологов в связи с использованием промышленного опыта переработки разных типов руд весьма существенно изменились представления о взаимосвязи кристалломорфологии и кристаллохимии с ТСМ [6, 10]. Особый статус при этом получили в комплексе с химико-аналитическими, физико-химическими, минералогическими методами и технологическим экспериментом, что позволило на генетическом уровне проследить эволюцию технологических свойств минералов на месторождениях. Как показал наш многолетний опыт работы на железорудных ГОКах СССР-РФ, в институтах Механобр, Механобрчермет и ВИМС, информация о ТСМ (руд в целом) потенциально накапливается еще на этапах их генезиса в природе, а реализуется уже при техногенезе — в процессах системы рудоподготовки и обогащения [6]. Развивая идеи Н.П. Юшкина [12] о взаимосвязи в системе «минерал-среда» (роль при обмене энергии → вещества → информации), следует считать их общими и в технологической системе. При обмене в системе взаимодействия обеспечивают следующие изменения: а) *энергетические* — обмен энергией при структурных преобразованиях индивида, б) *вещественные* — поступление вещества из среды в

минеральный индивид и его рост, или, наоборот, разрушение индивида и удаление вещества из минерала в среду; в) *информационные* — передачу особенностей структурной организации вещества и энергии от среды к минералу и обратно. В результате формируется *минералогическо-технологический КОД* руды, включающий комплекс минералогическо-генетических и технологических признаков с учетом гранулярного спектра дробленно-измельченной руды за счет взаимосвязи деструкции и химической реакции. Это позволяет проследить изменчивость морфоструктурных, конституционных характеристик и свойств индивидов (зерен и техногенных частиц, в том числе, обломочных малых частиц — ОМЧ) и взаимосвязь с раскрытием разных типов сростаний рудных и нерудных минералов. Индивид становится здесь фазово-морфоструктурно неоднородным, с чем и связана нередко трудная обогатимость руд. КОД руды *формируется в единой геолого-техногенной системе* (ЕГТС), *потенциально накапливаясь и сохраняясь согласно закону инерции (минералогической «памяти»)* на разных уровнях минералогической «памяти» индивида и руды уже на этапах минерагенеза руд в природе, преобразуясь в различных энергетических полях на

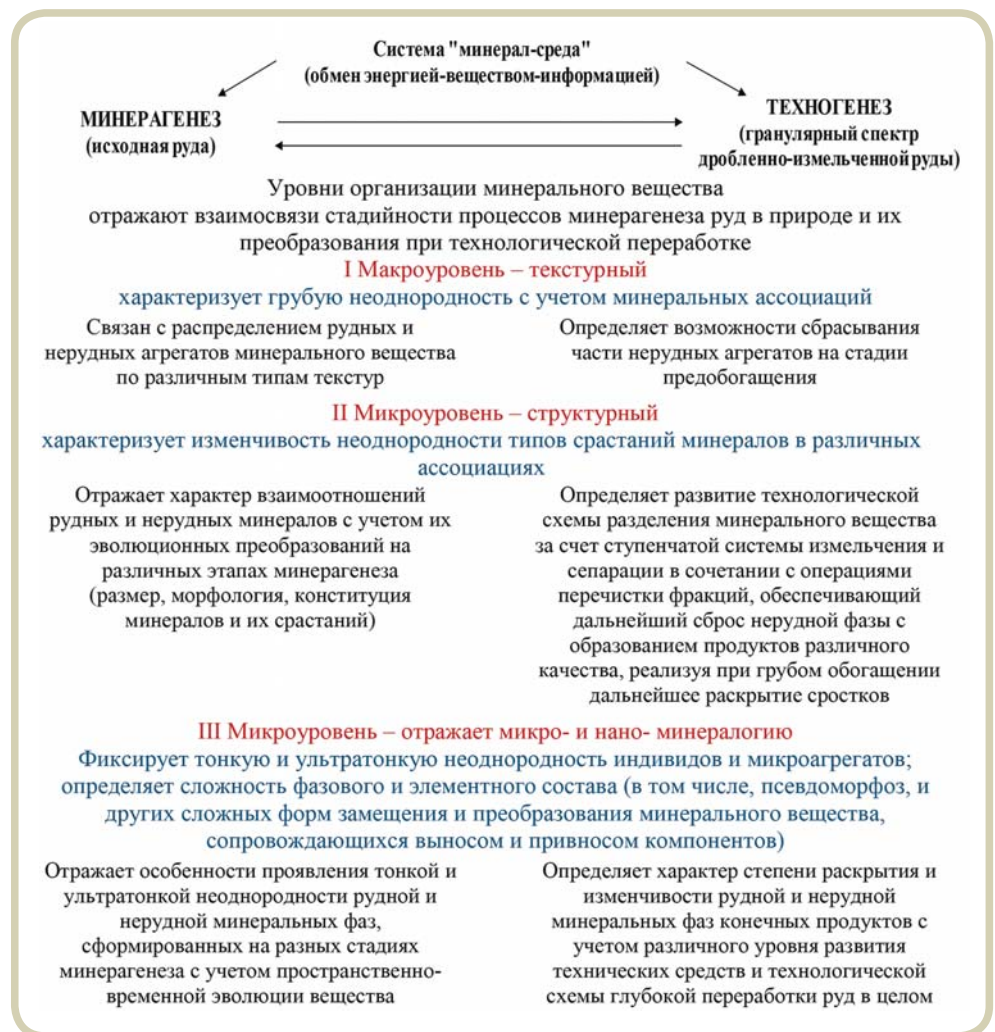


Рис. 1. Схема формирования признаков минералогическо-технологической неоднородности минерального вещества в связи с переработкой руд новых индикаторов генезиса руд и пород

