DOI 10.18454/PMI.2016.3.369

Геология

УДК 549:553:622.7

ОНТОГЕНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НА МИКРО- И НАНОУРОВНЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ИНДИВИДОВ И АГРЕГАТОВ ДЛЯ РЕСТАВРАЦИИ УСЛОВИЙ РУДОБРАЗОВАНИЯ И ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Р.Л.БРОДСКАЯ[1], Ю.Б.МАРИН[2]
[1] *Всероссийский научно-исследовательский геологический институт* (*ВСЕГЕИ*), *Санкт-Петербург*, *Россия*
[2] *Санкт-Петербургский горный университет*, *Россия*

В организации системы рудоподготовки и выбора оптимальных методов сепарации минерального сырья важно учитывать типоморфные признаки и свойства минералов и их агрегатов, определяющие минералого-технологические особенности типов и сортов руд. В технологические схемы вовлекаются тонкодисперсные руды, учет размеров частиц становится определяющим фактором в технологиях обогащения.

При дезинтеграции минерального агрегата, при раскрытии сростков и освобождении поверхности срастания, структура минерального зерна релаксирует, образуя новые связи. Граница минерального индивида может «открыть индивид» для его разрушения (растворения) или роста, может взять на себя функции сохранения объема зерна. Адаптация агрегата к внешним условиям происходит за счет изменения ориентировки, протяженности и площади границ индивидов и буферной зоны их срастания. В соответствии с энергетическим балансом границ индивидов и границ их срастания осуществляются все структурные преобразования в минеральном агрегате. При этом происходит «рафинирование» вещества, кристаллической решетки минеральных индивидов, аннигилируются ее дефекты и дислокации. В процессе релаксации структуры одного минерала может зародиться другой, индивиды которого могут остаться в рассеянном состоянии, могут обнаружить способность к агрегации в зависимости от энергетического баланса их границ и матрицы.

Онтогенический подход к оценке особенностей минеральных индивидов и агрегатов позволяет реставрировать условия рудообразования, обеспечивает выбор оптимальных условий раскрытия зерен полезного компонента, когда кроме размера зерен учитывается их форма, природа срастаний, особенности границ срастающихся минералов, неоднородности состава и свойств минеральных индивидов. В результате открываются новые возможности рентабельной и экологически более чистой разработки месторождений, переоценки масштабов рудоносности в сторону понижения кондиций, определения рентабельного спектра попутно извлекаемых компонентов.

Ключевые слова: минеральные индивиды и агрегаты, микро- и наноминералогия, онтогенический анализ, границы срастания, технологические свойства.

***Как цитировать эту статью*:** Бродская Р.Л. Онтогенический анализ на микро- и наноуровне минеральных индивидов и агрегатов для реставрации условий рудообразования и оценки технологических свойств минерального сырья / Р.Л.Бродская, Ю.Б.Марин // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.369-376. DOI 10.18454/PMI.2016.3.369

Минерально-сырьевая база России по многим видам полезных ископаемых представлена труднообогатимыми, нередко комплексными рудами. Одним из путей решения проблемы их переработки является детальное изучение тонких особенностей строения и вещественного состава руд с привлечением широкого комплекса современных физико-химических методов анализа и использование новых знаний в области кристаллохимии, кристаллофизики и минералогии. Еще В.И.Ревнивцев, первый председатель Комиссии по технологической минералогии Российского минералогического общества, отмечал, что только учет генезиса кристалла минерала, его образования и преобразования, возникающих в ходе этого изменений состава и структуры может дать объективные представления о его реальных технологических свойствах, добавляя, что именно этим объясняется то, что одни и те же минералы из разных месторождений или разных участков одного месторождения ведут себя при обогащении по-разному [17].

Особое место занимают отходы добычи и переработки полезных ископаемых, оказывающие, с одной стороны, значительную экологическую нагрузку на окружающую среду, с другой, являющиеся потенциальными источниками черных, цветных, благородных, редких металлов и неметаллического сырья. Перспективы промышленного освоения такого сырья могут быть связаны только с созданием эффективных технологий его переработки, базирующихся на максимально полной информации о вещественном составе и строении техногенного сырья.

В последние два десятилетия, благодаря современным методам определения изотопного, химического, минерального состава пород, руд и техногенных отходов и новым, получающим все большее развитие технологиям переработки минерального сырья [9-14], появились принципиально новые возможности выделения нетрадиционных видов металлических и неметаллических полезных иско-

DOI 10.18454/PMI.2016.3.369

паемых с выявлением новых типов природных и техногенных месторождений. Установление ранее неизвестных свойств природных и возникающих в ходе переработки наночастиц открывает большие возможности разработки нанотехнологий извлечения и обогащения нужных химических соединений и элементов [3, 5]. В результате содержания благородных и редких элементов в считавшихся «пустыми» породах (главным образом, в осадочных породах, корах выветривания и черных сланцах) становятся промышленными, резко возрастает возможность комплексного использования сырья месторождений бурых и каменных углей, углеродистых пород, фосфоритов, бокситов, битумов нефтегазоносных залежей и др.

