
О МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ИСПОЛЬЗОВАНИИ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ ПЕТРО- И РУДОГЕНЕЗА

© 2020 г. п. чл. Ю. Б. Марин*

Санкт-Петербургский горный университет, 21 линия, 2, Санкт-Петербург, 109106 Россия

**e-mail: yubmarin@yandex.ru*

Поступила в редакцию 21.05.2020 г.

После доработки 25.05.2020 г.

Принята к публикации 17.06.2020 г.

Глубокое проникновение кристаллохимии и физики минералов в минералогию, а также внедрение современных физических методов перевели минералогические исследования на качественно новый уровень. Обеспечив прогресс в познании конституции и свойств минералов, они несколько увели минералогию от решения ее фундаментальных задач — выведения минералогических закономерностей. С помощью новых методов сделано множество эффектных генетических расшифровок, но из-за незнания законов анатомии и онтогении минералов допущено и немало ошибок. Недостаточное внимание к исследованию зональности, секториальности, микро- и нановключений, межзеренных границ индивидов минерала исключает получение важной информации, отражающей его развитие, изменение, взаимоотношения с другими минералами, и ставит под сомнение достоверность сделанных выводов. Возникает необходимость вернуться к обсуждению правил получения и использования минералогенетической информации, места и последовательности минералогических исследований при решении проблем петро- и рудогенеза. Процессы петро- и рудогенеза реализуются в широких термодинамических и пространственно-временных границах, что приводит к появлению генераций минералов, стадийности, этапности, отражающихся в особенностях состава и строения минеральных индивидов и агрегатов. Рациональное исследование минералов при решении генетических проблем можно представить в виде многоступенчатого процесса установления последовательности образования минералов, выявления их индикаторных параметров, геохронологического датирования, реконструкции условий петро- и рудогенеза. Определяя круг минералов-индикаторов, важно учитывать их место в геологической эволюции исследуемого объекта. Важнейшее требование к отбору проб для исследования минералов-индикаторов и геохронометров — соответствие их свойств конкретным параметрам изучаемого объекта или процесса. Это обязательное условие надежной интерпретации генетической информации, получаемой в ходе минералогических исследований. Эффективное использование индикаторных свойств минеральных индивидов и агрегатов для решения генетических задач возможно лишь при условии системного подхода к исследованию объектов, точной пространственно-временной привязки определяемых параметров, надежность которой обеспечивается онтогенетическим анализом с детальным изучением строения индивидов и агрегатов. Только опираясь на знание минерагенетических законов, методов онтогении и обоснованной последовательности их применения при исследовании минералов, появляется возможность эффективного использования полученных результатов при корреляции горных пород, определении генетического и формационного типа оруденения, индикаторов его масштабности, стадийности и т.д.

Ключевые слова: минералогические исследования, минеральные индивиды и агрегаты, анатомия и онтогения минералов, минералогические законы и закономерности, минералы-индикаторы и геохронометры, типоморфизм, петро- и рудогенез

DOI: 10.31857/S0869605520040048

ВВЕДЕНИЕ

Минералогия — основа нашего знания о веществе Земли, а минералы являются элементарной частью горных пород и руд, определяя их химические и физические свойства. На базе исследования минералов создаются геотермометры, геобарометры, геоспидометры и геохронометры для анализа проблем петро- и рудогенеза. “Минералы — архивариусы истории горных пород, к ним мы должны обращаться за генетическими сведениями” (Tuttle, 1955, с. 306). Именно минералогия, систематически уточняя сведения о распространенности минеральных видов, особенностях их конституции и слагаемых ими минеральных агрегатов и выявляя геологические и физико-химические закономерности, обуславливающие эту распространенность, может прогнозировать новые виды минерального сырья, пути получения новых материалов и новых процессов их создания, не применяемых современными технологиями.

Глубокое проникновение кристаллохимии и физики минералов в минералогия, а также внедрение современных физических методов перевели минералогические исследования на качественно новый уровень. Обеспечив значительный прогресс в познании конституции и свойств минералов, они вместе с тем несколько увели минералогия от решения своих фундаментальных задач, т.е. выведения минералогических закономерностей. С помощью новых, в основном физических, методов сделано множество эффектных генетических расшифровок, но из-за незнания законов анатомии и онтогении минералов допущено и немало ошибок и упрочилось представление о минералогии как прикладной дисциплине, базирующейся к тому же на методах других наук. Сейчас особенно остро стоит проблема корректной интерпретации получаемых прецизионных аналитических данных, поскольку недостаточное внимание к исследованию зональности, секториальности, микро- и нановключений, неотъемлемых особенностей природного минерала, границ его индивидов, исключает получение принципиально важной информации, отражающей его развитие, изменение, взаимоотношения с другими минералами, и ставит под сомнение достоверность сделанных выводов.