макро-, микро- и нано- уровнях в техногенезе — при их переработке, за счет двойственной природы ТСМ. Природа технологических свойств минералов определяется, с одной стороны, генезисом (морфологией, размером, конституцией, свойств индивидов и сростаний минералов), с другой → изменением их природных характеристик при техногенезе (рудоподготовке и в разных узлах технологической схемы). Это обеспечивает определенную степень контрастности технологических свойств рудных и нерудных минералов в сростаниях, и при необходимости — для совершенствования технологии обогащения руд — возможность их изменения под влиянием различных видов воздействий. Все это требует глубокого познания природы минералов на уровне «микромира» в системе «минерал-среда», т. к. по мере изменения их природной гранулометрии и степени дефектности кристаллической структуры многие из первичных свойств могут быть существенно изменены в гранулярном спектре дробленно-измельченной руды. Исследование индивидов минералов (кристаллов, зерен, техногенных частиц, в том числе, ОМЧ) опирается на фундаментальные эволюционные закономерности минералогенеза и техногенеза [11]. Используя при этом онтогенетический метод (ОМ) для познания генетической природы ТСМ, мы наиболее глубоко познаем их в схеме единой системы выявления признаков минералоготехнологической неоднородностей (МТН) на трех основных уровнях оценки обогатимости руд (рис. 1) различных генетических типов МПИ. Ранее Н.В. Петровская подчеркивала [7], что «существование различных элементов неоднородности есть общее свойство минералов как природного кристаллического вещества, варьируют лишь уровни (от макро- и микроскопического до атомарного), характер и степень развития, а также контрастность неоднородностей как функции изменчивых условий процессов минералообразования». Именно здесь важен онтогенетический метод изучения, т.к. «концептуальная модель онтогенетического прогнозирования исходит из главной идеи онтогении — идеи направленного развития минеральных индивидов. Смысл применения онтогенетических данных для технологических изысканий определяется рядом задач:

— выбор оптимальных условий раскрытия зерен полезного компонента (для этого недостаточно учитывать размер, определяемый гранулометрическим анализом, а необходим учет их формы, характера сростаний, особенности границ, информацию о которых дает онтогенетический анализ);

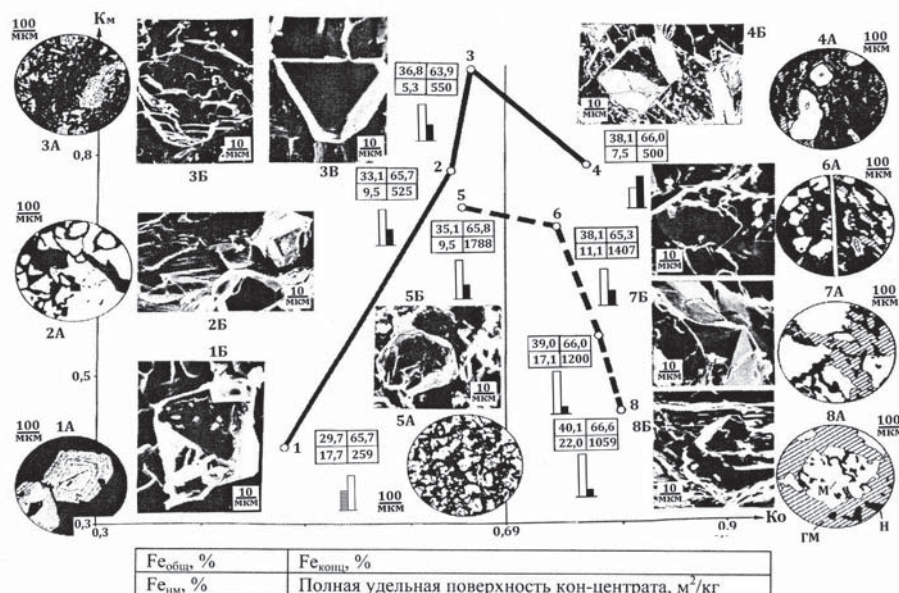


Рис. 2. Изменчивость параметров обогащения в связи с минералого-геохимической зональностью толщ железистых кварцитов месторождений. ЮГОК: 1 — магнетит-сидерит-хлорит-куммингтонитовые; 2 — магнетит-хлорит-сидероплезит-магнетитовые; 3 — магнетитовые; 4 — гематит-магнетитовые. МихГОК: 5 — кальцит-эгирин-зеленослюдково-магнетитовые с пиритом; 6 — магнетитовые с гематитом и зеленой слюдой; 7 — гематит-магнетитовые; 8 — магнетит-гематитовые с гетитом. Гистограммы соотношения различных разновидностей послыного роста в магнетите: полосчатое — полногранный (зональный); белое — полногранный (однородный); черное — скелетный

— оптимизация технологического процесса с учетом неоднородности состава и свойств мономинеральных зерен (эта задача решается на основе анализа анатомии индивидов. Имея онтогенетическую характеристику руд, можно выделить в них принципиально разные по обогатимости типы, можно предусмотреть ступенчатую систему измельчения с использованием различных технологий обогащения на различных стадиях)» [12].

Как показывают наши и другие исследования, для каждого генетического типа руд информация о МТН индивидов, сосуществующих рудных и нерудных минералов в них, потенциально накапливается и сохраняется в виде разнообразных морфоструктурных характеристик и свойств на макро-, микро- и нано-уровнях, а затем по-разному преобразуется в конкретных стадиях технологической схемы их переработки. Задача минералога, опираясь, прежде всего, на минералогические методы, в комплексе с современными химико-аналитическими и физическими методами исследования, выявить и оценить особенности минералого-технологической неоднородности с учетом технологических экспериментов, и совместно с технологом максимально учесть их при разработке схемы обогащения руд. При этом метод геолого-технологического картирования позволяет дать полную количественную оценку показателей обогатимости руд и ТСМ с выявлением их типоморфных признаков для каждого генетического типа руд. Так, на рис. 2 показана в сравнении изменчивость параметров обогащения 2-х крупнейших в Европе ГОКов в связи с

минералого-геохимической зональностью толщ железистых кварцитов (ЖК, как бедных руд) месторождений Скелеватского-Магнетитового (Кривой Рог, ЮГОК) и Михайловского (КМА, МихГОК) на основе разработанной нами диаграммы коэффициентов магнитности (2-х крупнейших в Европе $K_M = Fe_M : Fe_{общ}$) и окисленности ($K_O = Fe_2O_3 : FeO + Fe_2O_3$), определив минералогическую основу КОДа руд, четко фиксируя неоднородность рудной фазы с учетом соотношения основных рудных минералов — магнетита и гематита в исходной руде. Это отражено в поведении усредненных кривых K_M и K_O по зональности.