Минеральный индивид рассматривается как физическое тело, построенное из регулярно распределенных в пространстве атомов, как химическое соединение, как продукт химических реакций, как элементарная составляющая горных пород и руд, как кристаллический организм с особым строением и функциями, как источник генетической информации, как объект практического использования. Интервенция в микромир является важным этапом развития современной минералогии с появлением таких ее направлений, как микро- и наноминералогия [12, 14]. Этому способствовал прогресс методов структурных и морфологических исследований, особенно различных видов микроскопии (электронной, туннельной, атомно-силовой) и спектроскопии (инфракрасной и комбинационного рассеяния), позволяющих осуществлять наиболее точную диагностику минеральных индивидов и исследовать отдельные атомы и их мельчайшие закономерные группировки. С помощью этих методов раскрывается структурно-химическая неоднородность как неотъемлемое свойство минеральных индивидов, надмолекулярная структурная упорядоченность некристаллического характера в природных твердых веществах, считавшихся аморфными. Новые необычные структуры и явления открываются в результате изучения твердых углеводородов, углеродистых веществ и самого углерода.

Теоретически можно определить размер минеральных индивидов до несколько нанометров. Это образования из нескольких элементарных ячеек – наноиндивиды (10^{-7}-10^{-9} м), в сочетании которых уже устанавливается регулярность, периодичность и формируется структурно несопряженная граница с окружающей средой (нанокристаллы и другие наноразмерные твердые частицы с регулярной структурой). Подобные наноиндивиды известны в различных рентгеноаморфных образованиях, например в железомарганцевых конкрециях, среди продуктов распада изоморфных минеральных систем и др. Форма, физико-химические свойства наноиндивидов (температура плавления, реакционная способность, магнитность, электропроводность, прочность) существенно отличаются от макро- и микроиндивидов [6, 8, 9, 12-14] вследствие несравнимо большей доли поверхностных атомов (нижняя граница наноструктур около 1 нм, когда все атомы являются поверхностными).

А.М.Асхабовым развиваются представления о структурной организации вещества в нанометровом диапазоне размеров и ее роли в формировании кристаллических и некристаллических материалов («кватаронная концепция») [2]. Кватароны – это новая форма атомно-молекулярной организации вещества на наноуровне, новое состояние вещества, которое, однако, не имеет макроскопических аналогов. Кватаронное состояние при определенных условиях трансформируется в обычное агрегатное состояние вещества (жидкое, кристаллическое и др.). Кватароны являются основой для формирования всего комплекса возможных форм структурной организации вещества на наноуровне, начиная от обычных тетра- или октаэдрических группировок до широко известных фуллеренов (и нанотрубок) либо плотных додекаэдрических или икосаэдрических кластеров. С этих позиций к минералам относят и рентгеноаморфные твердые вещества с определенным образом организованной структурой (фуллериты, кватариты – ультрадисперсные упорядоченные материалы с дискретным внутренним строением, опалы и т.д.).

Формирование наноиндивидов и наноразмерных структурных кластеров вследствие химического ультрадиспергирования или конденсации атомов [2, 12] в области кристаллизации минеральных индивидов ведет к увеличению их неоднородности. Исследование нанонеоднородности минералов затруднено в связи с особыми физико-химическими свойствами наночастиц, которые практически не учитываются в современной аналитической практике [6, 7]. Можно наметить следующие структурные типы вещественной неоднородности минеральных индивидов: 1) квазиоднородные кристаллические структуры с изоморфными компонентами и микропримесями; 2) кристаллические сверхструктуры с регулярной неоднородностью; 3) структуры с аномальными структурно-вещественными кластерами; 4) структуры с микро- и нановключениями [1, 16].