Нередки случаи неоправданной подмены минералогических исследований формальным сбором образцов с последующим определением современными методами их химических и физических свойств — в предположении, иногда агрессивно и свысока защищаемом, что именно этот путь ведет к получению наиболее надежной информации о петро- и рудогенезе. Усиливается впечатление, что многие исследователи не только не знают знаменитое выражение Ф.Дж. Петтидждона “Нет ничего более отрезвляющего, чем обнажение”, но и не видели (тем более не изучали) обнажений тех объектов, о происхождении которых пишут, и не считают заслуживающим внимания остроумный афоризм известного канадского геолога и геохимика Д.М. Шоу “Образец берется не столько с помощью молотка, сколько с помощью ума” (Шоу, 1969, с. 19).

А между тем, еще В.С. Соболев писал в своей знаменитой книге “Введение в минералогия силикатов” (1949, с. 222): “Изучение свойств минералов должно производиться не разобщенно и не как самоцель, а во взаимосвязи со всей историей минералов и всегда с учетом конечной задачи расшифровки всей истории данного минерального комплекса как геологического объекта”. Необходимость “геологизации” минералогии подчеркивал Н.П. Юшкин (1999), на пороге нового тысячелетия писавший “Если в предыдущем тысячелетии произошло становление минералогии как фундаментальной науки, ее дифференциация, то в третьем тысячелетии произойдет

синтез минералогического знания, геологизация минералогии...” и неоднократно повторявшийся это позже на совещаниях 2000–2008 гг.

В последние годы в отечественных и зарубежных журналах резко возросло количество статей, решающих проблемы петро- и рудогенеза на основе прецизионного исследования отдельных минералов с использованием самых современных методов и аппаратуры. Многие из них насыщены огромным аналитическим материалом, и, вместе с тем, лишены внятной геологической и минералого-петрографической характеристики изучаемого объекта и пространственно-временной привязки определяемых параметров на всех уровнях исследования этих минералов.

Именно поэтому возникает необходимость **напомнить**, что образование минерала — одно из событий истории геологического объекта, а отдельные фрагменты этой истории, записанные, по выражению Д.П. Григорьева (1998), на “крепком фундаменте окаменевших реакций”, могут быть реконструированы путем онтогенетического анализа минеральных индивидов и агрегатов (Жабин, 1979; Павлишин и др., 1988; Краснова, Петров, 1999; Попов, 2011), и снова вернуться к обсуждению правил получения и использования минералогенетической информации (Гинзбург и др., 1981; Марин, 1981, 1988; Юшкин, 1982), места и последовательности минералогических исследований при решении проблем петро- и рудогенеза. Необходима своеобразная реставрация геологического начала и обязательное использование онтогенетического подхода (а не только обширного арсенала современных методов) при проведении минералогических исследований.

О МЕТОДОЛОГИЧЕСКОМ ПРИНЦИПЕ СОВРЕМЕННОЙ МИНЕРАЛОГИИ

Важный методологический принцип современной минералогии, заложенный работами Д.П. Григорьева, А.Г. Жабина, В.И. Павлишина, В.А. Попова, Б.В. Чеснокова, Н.П. Юшкина, заключается в понимании минерала как совокупности конкретных индивидов, каждый из которых представляет собой своего рода организм, являющийся элементом сложных геологических систем. Особенностью возникновения природного минерала является формирование в многокомпонентной геохимической обстановке, меняющейся в ходе длительного существования минералообразующей среды под воздействием множества факторов. Именно поэтому характерной чертой минерала является структурно-химическая неоднородность, формирующаяся на протяжении всей истории его существования. Образование любого элемента кристалла является результатом одного из событий этой истории (Григорьев, 1961; Григорьев, Жабин, 1975; Юшкин, 1977, 1982, 1985; Попов, 2011). Именно поэтому история индивида отражается в последовательности формирования и характере взаимоотношения неоднородностей минерала, а минеральные индивиды и образуемые ими агрегаты являются источниками генетической информации — “Минералы являются единственными свидетелями и летописцами своей истории” (Юшкин, 1977, с. 4). Современные возможности позволяют перейти к абсолютной хронологии онтогенеза путем локального исследования радиогенных изотопов в различных частях кристаллов (Попова, 1995; Donald et al., 2003; Попов, 2007; Каулина, 2010; и др.).

Любой природный минеральный индивид обладает чертами структурно-химической неоднородности, проявленной в индивидуальном распределении и взаимоотношении структурированных изоморфных и неизоморфных химических примесей, фазовых, флюидных и расплавных включений и отражающей многокомпонентный состав и термодинамические условия материнской геологической системы на всех стадиях ее эволюции (Алексеев, Марин, 2012).