Критерием разделения диаграммы на 2 зоны служит линия $K_O = 0,69$, характерная для стехиометрического магнетита. Кривая зональности слева связана преимущественно с восстановительными процессами минералообразования ($K_O < 0,69$), а справа — с окислительными ($K_O > 0,69$). В пределах обеих ветвей диаграммы выделены интервалы КМ для основных разновидностей железистых кварцитов, подчеркивающие особенности зональности толщ железистых горизонтов. Это отражено в изменчивости величин минеральных форм $Fe_{нм}$ и $Fe_{общ}$, разница между которыми отвечает среднему содержанию Fe_M . Прослеживается определенная последовательность в переслаивании разновидностей ЖК, что в целом является общей закономерностью для разных месторождений и фаций метаморфизма. Сохраняя при этом характер зональности, горизонты месторождений отличаются неодинаковой полнотой и симметрией разреза (подчеркивая особенности геологической неоднородности ЖК), что в значительной степени определяет и изменчивость минералогическо-технологических особенностей руд в разных участках месторождений. Метаморфизм и метасоматоз в целом сохраняют первичную аутигенно-минералогическую зональность толщ железистых кварцитов, но в связи с различной голого-структурной позицией оруденения принципиально меняют онтогению сосуществующих минералов, и, как следствие, существенно изменяют технологические свойства руд (рис. 2) на всех 3-х уровнях их минералого-технологической неоднородности. Это свидетельствует о разном характере процессов метаморфизма, метасоматоза, гипергенеза в ряду изменений магнетит — маггемомагнетит — маггемит — мартит — гетит за счет усиления процессов метасоматоза и окисления в щелочной среде [6]. Если в зональности толщ железистых кварцитов ЮГОКа $Fe_{нм}$ представлено в основном Fe^{+2} карбонатов и силикатов, то на МихГОКе — это главным образом Fe^{+3} гематита (железной слюдки и мартита), гетита и силикатов — эгирина и зеленой слюды. Важно подчеркнуть, что значимо отличаются текстурные особенности ЖК, отражая 1-й уровень — (текстурный) МТН руд: на ЮГОКе преобладают средние (3–5 мм ширина прослоев) и широко (5–10 мм) полосчатые их разновидности с четким выделением нерудных прослоев, за счет которых уже при реконструкции обогатительной фабрики удалось внедрить гравитацию для предварительного сбрасывания части пустой породы, что по-

зволило улучшить в целом показатели обогащения. На МихГОКе преобладают тонкополосчатые разновидности железистых кварцитов (джеспилиты, с тонкими прослоями, 1–3 мм), чаще существенно гематитового состава, нередко с мушкетовитом (вторичным магнетитом). Интенсивность процессов минералообразования связана с микротектоникой (различных видов микроскладчатости, кливажа, трещиноватости, дробления, истирания, растворения), что порой весьма отрицательно сказывается на изменчивости технологических показателей, увеличивая потери Fe при магнитной сепарации. Характеризуя текстуры руд месторождений, следует подчеркнуть, что слоистость ЖК связана с увеличением размеров индивидов и агрегатов главных рудных минералов — магнетита и гематита при переходе от нерудных к смешанным (полурудным) и рудным слоям, а кварца — в обратном направлении. Причем, на ЮГОКе при метаморфизме за счет деформации и реакций в твердом состоянии существенно развиты процессы собирательной перекристаллизации магнетита, что обусловило формирование различных типов агрегатов — сплошных, ленточных, полиэдрических, ветвистых, зернисто-вкрапленных, определивших 1-уровень их неоднородности — текстурный (содержание их в среднем колеблется от 50 до 80 % в различных разновидностях). Это позволило учесть в схеме переработки железистых кварцитов текстурный фактор, включив на ОФ ЮГОК-1 комбинированную магнитно-гравитационную схему обогащения и получить 12–15 % гравитационного концентрата с содержанием $Fe = 65,5$ %. В итоге общее качество товарного концентрата увеличилось на 0,4–0,5 % и в целом снизились потери переизмельченного магнетита в хвостах. К сожалению, на МихГОКе 1-уровень неоднородности проявил себя несколько по-иному. Тонкополосчатая джеспилитовая текстура ЖК, связанная с развитием в слоях разного состава плейчатости, разнообразных форм складок (изоклиальной, волочения, микрокрякляжа), что повлияло на широкое разнообразие морфологии зерен и агрегатов магнетита и гематита. В конечном итоге привело к искажению кристалломорфологии и развитию процессов рекристаллизации индивидов магнетита, появлению большого количества тонких его зерен ($< 0,03$ мм) и частиц землистого облика. С проявлением изоклиальной микроскладчатости связано существенное перераспределение магнетита в одной и той же разновидности кварцитов на крыльях и в замках складок: замки обогащаются магнетитом, иногда различия достигают 5–10 %. При травлении магнетита и кварца в аншлифах из замков складок выявляется их микроблоковое (мозаичное) строение, связанное с процессом грануляции. Такие магнетиты отличаются высокой коэрцитивной силой (18,1 кА/м), обуславливающей захват нерудных частиц во флокулы, в результате чего снижается качество концентрата. Для раскрытия магнетита такие кварциты требуют весьма тонкого измельчения (95–98 % класса $-0,044$ мм, в то время как на ЮГОКе железистые кварциты измельчаются до

крупности 95–98 класса $-0,074$ мм). Далее, переходя к 2- и -3 уровням минералого-технологической неоднородности железистых кварцитов, мы учитываем уже структурные признаки (размеры, форму зерен и агрегатов, типы сростаний рудных и нерудных минералов) и наконец, фазовый состав индивидов минералов. Образование в агрегатах значительного количества полиэдров свидетельствует о заторможенном росте кристаллов. Полигональная форма зерен указывает на достижение структурного равновесия, образуя прямолинейные поверхности в сростаниях с нерудными минералами, что обеспечивает высокий уровень раскрытия минералов. Резкая кристаллизация вызывает появление индивидов и агрегатов с контурами извилистой и неправильной форм с различными по размерам и характеру распределения нерудных включений. Нередко зерна магнетита приобретают удлиненную линзовидную форму с прихотливыми очертаниями, а также неровными извилистыми межзерновыми границами за счет перекристаллизации по принципу Рикке. В конечном итоге это сказывается на ухудшении при измельчении показателей раскрытия и изменчивости качества концентрата и изменчивости величины его удельной поверхности при обогащении по минеральным разновидностям руд (рис. 2). Значимы при этом *морфотропные преобразования оксидов, связанные с изменением состава и симметрии в ряду: вюстит $Fm\bar{3}m \rightarrow$ магнетит $Fd\bar{3}m \rightarrow$ маггемомагнетит (оксимагнетит) $P4_32 \rightarrow$ маггемит $P4_2,2 \rightarrow$ гематит $R\bar{3}c$* . С понижением симметрии возрастают примесная емкость структуры и реакционная способность полиморфных фаз, как показали наши исследования по МихГОКу. При изучении соотношений между магнетитом и гематитом особая роль в условиях контакта отводится эффекту гальвано — пары магнетит (анод)–гематит (катод) [8]. В результате развития процессов замещения формируются сложные псевдоморфозы: гематита по магнетиту (мартит) и магнетита по гематиту (мушкетовит). При этом развитие в железистых кварцитах процессов щелочного метасоматоза на фоне значимых тектонических (в том числе микротектонических) преобразований различного уровня связано с окислением с высокой степенью дефектности магнетита и появлением в нем значительного количества блоков маггемита, как переходной фазы к вторичному гематиту — мартиту. Мушкетовит в рудах МихГОКа существенно развивается в восстановительных условиях щелочной среды. Как правило, псевдоморфозы несут следы микротектонических напряжений с образованием характерных дислокационных структур. При усилении нагрузок происходило дробление пластин мушкетовита, нередко с расхождением частей индивида и выполнением промежутков между ними нерудными минералами. Разрушение уплотненной псевдоморфозы сопровождалось последующей перекристаллизацией с образованием мелких идиоморфных зерен магнетита.