Химическая неоднородность выступает как самостоятельный «двигатель» онтогенического развития кристалла, приводя к саморазвитию дефектов в виде кластеризации, гетерометрии, автодеформации и других явлений [1]. Дефектообразование в кристалле определяет возможность диффузии и твер-

DOI 10.18454/PMI.2016.3.369

дофазных реакций в кристаллических телах [3, 5]. Многие элементы-примеси, рассматривавшиеся ранее как изоморфные, входят в состав собственных минеральных фаз либо в состав флюидных и расплавных включений в минерале-хозяине. Это важно, поскольку нарушения гомогенности состава минералов влияют на поведение минерального вещества в технологических процессах, а ультратонкие минеральные фазы, определяющие эти неоднородности, могут сами по себе иметь промышленную ценность. Структуры с микро- и нановключениями осложняются двух- и трехмерными дефектами, блоками с углами разориентации более 0,1° и фазовыми границами. Главной причиной появления минералов-узников является захват растущими гранями кристалла кристаллических частиц вследствие поверхностного агрегирования примеси и сопряженного зарождения кристаллов синтактической фазы, гравитационного осаждения кристаллических зародышей либо неполного растворения замещаемой при метасоматозе фазы [16].

Новые знания о минеральном микромире позволяют говорить об иерархических уровнях структурно-химической неоднородности кристаллов, на каждом из которых действуют специфические минералогенетические тенденции [12]: макроуровень индивидов и агрегатов (> 100 мкм), микроуровень анатомии индивидов (0,1-100 мкм) и наноуровень атомных кластеров (0,001-0,1 мкм). Методически правильной является такая последовательность онтогенического анализа минеральной системы: агрегат – индивид (матрица) – микронеоднородность индивида – нанонеоднородность индивида [1].

Типоморфными особенностями строения минерального агрегата (в том числе рудного) являются все элементы его структуры и текстуры, охарактеризованные количественно. По количественным оценкам строения агрегата можно моделировать условия его образования и преобразования. На каждой стадии эволюции процесса минералообразования возникает соответствующий ей «отклик» в системе кристаллизации – минеральная генерация. Генерации минеральных индивидов при их агрегации не могут быть равновесны друг с другом. При образовании их границы аккумулировали разное количество энергии, поскольку зарождались и росли на разных этапах развития процесса. Сформировавшийся в условиях высоких скоростей диссипации энергии (например, на магматической стадии) агрегат имеет энергетически и структурно неравновесные внутренние границы. Оказавшись в других условиях, агрегат адаптируется к новым условиям за счет энергии, накопленной на внутренних границах и в кристаллической решетке минералов. Изменяется энергия системы, и энергии индивидов приходят в равновесие друг с другом на общих границах срастания, границы в агрегате становятся (в идеале) структурно равновесными. Границы могут быть неравновесными, но устойчивыми.

Сложные системы представляют собой и минеральные индивиды, состоящие из матрицы минерала-хозяина и заключенных в ней микро- и нановключений других минеральных фаз, газов и жидкостей. Эти включения могут иметь по отношению к матрице прото-, син- и эпигенетическую природу. Микровключения находятся в закономерных, иногда достаточно сложных связях с компонентами, входящими в состав матрицы в качестве изоморфных примесей. Многие элементы-примеси входят в состав минеральных микро- и нанофаз или многофазных микровключений. В одном и том же минерале из разных генетических типов пород и руд могут присутствовать различные виды включений – микропарагенезисы, меняющиеся под влиянием внешних условий и, следовательно, имеющие типоморфное значение. Микропарагенезисы могут видоизменяться и в пределах одного индивида, имеющего зональное строение и претерпевшего сложную эволюцию в ходе своего развития. Варьирует состав и самой матрицы. Вариации выражены в отклонениях от стехиометрии и колебаниях содержаний элементов-примесей.

Отметим, что прочность минерального агрегата определяется плотностью его внутренних границ – границ минеральных индивидов – в единице объема разрушаемого агрегата. Основные тенденции развития технологий рудоподготовки к обогащению заключаются в снижении конечной крупности продукта [13, 14]. В технологические схемы вовлекаются тонкодисперсные руды, учет размеров частиц становится определяющим фактором в технологиях обогащения. С уменьшением размеров в области 1-100 нм наночастица как структурная единица представляется почти пределом в увеличении площади поверхности. Такая большая площадь поверхности обеспечивает нанокристаллам специфические характеристики, которые и создают непредсказуемый потенциал нанотехнологиям, в том числе и в процессах обогащения. Речь идет о необычных физических, химических и механических свойствах нанокристаллов, изменяющих кинетические и динамические характеристики руды.

Существует несколько методов получения наноминералов: плазменный; осаждение из газовой фазы, включая диссоциативную фотосорбцию; электроосаждение; синтез из гелевых растворов; ударное измельчение. Указанные подходы становятся составной частью технологий комплексной

DOI *10.18454/PMI.2016.3.369*

переработки природного и техногенного минерального сырья. Огромные возможности энергии поверхностных процессов наглядно продемонстрированы в адсорбофизических методах сепарации [9, 14]. Наноразмерные технологии предполагают изучение и внедрение механизмов извлечения ценных компонент на молекулярном, атомарном и электронном уровнях, когда появляется возможность управления технологическими процессами на уровне формирования полезного компонента [9-14].