Все индивиды природного минерала состоят из матрицы минерала-хозяина и заключенных в ней микровключений минералообразующей среды и минеральных фаз, имеющих прото-, син- и эпигенетическую природу (Ермаков, 1972; Григорьев, Жа-

бин, 1979; Петровская, 1980; Сидоренко, Ляхович, 1983; Реддер, 1987; Краснова, Петров, 1997; Попов, 2007, 2011; Logvinova et al., 2008; Юшкин, Асхабов, 2007; Logvinova et al., 2008; Cook et al., 2009; Malaspina et al., 2009; Каулина, 2010; Алексеев, Марин, 2018 и многие другие). Микроминералы находятся в закономерных связях с изоморфными примесями, входящими в состав матрицы, образуя в ней своего рода микропарагенезисы (Ляхович, 1967; Юшкин, 1977; Сидоренко, Ляхович, 1983; Типоморфизм, 1989; Алексеев, Марин, 2012, 2014). К еще большему увеличению неоднородности индивида ведет формирование в области его кристаллизации наноиндивидов (Юшкин, Асхабов, 2007) и наноразмерных структурных кластеров (Урусов и др., 1997; Таусон, 1999).

Матрица индивида обладает собственной неоднородностью — зональностью, секториальностью, дефектами структуры, наноразмерными структурными кластерами (Григорьев, 1971; Попова, 1995; Краснова, Петров, 1997; Zirgon, 2003; Попов, 2007, 2011; Götte, 2009; Алексеев, Марин, 2012). Последующие явления жизни кристалла — растворение, регенерация, метасоматоз, деформация, распад твердого раствора — приводят к усложнению его строения (Павлишин и др., 1988; Краснова, Петров, 1997; Попов, 2011; Алексеев, Марин, 2012, 2018; Бродская, Марин, 2016).

Вещественная неоднородность индивида иерархична: зональность-секториальность матрицы обычно является элементом макростроения (>100 мкм); включения, структурные блоки в основном принадлежат к микромиру (0.1–100 мкм), а точечные структурно-химические дефекты и предельно малые индивиды — объекты наноминералогии (0.001–0.1 мкм). При специализированных детальном исследованиях методически правильна такая последовательность их онтогенетического анализа: агрегат — индивид — микрон неоднородность индивида — нанон неоднородность индивида.

Химическая неоднородность выступает как самостоятельный двигатель развития кристалла, приводя к саморазвитию дефектов в виде кластеризации, гетерометрии, автодеформации и других явлений (Краснова, Петров, 1997; Пунин, Штукенберг, 2008). Появление неизоморфной микропримеси в кристаллической решетке не всегда ведет к образованию минеральной фазы-включения. Захваченные и диффундирующие примесные атомы образуют “облака” вокруг дефектов кристаллической матрицы — атмосферы Коттрелла и Сузуки, зоны Гинье—Престона и т.п. В случае эндокриптии предел вхождения микроэлемента в минерал не является при заданных *РТ*-параметрах постоянной величиной, а зависит от условий образования конкретного кристалла и характера возникающих в нем дефектов, что обуславливает отклонение поведения микроэлементов от закона Генри с резким повышением их коэффициентов распределения (Таусон, 1999). Это означает возможность изменения состава минерала в процессе его роста вследствие изменения характера дефектов и концентрации примесей, появление возможности аномального концентрирования микропримесей вплоть до формирования дисперсной промышленной рудной минерализации (“эффект улавливания” — Урусов и др., 1997).

Для выявления структурно-химической неоднородности минеральных индивидов и установления возрастных соотношений между ними и матрицей необходимо учитывать законы и принципы топологической структуры времени в минеральном объекте (Павлишин и др., 1988): послойного наращивания минерального вещества, принцип нарушенного целого, принцип трансформации. Активно используются при изучении структурно-химических неоднородностей кристаллохимические законы и правила (Урусов, 1987; Урусов и др., 1997): закон Гаюи, основной закон кристаллохимии Гольдшмидта, закон симметрии Федорова—Грота, правило ионных радиусов Магнуса—Гольдшмидта, правила строения ионных кристаллов Полинга, закон диагоналей Гольдшмидта—Ферсмана и др.

Локальные методы (электронная микроскопия высокого разрешения, электронно-, протонно- и ионнозондовый рентгеноспектральный микроанализ, масс-спектромет-

рия с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией, оптическая, люминесцентная, электронная и ядерная магнитная, мёссбауэровская спектроскопия и др.) позволяют проводить исследования отдельных зерен и их частей, в ряде случаев *in situ*. Последнее особенно важно, учитывая генетическую информацию, которую несут границы, краевые зоны кристаллов и характер их взаимоотношений с другими индивидами. На каждой стадии процесса минералообразования возникает соответствующий ей “отклик” в системе кристаллизации – минеральная генерация. Генерации индивидов при их агрегации не могут быть равновесны друг с другом. Их границы аккумулировали разные количества энергии, поскольку зарождались и росли на разных этапах развития процесса.