Величина зерен магнетита в различных разновидностях кварцитов изменяется в широких пределах —

$0,01-0,18$ мм, однако процессы щелочного метасоматоза с развитием эгирина, зеленой слюды и гематита существенно влияют на изменение гранулометрии магнетита в разных разновидностях. Железистые кварциты достаточно четко делятся по количеству зерен размером $0,03$ и менее на 3 структурные группы: мелкозернистые — до 30 %, тонкозернистые — 30–50 % и весьма тонкозернистые >50 %. Причем именно процесс рекристаллизации магнетита с образованием таких зерен широко проявляется в магнетитовых с гематитом кварцитах. Он приводит к неполному раскрытию магнетита, увеличению количества сростков, разубоживающих концентрат, и потерю Fe в хвостах. В то же время нами выявлен четкий типоморфный признак для железистых кварцитов МихГОКа, т.к. между количеством частиц магнетита $<0,03$ мм в исходной руде ($M_{0,03}$) и содержанием Fe в концентрате (β) выявлена четкая корреляционная связь ($r = -0,80$), что отвечает уравнению регрессии $\beta = 71,6 - M_{0,03}/5,96$. Исследования структурного фактора (2-я категория МТН) показало, что при окислении части магнетита (за счет гипогенной мартитизации) в связи с развитием процессов щелочного метасоматоза, вторичный гематит замещает кварц и формируются цементационные структуры, представленные железной слюдкой, особенно в магнетит-гематитовых кварцитах. Этот этап предыстории мартита постепенно развился в этап формирования полных псевдоморфоз гематита по магнетиту при гидротермально-метасоматическом и далее гипергенном процессах. При тонком измельчении такие руды образуют сложные типы сростков, часть из которых попадает в магнитный концентрат, повышая его качество, а большая часть уходит в хвосты, увеличивая содержание в них Fe до 25 %. Несколько по-иному, по сравнению с магнетитовыми разновидностями железистых кварцитов докембрия, проявляются особенности МТН во взаимоотношениях основных рудных и нерудных минералов разных ассоциаций в титаномагнетитовых рудах магматогенного типа в связи с их обогащением. Это рассматривается нами по результатам изучения руд трех месторождений с различным уровнем титанистости: *низкотитанистых руд* (НТiP) — (Собственно-Качканарское месторождение, Средний Урал), приуроченных к габбро-пироксенитовому массиву в западном крыле Тагиломегасинклинория \rightarrow *среднетитанистых руд* (СТiP) — (Чинейское месторождение, участок «Магнитный», Забайкалье), приуроченных к расслоенному габброидному интрузиву, локализованному в юго-западной части Кодаро-Удоканского прогиба среди терригенно-карбонатных отложений \rightarrow *высокотитанистых руд* (ВТiP) — (Пудожгорское месторождение, Карелия), приуроченных к пологопадающей интрузии габбро-диабазов, внедрившихся в массив гранитоидов. Руды за счет их ванадистости относятся к комплексным. Вредные примеси фосфор и сера присутствуют в небольших количествах. Сравнивая химический состав руд, следует подчеркнуть, что их Fe входит в состав нескольких рудных минералов (титаномагне-

тит, ильменит), сульфиды (пирит, халькопирит и др.) и железосодержащие силикаты. Наиболее значимая (типоморфная) особенность руд связана с 3-м уровнем минералого-технологической неоднородности их главного рудного минерала — титаномагнетита, индивиды которого, как правило, представлены природными полиминеральными микроагрегатами [4]. Это обусловлено особенностями их формирования в системе $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ при широком диапазоне высоких температурах 400–1300 °С (Кудрявцева и др. 1982; Haggerty, 1991 и др.), близких к идеальным рядам продуктов распада твердого раствора (ПТР) в виде тонких включений вторичных минералов. В состав включений в титаномагнетит могут входить ильменит, ульвошпинель, шпинели типа плеонаста и др., а также нерудные минералы, захваченные при росте кристаллов, в том числе высокотитанистый силикат — титанит. Поэтому титаномагнетит за счет проявления в нем на разных стадиях кристаллизации тонких микровключений является полиминеральным. При измельчении и сепарации эти включения в значительной степени в связи с изменением размерного фактора и особенностей взаимосвязей с матрицей не могут быть отделены от основного рудного минерала. *Крайне неоднородный реальный состав рудного минерала четко удается проследить при микрорентгеноспектральном анализе (МРСА).* Причем, многостадийность распада и преобразования исходного титаномагнетита, предвиденная рядом исследователей [9 и др.], проявляется в пространственно-временных рамках с постепенным «самоочищением» его через стадии образования зонального — секторального — блокового строения (рис. 3) за счет различной природы постмагматического этапа минералообразования и более поздних метасоматических изменений. Это существенно зависит от геолого-структурной позиции МПИ и минералогических особенностей вмещающих пород, определяющих характерные закономерности для выделений индивидов основного рудного минерала в рудах различной титанистости. Оценить степень минералого-технологической неоднородности титаномагнетитов позволяют методы МРСА и ядерной гамма-резонансной спектроскопии (ЯГРС) [3].