Вовлечение новых видов минерального сырья в обогатительные технологии ведет к изменению понятия самого полезного компонента. Сегодня среди индустриальных наноминералов выделяют нанокомпозиты, нанотрубки, нановолокна. В большинстве случаев наноминералы превосходят по своим свойствам обычные аналоги. Нанокристаллы, благодаря своей способности менять длину световой волны, значительно увеличат возможности оптических свойств материалов. Наибольший интерес представляют оксидные наноминералы [14]. Наиболее активно разрабатывается использование оксидных наноминералов в области катализа. Оксидные наноминералы позволяют создавать наноразмерные активные слои, которые способны заменить традиционно применяемые драгоценные металлы и сплавы, используемые в преобразователях для снижения выбросов угарного газа, гидрокарбонатов и оксидов азота. Важную роль, несомненно, будут играть наноминералогические исследования как основа для дальнейших разработок в области направленного модифицирования физико-химических свойств минералов с целью расширения возможностей обогатительных нанотехнологий. Приоритетными исследованиями в этом направлении представляются кристаллохимические и кристаллофизические исследования в системе «газ – наночастица» в физических полях [9]. Важным параметром, определяющим эффективность модификации поверхности, является отношение площади поверхности к объему частиц, известная характеристика – удельная поверхность, зависящая *не только от размеров*, *но и от геометрии наночастиц*.

Чтобы учесть особенности изменения свойств минералов в динамике, в том числе и направленные на повышение степени их контрастности в технологическом режиме, следует иметь в виду, что они формируются на различных дискретных уровнях (макро-, микро-, наноуровнях) и проявляются в широком гранулометрическом спектре как при рудоподготовке, так и в различных узлах схемы обогащения. При тонком измельчении могут значительно измениться конституция минералов (вплоть до появления новообразованных фаз, явлений аморфизации и др.), свойства поверхности и др.

Онтогенический подход к оценке технологических особенностей минералов и руд обеспечивает: выбор оптимальных условий раскрытия зерен полезного компонента, когда кроме размера зерен учитывается их форма, природа срастаний, особенности границ срастающихся минералов; оптимизацию технологического процесса с учетом неоднородности состава и свойств минеральных индивидов (путем исследования их анатомии). В организации системы рудоподготовки и выбора наиболее оптимальных методов сепарации минерального сырья важно учитывать типоморфные признаки и свойства минералов и их агрегатов, определяющие минералого-технологические особенности типов и сортов руд с учетом глубины, комплексности, экологичности их переработки, высоких экономических показателей [5, 14, 17].

Граница срастания двух минеральных индивидов представляет собой область с постепенно меняющимися от одного индивида к другому значениями энергии, плотности, состава и других параметров. Структура границы несколько отличается от структуры кристаллической решетки минерального индивида. Отличие вызвано тем, что граница представляет собой краевую дислокацию кристаллической решетки и является буферной областью. Целесообразно различать понятия граница и поверхность границы минерального индивида [4, 5]. Поверхность границы индивида принято считать *двумерной фазой*. Она доступна исследованию методами оптической, электронной, атомно-силовой микроскопии, характеризуется некой микроскульптурой, шероховатостью и может быть сравнима с поверхностью грани. Мера шероховатости зависит от степени связанности структуры граничной области, от ее толщины, от скорости релаксации кристаллической решетки индивида в направлении той или иной границы, т.е. от энергии границы. Следовательно, и шероховатость поверхности индивида определяется кинетическими параметрами процесса роста индивидов и формирования агрегатов. Энергетические параметры границы могут фиксироваться геометрическим путем, при определении угловых отношений границы и узнаваемых габитусных граней, границы и кристаллооптических осей или иных кристаллографических элементов, а также путем количественной оценки шероховатости границы и расчета ее поверхностной энергии, удельной поверхностной энергии.

Известно два способа оценки энергетических характеристик границ срастания. Один из них состоит в измерении величины, пропорциональной удельной поверхности границы. Вторым – является оценка и расчет *атомарной плотности границы*. При этом вклад в поверхностную энергию дефектов кристаллической решетки разного типа, примесных ионов, нестехиометричность состава, объема и гра-

DOI 10.18454/PMI.2016.3.369

ницы индивидов остаются неучтенными. Главный вклад в значение величины поверхностной энергии вносит оценка периметра и шероховатости границы, а также расчет удельной поверхности зерна.