Граница минерального индивида может “открыть индивид” для его разрушения (растворения) или роста, может взять на себя функции сохранения объема зерна в зависимости от условий формирования. При достаточном “энергетическом толчке” извне происходит не только миграция границ, но и аннигиляция дефектов, поток энергии из кристалла к его границам. При этом из решетки высвобождаются атомы элементов-примесей, изоморфных элементов. Одновременно с аннигиляцией дефектов и потоком энергии к границам зерен перемещаются ионы элементов, находящихся в дислокациях решетки. В процессе релаксации структуры одного минерала может зародиться другой, индивиды которого могут остаться в рассеянном состоянии или обнаружить способность к агрегации. Таким образом, минеральный агрегат, формируясь в меняющихся во времени условиях и приспосабливаясь к кинетике процесса на макроуровне своими внутренними границами, оставляет память об этом процессе в своем строении (Бродская, Марин, 2016).

О МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ, ВЫЯВЛЕНИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИИ МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ИНДИКАТОРОВ ПЕТРО- И РУДОГЕНЕЗА

Процессы петро- и рудогенеза реализуются в широких термодинамических и пространственно-временных границах, что выражается в появлении генераций минералов, стадийности, этапности и др., отражающихся в особенностях состава и строения минеральных индивидов и агрегатов. Рациональное исследование минералов при решении генетических проблем можно представить в виде многоступенчатого процесса установления последовательности образования минералов, выявления их индикаторных параметров, геохронологического датирования, реконструкции условий петро- и рудогенеза.

Определяя круг изучаемых минералов-индикаторов, следует уточнять их место в геологической эволюции исследуемого объекта. Важнейшее требование к отбору проб для исследования минералов-индикаторов и геохронометров – соответствие их свойств конкретным параметрам изучаемого геологического объекта или процесса, для чего необходимо выяснение геодинамической позиции объекта, минерало-петрографическое изучение пород, выяснение геологической истории объекта и привязка минеральных парагенезисов к конкретным этапам и стадиям его эволюции. Это обязательное условие надежной интерпретации генетической информации, получаемой в ходе специализированных минералогических исследований.

Проведение минералогических исследований с анализом полученных данных необходимо как на уровне минеральных индивидов, так и минеральных видов. Это два разных, взаимодополняющих пути получения информации, в том числе и генетической, причем разного рода, что неоднократно подчеркивал Д.П. Григорьев (1998): в первом случае – онтогенической о способе образования, генезисе минералов, во втором – об их происхождении (геологических процессах формирования) и особенностях филогенеза. Так, утверждения о конвергенции и конвергентных минералах (Гинзбург и др.,

1981) возникают лишь при исследовании на уровне минеральных видов, тогда как переход на онтогенетический уровень изучения индивидов по мере его детализации всегда позволяет отвергнуть представления о конвергенции. Противопоставление двух путей и следование лишь по одному из них ущербно при создании общей картины минералообразования. Неконструктивность такого подхода проявилась в ходе дискуссий по расшифровке понятия “генетическая минералогия” (Жабин, 1978, 1989; Барабанов, 1979; Гинзбург, 1983).

Традиционно в минералогии выявление индикаторов петро- и рудогенеза идет от эмпирики, но развивается и метод теоретического прогнозирования с анализом процессов минералообразования и того, как они могут быть отражены на породном и минеральном уровнях и с помощью каких методов выявлены, т.е. теоретический выход на индикаторы петро- и рудогенеза. Возможность реализации такого подхода базируется на существовании ряда законов, правил и зависимостей (Григорьев, 1961; Шоу, 1969; Перчук, Рябчиков, 1976; Юшкин, 1977; Урусов, 1987; Марин, 1988; Урусов и др., 1997; Кривовичев, 2003; Никитина, Кривовичев, 2003; Shaw, 2006; Иванов, 2015). Кратко напомним некоторые из них.

Закон минералогического резонанса, в соответствии с которым любое изменение среды минералообразования вызывает изменения в конституции (нередко и в морфологии) минерала и любое изменение минерала отражается изменением минералообразующей среды. Взаимодействия минерала и минералообразующей среды многообразны: энергетические; вещественные, обеспечивающие поступление вещества из среды в индивид и его рост или, наоборот, удаление вещества в среду и разрушение индивида; информационные, с передачей особенностей структурной организации вещества от среды к минералу и обратно. На границе минерального индивида и минералообразующей среды в результате их взаимодействия возникает особая структурная область, где и развиваются все формы взаимодействия минерала и среды (“дворик кристаллизации”). Даже в случае только энергетического обмена, развивающиеся в минерале процессы вызывают в нем трансформационные превращения (полиморфные переходы, метамиктный распад, распад твердых растворов и др.), протекающие с увеличением или уменьшением объема и соответствующим воздействием на среду. В ходе изменений минералообразующей среды минерал стремится приспособить свои параметры к параметрам среды, что сохраняет его устойчивость в определенном интервале изменений параметров среды, в его своего рода “экологической нише”.