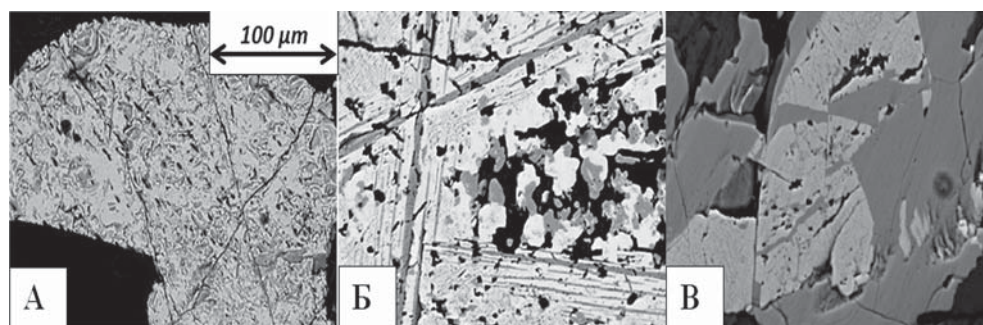


Рис. 3. Сложное строение микроагрегатов титаномагнетита (выявлено РСМА): А — субмикронные включения ильменита и плеонаста в образцах руд Собственно-Качканарского месторождения, Б — пластины и ламели ильменита в образцах руд Чинейского месторождения, В — блоки ильменита в образцах руд Пудожгорского месторождения

Количественная оценка минералого-технологических неоднородностей по изменчивости элементного и фазового состава титаномагнетита руд позволила нам разработать конкретные методические рекомендации при изучении на анатомическом срезе индивидов (микроагрегатов) с использованием корректного растрового микронзондового анализа [1, 2]. При этом для учета реального состава минерала в связи с оценкой обогатимости руд, а также сложностью и многообразием его выделений необходимо проводить исследование и оценку МТН как с определением абсолютных содержаний наиболее значимых элементов (Fe, Ti, V), так и с учетом относительных коэффициентов титанистости $k_{\text{Ti}} = [(\text{TiO}_2/\text{Fe}) \cdot 10^2]$ и ванадистости $k_{\text{V}} = [(\text{V}_2\text{O}_5/\text{Fe}) \cdot 10^2]$ не только в точке, но и в пределах площади микроагрегатов [5].

Это позволит более корректно оценивать степень изменчивости состава минерала, зерен и обломочных малых частиц при обогащении руд, получать дополнительную информацию о генетических особенностях процессов рудообразования и, что немаловажно, предопределять эффективность раскрытия в различной крупности измельчения и последующей магнитной сепарации. Именно площадная количественная оценка содержаний и распределения в зерне минерала Fe-Ti-V с учетом k_{Ti} и k_{V} показывает, что степень МТН определяется в нем особенностями проявления различных по морфологии и размерам включений как в виде продуктов распада твердого раствора (ильменит, ульвошпинель, титанит), так и других, в том числе, нерудных составляющих (продукты лейкоксилизации и др.). При определении среднего содержания элементов с учетом k_{Ti} и k_{V} в пределах площадей титаномагнетита подразделены нами по степени неоднородности на 3 категории: высокотитанистые (В-Тmt 1) при содержании Ti более 10 %; среднетитанистые (С-Тmt 2) соответственно — Ti = 6–10 % и низкотитанистые (Н-Тmt 3) — Ti менее 6 %. Методом ЯГРС установлено, что Ti может входить в структуру минерала в качестве изоморфной примеси только до 2, реже 3 %, а остальной Ti представлен в основном продуктами распада твердого раствора и вторичными нерудными минералами. В конечном итоге

это позволило нам определить типоморфные текстурно-структурные признаки титаномагнетитов из руд 3-х геолого-промышленных типов месторождений [2]. В основном для них характерны неоднородные текстуры и структуры вкрапленного типа по размерам и морфологии минеральных индивидов, нередко образующих подтипы — пятнистых, полосчатых, прожилковых, зональных, блоковых и других образований в

Таблица 1

Основные элементы состава и коэффициенты МТН титаномагнетита (по данным РСМА — площадные замеры на анатомическом срезе в крупности 50 мкм)

Месторождения	Fe, %	TiO ₂	V ₂ O ₃	Коэффициенты МТН минерала	
				Титанистости	Ванадиистости
ТИТАНОМАГNETИТ-Н (низкотитанистые руды)					
Собственно Качканарское	Ср. 66 (64,4–67,9)	Ср. 3,0 (2,7–3,9)	Ср. 0,8 (0,1–1,5)	4,6 (4,1–5,7)	1,1 (0,1–2,4)
	Ср. 69,0 (68,5–71,9)	Ср. 2,0 (1,5–2,9)	Ср. 0,5 (0,5–1,1)	1,5 (0,9–2,7)	0,8 (0,1–2,1)
ТИТАНОМАГNETИТ-С (среднетитанистые руды)					
Чинейское Магнитный	Ср. 59,2 (57,4–60,8)	Ср. 11,7 (1,0–13,2)	Ср. 1,3 (0,7–1,8)	20, (17,5–23,1)	2,0 (1,1–3,1)
	Ср. 57,3 (56,4–58,8)	Ср. 10,3 (8,7–11,2)	Ср. 1,4 (1,4–1,5)	18 (15–20,)	2,2 (1,8–2,5)
ТИТАНОМАГNETИТ-В (высокотитанистые руды)					
Пудожгорское	Ср. 56,0 (49,1–60,6)	Ср. 18,9 (15,2 – 24,4)	Ср. 1,3 (1,0 – 1,7)	34,0 (26,4–47,9)	3,0 (1,9–3,1)
	Ср. 53,0 (45,2–61,7)	Ср. 20,9 (15,1–24,2)	Ср. 1,6 (1,0–2,1)	39,1 (26,1–49,0)	2,83 (2,2–4,0)

рудных телах. Это обуславливает возможность сбрасывания в разной крупности дробления части блоков пустой и малорудной породы на стадии рудоподготовки методами сухой магнитной сепарации (и гравитации). Как показали минералогические исследования наиболее тонко- и мелкозернистые выделения рудного минерала (ср. 0,163–0,284 мм), образующие сидеронитовые агрегаты (структуры) между силикатами в пироксенитах (≈70 %) и оливинитах, характерны для весьма бедных руд (Fe≈18 %) Собственно-Качканарского месторождения при самом низком соотношении TiO₂/Fe (ср. 0,078). В рудах Чинейского месторождения, связанных с габброидами, выделения минерала в основном среднезернистые с равномерным распределением (ср. 0,325–0,412 мм) и TiO₂/Fe (ср. 0,186). В Пудожгорских рудах, связанных с кварцевыми долеритами, выделения мелко- средне- крупновкрапленные (ср. 0,522–0,531 мм) при самом высоком TiO₂/Fe (ср. 0,282). При этом именно по данным МРСА установлено, что титаномагнетит месторождений отличается крайне высоким 3-м уровнем минералого-технологической неоднородности, что является определяющим фактором в оценке и эффективности обогатимости руд. Количественное выражение особенностей МТН титаномагнетита по ценным компонентам приведено в табл. 1. Для учета реального состава титаномагнетита в связи с оценкой обогатимости руд, определения реальных содержания основных элементов