Структура границы непосредственно влияет на величину и оценку поверхностной энергии минерального зерна. При дезинтеграции минерального агрегата, т.е. при раскрытии сростков, при освобождении поверхности срастания, структура минерала релаксирует, образуя новые связи. Таким образом, граница минерального индивида функционально является мобильной и устойчивой, она может «открыть индивид» для его разрушения (растворения) или роста, может взять на себя функции сохранения объема зерна в зависимости от условий формирования. Адаптация агрегата к внешним геологическим или техногенным условиям происходит за счет изменения ориентировки, протяженности и площади границ индивидов и буферной зоны их срастания. В соответствии с энергетическим балансом границ индивидов и границ их срастания осуществляются все структурные преобразования в минеральном агрегате. Энергетический баланс и структура границ контролируются типом организации, насыщенности ионов в пределах краевой дислокации индивидов, типом организации краевых дислокаций в буферную зону, что определяет скорость и возможности «связывания» ионов поверхности в «границу» индивида. В этом смысле ее функция похожа на мембрану живой клетки.

Преобразование границ, изменение их структуры, ориентировки, энергонасыщенности происходит за счет не только внешних сил, но и освобождающейся энергии дефектов решетки при их миграции. Перекристаллизация агрегата приводит к формированию новых внутренних границ, новой структуры, адаптирующей агрегат к меняющимся условиям. Одновременно происходит «рафинирование» вещества и кристаллической решетки минеральных индивидов, аннигилируются ее дефекты и дислокации. Захваченные при предыдущей «быстрой» кристаллизации дисперсные рудные примеси отжимаются к границам зерен, образуют кластеры, которые, будучи структурированными, формируют решетку и, возможно, границу, т.е. новую фазу. Так, в процессе релаксации кристаллической структуры одного минерала может зародиться другой, индивиды которого могут остаться в рассеянном состоянии, но могут обнаружить способность к агрегации в зависимости от энергетического баланса их границ и матрицы. Их локализация остается рассеянной в пространстве агрегата до тех пор, пока эволюция системы не приведет к необходимости снижения ее внутренней энергии. Тогда рассеянные зерна нано- и микроскопических размеров, срастаясь друг с другом и снижая тем самым значение внутренней энергии агрегата, образуют сростки или мономинеральные субагрегаты [3, 15]. Дальнейший процесс самоорганизации может привести к образованию самостоятельных рудных тел.

Из сказанного следует, что любой процесс изменения энергетического поля, в котором оказывается минеральный агрегат, вызывает не просто отклик его внутренней энергии, но и специфические трансформации состава и строения. Это позволяет осуществлять стадиальный анализ формирования наблюдаемого *ансамбля* минеральных зерен, онтогенический анализ *минерального агрегата*.

Таким образом, наметилась некая систематика границ срастания минеральных зерен, связанная с технологическими свойствами агрегата. Исходя из логических соображений о том, что энергия разрушения не может быть больше, чем энергия образования, в рассматриваемом случае – образования границ срастания, можно определить несколько типов границ. Границы структурно равновесные и структурно неравновесные, т.е. с равной и неравной поверхностной энергией срастающихся индивидов. Границы срастания структурно неравновесные, как правило, более устойчивы при дезинтеграции, чем равновесные. Однако если граница срастания двух зерен образована с одной стороны габитусной гранью индивида, а с другой – высокосимвольной (по И.И.Шафрановскому – иррациональной), то она «раскроется» сравнительно легко, так как габитусная, атомарно плотная грань, обладая неким запасом энергетической прочности, защитит объем минерального зерна. Эта модель прочности агрегата позволяет понять, почему существуют границы равновесные и неравновесные, устойчивые и неустойчивые. Однако для прогноза раскрываемости границ срастания или прогноза раскрытия сростков при дезинтеграции рудных образований требуется дополнительное изучение в области взаимодействия поля разрушающих сил и сил сопротивления, порождаемых строением минерального агрегата.

Выводы

Онтогенический подход к оценке технологических особенностей минералов и руд (учет кроме размера зерен их формы, природы срастаний, особенностей границ и их поверхности) обеспечивает: *выбор оптимальных условий* раскрытия зерен полезного компонента; *оптимизацию технологического*

DOI *10.18454/PMI.2016.3.369*

процесса с учетом неоднородности состава и свойств минеральных индивидов (путем исследования их анатомии). Поэтому в ходе опробования месторождений, рудоподготовки и выбора оптимальных методов сепарации минерального сырья необходимо выявлять формы нахождения полезного компонента, учитывать типоморфные признаки и свойства минералов и их агрегатов, определяющие минералого-технологические особенности типов и сортов руд, прогнозируя на этой основе глубину, комплексность, экологичность их переработки, экономические показатели извлечения.