Закон обязательного наличия генетической информации в минерале, утверждающий, что у любого минерала можно найти признаки его бывшей связи с минералообразующей средой (включения вещества среды, негативные формы, оставшиеся от растворившихся минералов-соседей и др.). Поскольку конституционные особенности и свойства минералов определяются генезисом, они являются носителями генетической информации, полнота извлечения которой определяется уровнем исследований.

Закон инерционности или существования минералогической памяти, утверждающий, что в любом минерале заложена потенциальная возможность противодействовать разрушающему влиянию внешних воздействий и инерционно сохранять какую-то генетическую информацию. Именно она, сохраняющаяся в процессе изменения минерала, и рассматривается как минералогическая память. Можно говорить о разных формах ее проявления — изотопной, структурной, магнитной, морфологической и т.д. Накоплены многочисленные примеры выявления различных видов минералогической памяти, наиболее яркие из которых получены при исследовании псевдоморфоз.

Законы изоморфизма, действующие в строго определенных термодинамических условиях и определяющие широкое развитие в минералах структур распада и явлений микронеоднородности, используемых в качестве показателей условий образования минералов. Знание закономерностей изменения состава в изоморфных сериях мине-

ралов позволяет по составу определять их место в ходе развития процессов минералообразования.

Закон фазового соответствия минеральных парагенезисов, являющийся основой создания многочисленных геотермометров и геобарометров.

Коэффициенты распределения элементов-примесей между кристаллами и расплавом, флюидом или раствором, способствующие выявлению условий формирования магматических и метасоматических пород, оценке их потенциальной рудоносности.

Закономерности изменения упорядоченности кристаллических структур минералов в зависимости от термодинамических параметров, способствующие уточнению условий образования минералов.

Кристаллографические закономерности, связывающие преимущественное развитие габитусных форм с условиями образования минералов и т.д.

Для восстановления условий образования и истории развития минералов на различных уровнях организации — от минерального индивида до минеральных и породных видов, выявляют индикаторные параметры минералов, отражающие условия их возникновения и тенденции эволюции с последующей интерпретацией полученных минералогенетических данных. Целью интерпретации данных о составе и строении минералов из различных пород является генетическая реконструкция изучаемых объектов с восстановлением полной последовательности определяющих их историю событий. Процесс реконструкции состоит из восстановления условий зарождения и развития индивидов минералов и восстановления минералогенеза каждого минерала как минерального вида. Экстраполяция полученных при изучении минерала данных на “материнский” объект (заключение о генезисе породы, месторождения и т.п.) должна производиться с соблюдением принципа соответствия уровней изученного объекта и того, на который распространяются полученные результаты, требуя ясного представления о месте минерала в истории формирования “материнского” объекта и высокой научной квалификации.

На первом этапе основным методом является онтогенический анализ на основе изучения морфологии и внутреннего строения индивидов и возрастных взаимоотношений между ними (Павлишин и др., 1988). Осуществляются синхронизация и возрастная корреляция пространственно разбросанных индивидов минералов или элементов их анатомии, выделяются зарождения и генерации минерала, создаются эволюционные минералогенетические ряды.

Ключевой является задача синхронизации пространственно разбросанных минералогенетических явлений. Ее решение сводится к поискам таких событий, которые отражались бы одинаковыми изменениями в конституции различных минералов, к поискам синхронных реперов. Наиболее часто при этом используются диаграммы последовательности кристаллизации минералов, построенные с учетом условий их существования. Надежность хронологических корреляций по полям существования минералов значительно повышается, если учитывать типоморфные особенности, позволяющие синхронизировать минералы одной и той же генерации. Синхронные реперы можно найти в составе индивидов, зональности, распределении включений и в других особенностях строения. Реальность такой синхронизации минералогенетических событий подтверждена на практике (Юшкин, 1982; Попов, 2011), требуя комплексного подхода с использованием широкой совокупности критериев. Количественную же оценку одновременности (синхронности) с определением времени совершения двух или более событий дают только радиологические методы, особенно позволяющие определять содержания радиогенных изотопов в различных частях кристаллов, создавая тем самым возможность реконструкции истории индивидов (Попова, 1995; Попов, 2011). Поскольку природные геологические объекты часто являются полихронными, испытывавшими воздействие разновременных наложенных процессов, необходима расшифровка последовательности процессов эволюции минерала с выде-

лением генераций. Возраст минерала и содержащей его породы могут не совпадать, поэтому необходимо обоснование их сингенетичности.