(Fe, Ti, V) МРСА проведено на анатомических срезах образцов в пределах площади индивидов в 20 и 50 мкм. Именно в этой крупности уже не удается удалить даже при тонком (менее 44 мкм) измельчении и последующей магнитной сепарации основную часть включений минералов для повышения качества концентратов. Анализ данных табл. 1 свидетельствует о снижении содержания Fe в рудном минерале с возрастом TiO₂ и соответственно V₂O₃. Это обусловлено изменением как состава вмещающих пород, так и их сложной генетической природой. Сопоставление данных ЯГРС, термического анализа и МРСА [2] показывает, что содержание изоморфного Ti в структуре минерала не превышает 1–2, иногда 3 %. Основная же часть его связана с различными по морфологии и размерам вкрапленниками ильменита и ульвошпинели в матрице минерала в ряду низко-, средне- и высокотитанистых руд за счет различной природы магматического этапа минералообразования и более поздних метасоматических изменений. Так, в НТiP титаномагнетиты характеризуются весьма тонкими проявлениями продуктами распада твердого раствора зонального и секториального, частично блокового строения в анатомии зерен. В СТiP минерал уже отличается проявлением более четкого зонального, блокового и скелетного строения. В ВТiP анатомия его зерен преобразуется весьма существенно за счет формирования сложных блоковых и скелетных структур при существенной роли нерудных включений.

Таблица 2

Особенности эволюции МТН 3-го уровня титаномагнетита в различных минеральных ассоциациях руд магматического генезиса, определяющей качество полученного концентрата при обогатимости по разным технологическим схемам

Месторождение	Компонент	Содержание компонента в масс. %			МТН – 3-й уровень		
		среднее по точкам	среднее по площади	концентрат*	kTi / kV		
					среднее по точкам	среднее по площади	концентрат*
Собственно-Качканарское	Fe	69,90	66,00	64,30	3,6 / 0,9	4,6 / 0,91	3,7 / 0,86
	TiO ₂	2,52	3,01	2,40			
	V ₂ O ₃	0,62	0,60	0,55			
Чинейское	Fe	68,52	65,20	62,0	4,5 / 1,7	11,8 / 1,2	16,1 / 1,8
	TiO ₂	3,12	7,70	10,0			
	V ₂ O ₃	1,16	0,80	1,14			
Пудожгорское	Fe	67,16	64,20	59,00	6,3 / 2,4	16,8 / 2,1	23,9 / 2,2
	TiO ₂	4,24	10,76	14,10			
	V ₂ O ₃	1,59	1,34	1,28			

* — содержание в концентрате определено химическим анализом

Таблица 3

Характер раскрытия рудных и нерудных минералов в классах крупности пробы НТР крупностью – 1 мм

Класс крупности, мм	Выход класса, %	Доля рудной фазы в сростках, %						K _p	K _{нр}	Минеральный состав фракции		
		Свободные 96–100	Богатые 71–95		Рядовые 31–70		Бедные 6–30				Без рудые 0–5	
			р	н/р	р	н/р	р					н/р
-1 + 0,5	26,62	6,6	7,2		43,3		30,9		12,3	13,4	24,3	Преобладают во всех фракциях пироксены и амфиболы, немного оливина, вторичные минералы — хлорит, серпентин, встречаются плагиоклазы и томпонит. Из рудных минералов преобладают Ti-V-магнетит и собственно магнетит, немного ильменита, гематита, сульфидов, единичные проявления благородных металлов (платиноидов и золота). Заметны различия в распределении по классам пироксенов, амфиболов и оливина. Как правило, оливин и амфиболы тяготеют к более крупным классам, а пироксен в значительном количестве присутствует как в мелких, так и тонких классах.

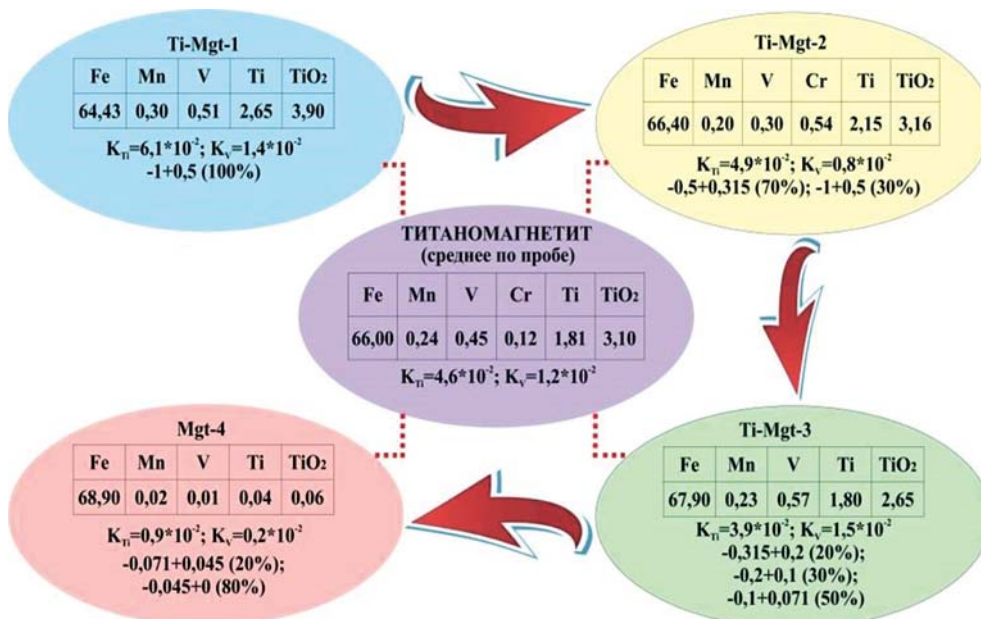


Рис. 4. Эволюция состава зерен и частиц разновидностей рудного минерала в гранулярном спектре классов рассева руды (РСМА, Быстров И. Г.)

Резко усложняется анатомия зерен под влиянием наложенных процессов рудогенеза на фоне микротектонических преобразований в ряду: НТiP — СТiP — ВТiP (табл. 2).