Таким образом, выявление форм нахождения полезного компонента, количественное изучение типоморфных особенностей строения минеральных индивидов и агрегатов позволит реставрировать условия рудобразования, сертифицировать качество минерального сырья и разработать технологические схемы извлечения полезного компонента. В результате открываются широкие возможности экономически рентабельной и экологически более чистой разработки месторождений полезных ископаемых, переоценки масштабов рудоносности в сторону понижения кондиций, определения рентабельного спектра попутно извлекаемых полезных компонентов. Все это создаст научно обоснованную базу увеличения масштабов балансовых запасов известных месторождений и перевода многих «рудопроявлений», «участков минерализации» в объекты лицензирования и промышленной разработки.

Для успешного продвижения в этих направлениях необходимо создание специализированных центров и подготовка специалистов, владеющих не только знаниями традиционных геологических дисциплин, но и современными аналитическими методами, достижениями микро- и наноминералогии, компьютерными технологиями, рациональными методами разработки месторождений, обогащения руд и их переработки.

Благодарность. *Работа выполнена в рамках проектной части госзадания в сфере научной деятельности № 5.2115.2014/К на 2014-2016 гг.*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеев В.И.* Структурно-химическая неоднородность природных кристаллов и микрогеохимическое направление в онтогении минералов / В.И.Алексеев, Ю.Б.Марин // Записки Российского минералогического общества. 2012. Вып.1. С.3-21.

2. *Асхабов А.М.* Кватаронный механизм образования наночастиц и ультрадисперсных материалов / Наноминералогия. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества. СПб: Наука, 2005. С.61-90.

3. *Бродская Р.Л.* Онтогенический анализ индивидов оливина в ультрамафитах / Р.Л.Бродская, И.В.Бильская, Б.А.Марковский // Записки Российского минералогического общества. 2009. Вып.5. С.18-32.

4. *Бродская Р.Л.* Проблемы моделирования внутреннего строения упорядоченных и равновесных минералого-петрографических систем / Р.Л.Бродская, Ю.Б.Марин // Записки Всероссийского минералогического общества. 2001. Вып.6. С.1-14.

5. *Бродская Р.Л.* Энергетическая характеристика внутренних границ и технологические свойства минеральных агрегатов / Р.Л.Бродская, Ю.Б.Марин //Доклады РАН. 1995. Т.344. № 5. С.654-656.

6. *Жмодик С.М.* Наночастицы благородных и редких элементов в геологических процессах // Проблемы геохимии эндогенных процессов и окружающей среды. Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2007. Т.3. С.145-148.

7. Зависимость концентрации микроэлемента от размера кристалла в пробе / В.Л.Таусон, Т.М.Пастушкова, Д.Н.Бабкин, Т.С.Краснощекова, Э.Е.Лустенберг // Геология и геофизика. 2010. Т.51. № 7. С.981-992.

8. *Конеев Р.И.* Наноминералогия и наногеохимия руд месторождений золота Узбекистана / Р.И.Конеев, Р.А.Халматов, Ю.С.Мун // Записки Российского минералогического общества. 2010. № 2. С.1-14.

9. *Котова О.Б.* Поверхностные процессы в тонкодисперсных минеральных системах. Екатеринбург: Изд-во УрОРАН, 2004. 194 с.

10. Лазерная агломерация ультрадисперсного золота из минеральных и техногенных ассоциаций высокоглинистых песков / Н.А.Леоненко, А.П.Кузьменко, М.В.Петерсон, Н.А.Кузьменко // Записки Горного института. 2007. Т.171. С.113-116.

11. *Леоненко Н.А.* Терморадиационная активация и формирование упорядоченных структур в дисперсных минеральных средах при лазерном воздействии / Н.А.Леоненко, Е.А.Ванина // Физика и химия обработки материалов. 2011. № 2. С.23-26.

12. Минералогическая интервенция в микро- и наномир / Под ред. Н.П.Юшкина. Сыктывкар: Геопринт, 2009. 548 с.

13. Наночастицы в процессах разрушения и вскрытия геоматериалов / В.А.Чантурия, К.Н.Трубецкой, С.Д.Викторов, И.Ж.Бунин; ИПКОН РАН. М., 2006. 276 с.

14. Перспективные геотехнологии / Гл. ред. акад. Н.П.Юшкин. СПб: Наука, 2010. 376 с.

15. Типоморфные особенности строения минеральных агрегатов ультрамафитов и механизм концентрации в них хромшпинелидов / Р.Л.Бродская, И.В.Бильская, Ю.В.Кобзева, В.Д.Ляхницкая // Записки Всероссийского минералогического общества. 2003. Вып.4. С.18-37.

16. *Урусов В.С.* Геохимия твердого тела / В.С.Урусов, В.Л.Таусон, В.В.Акимов. М.: ГЕОС, 1997. 500 с.