Хронометрию осуществляют исследованием изотопных соотношений: U-Pb в цирконе, монаците, уранините, титаните магматитов и метаморфитов, U-Pb, Sm-Nd, Lu-Hf – в гранатах метаморфитов, Re-Os в молибдените, Pb-Pb в галените, U-Th-He в золоте гидротермалитов и др. (Оптимальный выбор..., 2007). Наиболее часто для целей геохронологии используются акцессорные циркон, уранинит, монацит, бадделейт, реже (менее пригодны) алланит, тантало-ниобаты, апатит, минералы группы перовскита. Достоверность и точность получаемых датировок определяется, прежде всего, замкнутостью системы, содержащей радиоактивные и радиогенные изотопы, в ходе истории исследуемого объекта. Поэтому при интерпретации геохронологических данных необходима оценка степени замкнутости системы минерала-геохронометра и разработка способов учета и компенсации нарушения этого условия.

Подчеркнем объективные трудности геохронологического анализа. Одна из них в расхождении продолжительности роста минералов-геохронометров (десять тысяч – миллионы лет) и длительности тектоно-магматических и метаморфических этапов (десять – сотни миллионов лет), в ходе которых возникают содержащие эти минералы породы, другая – в нарушении исследуемых изотопных систем вследствие метаморфических и гидротермальных преобразований минералов. Так, полученные во многих регионах в ходе государственной геологической съемки результаты датирования свидетельствуют, что попытки корреляции магматитов и метаморфитов, решения спорных вопросов с помощью изотопных методов приводят к получению различных датировок для одних и тех же объектов, несоответствию полученных датировок геологическим данным и др. Выявились наиболее обычные причины возникновения аналитических артефактов U-Pb возраста, среди которых наличие в области зондирования минералов-геохронометров: зон с включениями урановых фаз; метамиктных зон; зон с трещинами, способствующими выносу радиогенного Pb; мелких зерен, требующих уменьшения сечения ионного пучка со снижением точности оценки содержания изотопов; краевых зон с аномальными геохимическими характеристиками.

При выработке минералогических критериев целесообразно различать критерии, основанные на непосредственно наблюдаемых признаках (статический тип систем) и выводимые из них и относящиеся к реконструируемым (ретроспективный тип систем). Это важно, в частности, потому, что часто не разграничиваются особенности конституции минералов, возникшие в период кристаллизации, и обусловленные более поздними процессами. Это не обеспечивает полноценного использования их индикаторной роли в познании генезиса, что, например, было показано в серии публикаций по исследованию метаморфизма минералов (Руденко и др., 1978; Руденко, 1981).

Статический тип систем имеет вещественный и пространственный аспекты исследования, ретроспективный – временной, физико-химический, эволюционный. Элементы статической системы – индивиды и агрегаты, элементы ретроспективной – процессы минералообразования и преобразования. Нередки утверждения, что построения ретроспективных систем излишни при решении прогнозно-поисково-оценочных задач. С этим трудно согласиться и можно повторить вслед за Ю.А. Косыгиным, что гипотезы, основанные на ретроспективных реконструкциях, эффективны и при построении прогнозных моделей и решении практических задач. При теоретическом подходе с использованием моделирования возможен выход сразу на причинные связи, отбор из множества случайных действительно типоморфных признаков и прогнозирование новых. С этих же позиций перспективно выявление консервативных и мобильных минералов и особенностей их конституции и свойств с созданием системы взаимосогласованных поисково-оценочных признаков, основанных на взаимосвязанных типоморфных свойствах парагенных минералов.

Любой минерал содержит генетическую информацию только о тех событиях, которые оказывали влияние на его формирование. Важным вопросом интерпретации результатов исследования минералов является вопрос о снятии “шума” — разделении информации и дезинформации. Возможность такого разделения определяется объективными и субъективными факторами. Среди объективных факторов — многообразие минеральных индикаторов изучаемого явления; автономность индикаторов, допускающая стирание первичной информации на одних уровнях и сохранение на других; действие закона инерции, обуславливающего запаздывание в стирании первичной информации, по сравнению с действием разрушающих процессов. Распространенным способом расшифровки генетической информации в присутствии “шума” является получение избыточной информации путем: многократного повторения исследования одного и того же качества на большом количестве индивидов; исследования многих качеств индивида при определении его генезиса, исследования различных индивидов при выяснении генезиса минерального вида; исследования на разных иерархических уровнях (часть индивида—индивид—агрегат).