Приведенные результаты по обогатимости проб руд в ВИМСе (при оценке 3-го уровня минералого-технологической неоднородности по данным РСМА для исходных руд и химии для концентратов) показывают, что: 1) сложные взаимоотношения минеральных фаз — в виде многостадийных продуктов распада твердого раствора (ильменит, ульвошпинель, маггемит, гематит в матрице магнетита) и нерудных минералов (прослеживаются *характеристики изменчивости* размеров собственно титаномагнетита, с учетом влияния захваченных его матрицей в процессе кристаллизации алюмосиликатов, а также продуктов эволюции шпиделя за счет наложенных явлений лейкоксенизации, титанитизации и др.) обусловили изменчивость качества полученных концентратов и эффективность схем обогащения руд в целом; 2) многие из обозначенных параметров удается определить комплексированием площадного (растрового) и точечного РСМА. Растровый анализ позволяет определять реальный состав титаномагнетита в связи с оценкой обогатимости в различном гранулометрическом спектре руд. Точечные же анализы, в этом случае, используются для уточнения содержания основных и примесных элементов в минерале и слагающих его

продуктов распада твердого раствора, в том числе с учетом kTi и kV. Причем минералого-технологическая неоднородность минерала в ряду руд различной степени титанистости возрастала, что предопределило качество получаемого концентрата. Это позволяет более корректно оценить именно по 3-му уровню минералого-технологической неоднородности изменчивость состава минерала — его зерен и обломочных малых частиц при обогащении руд, давая возможность проследить эволюцию состава титаномагнетитов в рудах и в целом эффективность их переработки.

Оценивая особенности раскрытия минералов руд, как показано нами для НТР (табл. 3, рис. 4), необходимо использовать понятие о долях рудной и нерудной фаз в сростках обломочных малых частиц, т.к. при измельчении руд, начиная с размеров меньше природных зе-

Таблица 4
Минеральный состав пробы исходной руды крупностью – 1 мм

Минерал	Среднее содержание в пробе, %	Классы крупности, мм					
		–1+0,5	–0,5+0,315	–0,315+0,2	–0,2+0,074	–0,074+0,045	–0,045+0
Пироксен	67,1	56,5	65,7	66,5	74,3	71,5	63,0
Амфибол	4,1	8,8	9,3	7,9	—	7,3	3,6
Хлорит	3,8	3,8	3,6	2,5	2,7	5,3	6,1
Серпентин	4,5	1,3	5,7	4,6	5,4	6,0	6,1
Титаномагнетит	16,9	27,7	10,7	15,9	12,9	7,9	17,0
Ильменит	0,5	—	—	—	2,0	—	—
Оливин, шпинель	2,6	1,9	5,0	1,3	1,4	2,0	4,2
Плагиоклаз	0,5	—	—	1,3	1,3	—	—

рен, минералы претерпевают порой существенные изменения с образованием новых фаз, вплоть до перехода их в аморфное состояние.

В изучаемых пробах это связано с преобразованием рудного минерала в морфотропном ряду изменений симметрии и состава: *титаномагнетит* → *магнетит* → *маггемит (Ti-маггемит)* → *гематит*, что потенциально заложено генезисом минерала. МРСА четко выявляет блоковое строение титаномагнетита с тонкими продуктами распада твердого раствора — ульвошпинель, ильменит, плеонаст, маггемит. Заметно порой значимое изменение содержаний Ti и других элементов группы Fe в отдельных блоках, вплоть до образования блоков собственно магнетита. ЯГРС, рентгенофазовый анализ и рентгеновская микротомография позволяют фиксировать изменения фазового состава обломочных малых частиц. Особенно четко это проявляется в тонких классах крупности и подтверждается изменением kTi и kV по сравнению со средним содержанием в минерале в сторону их снижения (рис. 4), отражая эволюцию состава зерен и частиц разновидностей рудного минерала в разных классах гранулярного спектра измельченной руды. Важно также обратить внимание на тот факт, что практически во всех классах крупности весьма изменчив состав зерен и обломочных малых частиц как по рудному, так и нерудному минералу (табл. 3). Об этом же говорят существенные различия в количестве свободной рудной фазы и распределении ее доли в срезках (табл. 4) по мере изменения классов крупности и их выхода. Здесь же дана краткая характеристика минерального состава фракций. При этом необходимо подчеркнуть, что нерудная фаза раскрывается лучше, чем рудная. С учетом же морфоструктурных особенностей выделений нерудных минералов (с учетом крупности, кристаллографии форм, спайности, трещиноватости, блочности и ориентировки в образце) в исходной руде и изменении микротвердости происходит избирательность их измельчения, определяющая как перераспределение по разным классам крупности зерен и частиц, так и в разной степени перемеление вторичных минералов (хлоритов, серпентинов).

Одновременно за счет переизмельчения части более крупных рудных зерен при магнитной сепарации образуются флокулы (вторичные техногенные агрегаты об-

ломочных малых частиц рудных и нерудных минералов) как снижающие качество концентратов, так и увеличивающие потери Fe в хвостах. Все эти особенности поведения минералов четко увязываются с показателями как по выходу классов крупности, так и по раскрытию рудной и нерудной фаз, определяя эффективность разработки схем обогащения руд с учетом роли различных уровней минералого-технологической неоднородности с учетом их генетической природы.

Углубленное изучение вещественного состава, текстурно-структурных особенностей, физико-механических и химических свойств руд с привлечением для их познания комплекса современных минералого-аналитических и физических методов исследования; творческое использование достижений и новых знаний из области кристаллохимии, кристаллофизики, минералогии, (онтогении минералов, технологической минералогии) и технологического эксперимента (по веществу, в широком понимании), позволяют оценить вклад в минералого-генетическую природу технологических свойств минералов, разработку принципов оценки минералого-технологической неоднородности руд.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быстров, И.Г. Специфика рентгеноспектрального микроанализа титаномагнетитовых руд при оценке их качества / И.Г. Быстров, Б.И. Пирогов // Роль технологической минералогии в получении конечных продуктов передела минерального сырья: Сб. статей X Российского семинара по технологической минералогии. — Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2016. — С. 72–76.
2. Быстров, И.Г. Морфоструктурные и конституционные особенности титаномагнетита железных руд Пудожгорского месторождения / И.Г. Быстров, Б.И. Пирогов, О.А. Якушина / Геология рудных месторождений. — 2015. — № 6. — С. 546–572.
3. Гаранин, В.К. Применение электронно-зондовых приборов для изучения минерального вещества / В.К. Гаранин — М.: Недра, 1983. — 216 с.
4. Пирогов, Б.И. Минералого-технологические особенности неоднородности титаномагнетитов РФ и методы их оценки / Б.И. Пирогов, И.Г. Быстров // Рациональное недропользование: Сб. науч. трудов IX Всероссийского семинара по технологической минералогии. — Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского Гос.Техн.Ун-та им. Г.И. Носова, 2014. — С. 180–187.
5. Пирогов, Б.И. Особенности вещественного состава титаномагнетитовых руд магматического генезиса, определяющие их обогатимость / Б.И. Пирогов, Е.С. Бронницкая, Ю.М. Астахова и др. // Разведка и охрана недр. — 2013. — № 2. — С. 47–51.
6. Пирогов, Б.И. Технологическая минералогия железных руд / Б.И. Пирогов, Г.С. Порохов, И.В. Холошин и др. — Л.: Наука, 1988 — 304 с.