17. *Revnivtsev V.I.* Technological mineralogy as a scientific trend in applied mineralogy // Geologic-technological assessment of ore minerals, samples and deposits. Leningrad: Mekhanobr, 1990. P.4-10.

***Авторы*: Р.Л.Бродская,** *д-р геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, Rimma_Brodskaya@vsegei.ru* (*Всероссийский научно-исследовательский геологический институт* (*ВСЕГЕИ*), *Санкт-Петербург*, *Россия*), **Ю.Б.Марин,** *д-р геол.-минерал. наук, профессор, чл.-кор. РАН, marin@minsoc.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Россия*)

Статья принята к публикации 16.02.2016.

DOI *10.18454/PMI.2016.3.369*

ONTOGENIC ANALYSIS OF MINERAL INDIVIDUALS AT MICRO- AND NANOLEVEL FOR THE RESTORATION OF ORE-FORMING CONDITIONS AND ASSESSMENT OF MINERALS PROCESSING PROPERTIES

R.L.BRODSKAYA[1], **Yu.B.MARIN**[2]
[1] *Russian science-reserch geological institute «VSEGEI», Saint-Petersburg, Russia*
[2] *Saint-Petersburg Mining University, Russia*

While organizing the ore preparation system and selecting optimal methods for minerals separation, it is necessary to take into account typomorphic characteristics and properties of minerals and their aggregates that determine mineralogical and technological features of ore types and grades. Fine-dispersed ore is included into the process flow sheet; accounting particle size becomes the determining factor in ore processing technologies.

With disintegration of mineral aggregate, disclosure of intergrowths, and release of intergrowth surface, its structure is relaxed to form new bonds. Mineral individual boundary can «open an individual» for its decomposition (dissolution) or growth; it can take over the functions of grain volume conservation. Adapting the aggregate to the external environment is due to the change in orientation, length and area of boundaries of individuals and the buffer zone of their intergrowth. All structural changes in mineral aggregate proceed in accordance with the energy balance of individual boundaries and boundaries of their intergrowth; therewith, substance, crystal lattice of mineral individuals are being «refined», its defects and dislocations are being annihilated. In the process of relaxation of the structure of a mineral, another mineral can arise, which individuals can remain in a dispersed state or be capable of aggregation depending on the energy balance of their boundaries and the matrix.

Ontogenetic approach to the assessment of the features of mineral individuals and aggregates serves the purpose of restoration of ore-formation environment, provides a choice of optimum conditions of the disclosure of useful component grains, when in addition to the grain size, their shape, intergrowth nature, features of the boundaries of intergrowing minerals, heterogeneities of the composition and properties of mineral individuals are taken into account. It is resulted in the appearance of new opportunities of profitable and more environmentally friendly mining, ore potential revaluation towards lowering the grade, determination of cost-effective range of components extracted simultaneously.

Key words: mineral individuals and aggregates, micro- and nanomineralogy, ontogenic analysis, intergrowth boundaries, technological properties.

***How to cite this article*:** Brodskaya R.L., Marin Yu.B. Ontogenic analysis of mineral individuals at micro- and nanolevel for the restoration of ore-forming conditions and assessment of minerals processing properties. Zapiski Gornogo instituta. 2016. Vol.219, p. 369-376. DOI 10.18454/PMI.2016.3.369

REFERENCES

1. *Alekseev V.I., Marin Yu.B.* Strukturno-khimicheskaya neodnorodnost' prirodnykh kristallov i mikrogeokhimicheskoe napravlenie v ontogenii mineralov (*Structural and chemical heterogeneity of virgin crystals and microgeochemistry in ontogeny of minerals*). Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva. 2012. Iss.1, p.3-21.

2. *Askhabov A.M.* Kvataronnyi mekhanizm obrazovaniya nanochastits i ul'tradispersnykh materialov (*Quataron mechanism of the formation of nanoparticles and ultrafine materials*). Nanomineralogiya. Ul'tra- i mikrodispersnoe sostoyanie mineral'nogo veshchestva. St. Petersburg: Nauka, 2005, p.61-90.

3. *Brodskaya R.L., Bil'skaya I.V., Markovskii B.A.* Ontogenicheskii analiz individov olivina v ul'tramafitakh (*Ontogenic analysis of olivine individuals in ultramafite*). Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva. 2009. Iss.5, p.18-32.

4. *Brodskaya R.L., Marin Yu.B.* Problemy modelirovaniya vnutrennego stroeniya uporyadochennykh i ravnovesnykh mineralogo-petrograficheskikh sistem (*Problems of modeling the internal structure of ordered and equilibrium mineralogical and petrographic systems*). Zapiski Vserossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva. 2001. Iss.6, p.1-14.