На первых этапах исследований необходимо в зависимости от поставленной задачи определить *виды индикаторных параметров* (анатомия индивидов; взаимоотношения с другими минералами; морфология границ; параметры решетки; микро- и нановключения; концентрации конституционных, изоморфных и примесных элементов, изотопов) и *опорный уровень информации о минерале* (наноуровень — микроуровень включений в индивидах, частей индивидов, индивидов — макроуровень агрегатов).

Хотя в принципе любое свойство минерала содержит информацию о любом параметре минералогенетической среды, возможности расшифровки минералогенетической информации с использованием конкретных индикаторных параметров существенно различаются. По точности оценки индикаторы можно разделить на качественные, дающие общее представление о генетической природе минерала, и количественные, дающие достаточно точную оценку минералогенетических процессов. Среди *качественных* индикаторов: морфология индивидов; морфология границ индивида; взаимоотношения с другими минералами; анатомия индивидов; особенности структуры (дефекты, политипия и т.п.); наличие микро- и нановключений; их парагенетическая ассоциация; среди *количественных*: размер индивидов и элементов их строения; размеры микро- и нановключений; параметры решетки; концентрации конституционных, изоморфных и примесных элементов, изотопов; спектральные характеристики. Для оценки индикаторных параметров вводят показатели: *норма, чувствительность и емкость реакции* (Юшкин, 1977). Высокую точность интерпретации обеспечивают параметры с высокой чувствительностью реакции. При широких колебаниях условий минералогенеза интересны параметры с большой емкостью реакции, среди них качественные индикаторы (морфология, парагенезисы и др.) и физические параметры (спектральные характеристики). В составе измеряемого параметра из-за недостатков применяемой техники, аналитической методики и операций расчета индикатора возможно появление “паразитной” информации.

Способность минеральных индивидов отражать в особенностях своего состава, морфологии, структуре, кристаллохимии, физических свойств, микровключений, продуктов изменения различные геологические и физико-химические условия, в которых протекали процессы минералообразования и последующего преобразования минералов, получила название **типоморфизма минералов**. Созданное А.Е. Ферсманом учение о типоморфизме было развито отечественными учеными во второй половине прошлого века и стало одним из ведущих направлений развития минералогии (Гинзбург и др., 1981; Руденко, 1981, 1989; Юшкин, 1982, 1985; Юргенсон, 1984; Типоморфизм, 1989; Эшкин, 1989; Марин и др., 1990; Гавриленко, Панова, 2001; и др.). Типоморфический анализ позволяет получить обобщенное представление о генезисе геологического объекта путем сопоставления его параметров с характеристиками

эталонных объектов. Этот анализ требует изучения широкого комплекса признаков на большом количестве индивидов и привлечения методов математической статистики для сопоставления и типизации генетически родственных совокупностей минералов. Следует заметить, что при использовании представлений о типоморфизме минералов нередко не учитывают законы анатомии кристаллов, в соответствии с которыми при росте минерала происходит разделение элементов и их изотопов гранями разных простых форм, вплоть до появления разных минеральных видов в одном индивиде (Попова, 1995, Попов, 2011). Естественно, что возникновение различающихся по составу (и свойствам) зон и пирамид роста необходимо учитывать при анализе минералообразования, имея в виду и геотермобарометрию, и оценку радиологического возраста минералов.

На основе изучения типоморфизма минералов решается широкий круг вопросов генетической, поисковой и технологической минералогии: определение *PT*-параметров и химизма процессов минералообразования, оценка кислотности–щелочности и окислительно-восстановительных условий минералообразующей среды, установление стадийности минералообразования, расчленение, корреляция и оценка потенциальной рудоносности магматических, осадочных и метаморфических комплексов, определение генетического и формационного типа оруденения, оценка уровня эрозийного среза рудных тел и масштабности оруденения, прогноз технологических свойств и поведения минералов в процессах технологической переработки руд и концентратов и т.д. Анализ огромного фактического материала позволил наметить ряд предпосылок для практического использования типоморфизма минералов в геологической и поисково-оценочной практике (Гинзбург и др., 1981; Марин, 1981, 1988; Руденко, 1981; Юшкин, 1982; Типоморфизм, 1989; Эшкин, 1989; и др.):

1. Минерал, образующийся и существующий в близких условиях, независимо от своего места нахождения, будет иметь сходные особенности морфологии, конституции и свойств (основание минералогической корреляции горных пород при геолсъемке).

2. Одни и те же минералы из месторождений разных типов имеют определенные различия морфологии, конституции и свойств (индикаторы генетического и формационного типа месторождений).

3. Генерации минерала, возникшие на разных стадиях формирования месторождения, закономерно различаются между собой (индикаторы стадийности оруденения, по которым выделяются продуктивные и безрудные стадии).