7. Петровская, Н.В. Признаки неоднородности минералов и их генетическое значение / Н.В. Петровская // Записки всесоюзного минералогического общества. — 1977. — Ч. 106. — Вып. 1. — С. 34–44.
8. Поваренных, А.С. Об одной особенности процесса лимонитизации окислов железа из Кривого Рога / А.С. Поваренных // ДАН СССР. — 1952. — Т. LXXXV. — № 6. — С. 1345–1347.
9. Рамдор, П. Рудные минералы и их сростания / П. Рамдор. — М.: Изд-во Иностранная ЛИТЕРАТУРА, 1962. — 1132 с.
10. Ревнивцев, В.И. Роль технологической минералогии в обогащении полезных ископаемых / В.И. Ревнивцев // Записки всесоюзного минералогического общества. — 1982. — Вып. 4. — С. 4–20.
11. Ревнивцев, В.И. Технологическая минералогия обломочных малых частиц / В.И. Ревнивцев, Г.И. Доливо-Добровольская, П.С. Владимиров. — СПб.: Наука, 1992. — 248 с.
12. Юшкин, Н.П. Практическое значение онтогении минералов / Н.П. Юшкин // Записки всесоюзного минералогического общества. — 1980. — Вып. 4. — С. 385–395.

© Пирогов Б.И., 2019

Пирогов Борис Иванович // pirogov_bi@inbox.ru

УДК 552.321.6+ 553.67

Ромашкин А.Е., Ильина В.П., Попова Т.В. (Институт геологии Карельского НЦ РАН, Петрозаводск)

КОМПЛЕКСНАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ И МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УЛЬТРАБАЗИТОВ ГАЙКОЛЬСКОЙ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ ИНТРУЗИИ (КАРЕЛИЯ) И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

*Выполнена геологическая и минералого-технологическая оценка Гайкольской дифференцированной интрузии (Карелия). Гайкольское проявление относится к комплексным объектам. Кроме добычи хромита и медно-никелевых руд к перспективным полезным ископаемым относятся магнезиальные ультрамафиты. Показана возможность применения ультрамафитов пироксенового состава как высокомагнезиального минерального сырья для облицовочных строительных материалов. **Ключевые слова:** дифференцированная интрузия, ультрабазиты, микроструктура пироксенитов, диопсид, оливин.*

Romashkin A.E., Iilina V.P., Popova T.V. (Institute of Geology, KarRC RAS, Petrozavodsk)

INTEGRATED GEOLOGICAL AND MINERALOGICAL EVALUATION OF ULTRABASIC ROCKS FROM THE GAIKOLA DIFFERENTIATED INTRUSION (KARELIA) AND THEIR APPLICATION

*Geological and mineralogo-technological evaluation of the Gaikola differentiated intrusion, Karelia, was performed. The authors have shown that Gaikola is a complex occurrence. In addition to chromite and copper-nickel ores, other useful minerals are Mg-rich ultramafics. It has also been shown that ultramafics of pyroxene composition can be used as a high-Mg raw material for the production of facing building materials. **Keywords:** differentiated intrusion, ultrabasic rocks, microstructure of pyroxenites, diopside, olivine.*

Ведение

Минералого-технологическое изучение ультрабазитов Гайкольского интрузива в Республике Карелия как источника магнийсодержащего минерального сырья актуально в связи с изучением магнезиального матрикса известных месторождений сульфидных медно-никелевых руд при комплексном освоении недр. Ультрабазиты в них часто являются вмещающими и вскрышными породами, также они могут быть частью горнопромышленных отходов, поступающих в отвалы после обогащения основной руды. Подобные породы были изучены сотрудниками Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева КолНЦ РАН (ИХТРЭМС). Они исследовали вскрышные породы и отвалы, содержащие магнезиальные ультрабазитовые породы, которые в большом количестве образуются при флотационной переработке сульфидной медно-никелевой руды «ОАО «Кольская ГМК». Породообразующими минералами в них являются оливин, клинопироксен (диопсид, геденбергит), ортопироксен (энстатит, гиперстен), роговая обманка. Из аксессуарных минералов присутствуют ильменит, магнетит. Вторичными минералами являются серпентин и тальк. В результате минералого-технологических исследований установлено, что основным потребителем таких магнезиально-силикатных отвальных и вскрышных пород может быть промышленность стройматериалов и, как показано в литературных материалах и патентах, они используются также в производстве строительных и керамических материалов [8].

Основной задачей данной работы является выполнение геологической и минералого-технологической оценки ультрабазитов пироксенового состава проявления медно-никелевых руд Гайколя как высокомагнезиального минерального сырья для облицовочных строительных материалов.

Изучение геологического строения интрузии

Гайкольская интрузия расположена в Восточно-Карельской минералогической зоне (восточная часть Фенноскандинавского щита). Она представляет собой крупное интрузивное тело основных-ультраосновных пород с признаками дифференциации. Ее географическое положение — на берегу оз. Гайколь, в Калевальском районе Республики Карелия, возле п. Кепа. Массив приурочен к палеопротерозойской Гайкольской структуре, являющейся СВ ветвью Шомбозерского синклинория. Гайкольское проявление следует относить к комплексным объектам металлических (Cr, Ti, Ni, Cu) руд, а также благороднометалльных, кроме того, к перспективным относятся магнезиальные ультрамафиты.

В пределах гайкольского комплекса, в рамках геологической съемки масштаба 1:50 000, проводились мелкообъемные разведочные работы с проходкой канав и разведочным бурением [3]. В ультрабазитах была отмечена сульфидная вкрапленность с содержанием никеля до 0,25–0,30 %, представленная вкрапленностью и микропрожилками пентландита. Оруденение