5. *Brodskaya R.L., Marin Yu.B.* Energeticheskaya kharakteristika vnutrennikh granits i tekhnologicheskie svoistva mineral'nykh agregatov (*Energy characteristics of internal borders and technological properties of mineral aggregates*). Doklady RAN. 1995. Vol.344. N 5, p.654-656.

6. *Zhmodik S.M.* Nanochastitsy blagorodnykh i redkikh elementov v geologicheskikh protsessakh (*Nanoparticles of precious and rare elements in geological processes*). Problemy geokhimii endogennykh protsessov i okruzhayushchei sredy. Irkutsk: Izd-vo In-ta geografii SO RAN, 2007. Vol.3, p.145-148.

7. *Tauson V.L., Pastushkova T.M., Babkin D.N., Krasnoshchekova T.S., Lustenberg E.E.* Zavisimost' kontsentratsii mikroelementa ot razmera kristalla v probe (*Dependence of trace element concentrations on the crystal size in the sample*). Geologiya i geofizika. 2010. Vol.51. N 7, p.981-992.

8. *Koneev R.I., Khalmatov R.A., Mun Yu.S.* Nanomineralogiya i nanogeokhimiya rud mestorozhdenii zolota Uzbekistana (*Nanomineralogy and nanogeochemistry of gold deposits in Uzbekistan*). Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva. 2010. N 2, p.1-14.

9. *Kotova O.B.* Poverkhnostnye protsessy v tonkodispersnykh mineral'nykh sistemakh (*Surface processes in fine-grained mineral systems*). Ekaterinburg: Izd-vo UrORAN. 2004, p.194.

10. *Leonenko N.A., Kuz'menko A.P., Peterson M.V., Kuz'menko N.A.* Lazernaya aglomeratsiya ul'tradispersnogo zolota iz mineral'nykh i tekhnogennykh assotsiatsii vysokoglinistykh peskov (*Laser agglomeration of ultrafine gold from mineral and technogenic associations of high-argillaceous sand*). Zapiski Gornogo instituta. 2007. Vol.171, p.113-116.

11. *Leonenko N.A., Vanina E.A.* Termoradiatsionnaya aktivatsiya i formirovanie uporyadochennykh struktur v dispersnykh mineral'nykh sredakh pri lazernom vozdeistvii (*Thermoradiation activation and the formation of ordered structures in disperse mineral media under laser action*). Fizika i khimiya obrabotki materialov. 2011. N 2, p.23-26.

DOI *10.18454/PMI.2016.3.369*

12. Mineralogicheskaya interventsiya v mikro- i nanomir (*Mineralogical intervention in micro- and nanoworld*). Pod red. N.P.Yushkina. Syktyvkar: Geoprint, 2009, p.548.

13. *Chanturiya V.A.*, *Trubetskoi K.N.*, *Viktorov S.D.*, *Bunin I.Zh.* Nanochastitsy v protsessakh razrusheniya i vskrytiya geomaterialov (*Nanoparticles in the processes of destruction and dissection of geological material*); IPKON RAN. Moscow, 2006, p.276.

14. Perspektivnye geotekhnologii (*Advanced geotechnologies*). Gl. red. akad. N.P.Yushkin. St. Petersburg: Nauka, 2010, p.376.

15. *Brodskaya R.L.*, *Bil'skaya I.V.*, *Kobzeva Yu.V.*, *Lyakhnitskaya V.D.* Tipomorfnye osobennosti stroeniya mineral'nykh agregatov ul'tramafitov i mekhanizm kontsentratsii v nikh khromshpinelidov (*Typomorphic structural features of ultramafite mineral aggregates and mechanism of chrome spinellide concentration in them*). Zapiski Vserossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva. 2003. Iss.4, p.18-37.

16. *Urusov V.S.*, *Tauson V.L.*, *Akimov V.V.* Geokhimiya tverdogo tela (*Solid state geochemistry*). Moscow: GEOS, 1997, p.500.

17. *Revnivtsev V.I.* Technological mineralogy as a scientific trend in applied mineralogy. Geologic-technological assessment of ore minerals, samples and deposits. Leningrad; Mekhanobr. 1990, p.4-10.

***Authors*: R.L.Brodskaya**, *Dr. of Geological & Mineral Sciences*, *Leading Researcher*, *Rimma_Brodskaya@vsegei.ru* (*Russian science-reserch geological institute* «*VSEGEI*», *Saint-Petersburg*, *Russia*), **Yu.B.Marin**, *Dr. of Geological & Mineral Sciences*, *Professor*, *Associate Member of the Russian Academy of Sciences*, *marin@minsoc.ru* (*Saint-Petersburg Mining University*, *Russia*)

Manuscript Accepted 16.02.2016.