4. В пределах образований одной стадии одни и те же минералы закономерно изменяют свои характеристики по латерали и вертикали (индикаторы зональности).

5. Одни и те же минералы из рудных и безрудных зон проявляют определенные различия (показатели рудоносности).

6. Существуют признаки, позволяющие различать однотипные минералы из рудопроявлений и крупных и суперкрупных месторождений (индикаторы масштабности оруденения).

7. Пороодообразующие и жильные минералы, сопутствующие оруденению, приобретают характерные черты внешнего облика, состава и структуры (индикаторы оруденения).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективное использование индикаторных свойств минеральных индивидов и агрегатов для решения комплекса генетических задач возможно лишь при условии системного подхода к исследованию геологических объектов, точной пространственно-временной привязки определяемых параметров на всех уровнях исследований, надежность которой обеспечивается на основе онтогенетического анализа с детальным изучением внутреннего строения минеральных индивидов и агрегатов.

Комбинируя полученные онтогенетические, химические, структурные и морфологические признаки, получают сведения о составе материнской среды, о возрасте кристаллизации и наложенных процессов (U-Pb, Rb-Sr, Sm-Nd, Lu-Hf, Re-Os геохронометрия); температуре кристаллизации; источнике вещества, истории магматизма, метаморфизма и метасоматизма (Hf, O изотопия, геохимия Y и REE) и т.д. Только опираясь на знание минерогенетических законов, законов анатомии, методов онтогении и обоснованной последовательности их применения при исследовании минералов, появляется возможность говорить и об эффективном использовании полученных данных при корреляции горных пород, определении генетического и формационного типа оруденения, его масштабности, стадийности, зональности и т.д. Максимально полное (при разумном соблюдении принципа необходимости и достаточности) использование достижений в реконструкции истории конкретных минеральных индивидов и агрегатов с получением их разнообразных индикаторных характеристик и системный анализ этих данных (Марин, 1988) – залог создания рационального эффективного комплекса поисково-оценочных признаков рудоносности геологических образований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.И., Марин Ю.Б. Структурно-химическая неоднородность природных кристаллов и микрогеохимическое направление в онтогении минералов // ЗРМО. 2012. № 1. С. 3–21.
- Алексеев В.И., Марин Ю.Б. Состав и эволюция акцессорной минерализации литий-фтористых гранитов Дальнего Востока как индикаторы их рудоносности // ЗРМО. 2014. № 6. С. 1–16.
- Алексеев В.И., Марин Ю.Б. Вариации состава минералов группы пироклора в онгонитах и цвиттертах Верхнеурмийского массива (Дальний Восток) // ЗРМО. 2018. № 2. С. 65–79.
- Барabanов В.Ф. К вопросу о том, “Что же такое генетическая минералогия?” (Ответ А.Г. Жабин) // ЗВМО. 1979. № 4. С. 494–499.
- Бродская Р.Л., Марин Ю.Б. Онтогенетический анализ на микро- и наноуровне минеральных индивидов и агрегатов для реставрации условий рудообразования и оценки технологических свойств минерального сырья // Записки Горного института. 2016. Т. 219. С. 369–376.
- Гавриленко В.В., Панова Е.Г. Геохимия, генезис и типоморфизм минералов месторождений олова и вольфрама. СПб: Невский курьер, 2001. 260 с.
- Гинзбург А.И. Генетическая минералогия – задачи и проблемы / Проблемы кристаллохимии и генезиса минералов. Л.: Наука, 1983. С. 14–20.
- Гинзбург А.И., Кузьмин В.И., Сидоренко Г.А. Минералогические исследования в практике геологоразведочных работ. М.: Недра, 1981. 236 с.
- Григорьев Д.П. Онтогения минералов. Изд. Львовск. ун-та, 1961. 284 с.
- Григорьев Д.П. О законах анатомии кристаллов // Кристаллография. 1971. Т. 16. Вып. 6. С. 1226–1229.
- Григорьев Д.П. Рассуждения о минералогии. Сыктывкар: Геопринт, 1998. 88 с.
- Григорьев Д.П., Жабин А.Г. Онтогения минералов. Индивиды. М.: Наука, 1975. 340 с.
- Ермаков Н.П. Геохимические системы включений. М.: Недра, 1972. 376 с.
- Жабин А.Г. Что же такое генетическая минералогия? // ЗВМО. 1978. Вып. 5. С. 620–622.
- Жабин А.Г. Онтогения минералов. Агрегаты. М.: Наука, 1979. 279 с.
- Жабин А.Г. Минеральный индивид как организм, как морфопроект: историческая методология / Теория минералогии. Л.: Наука, 1988. С. 27–33.
- Иванов О.К. Законы минералогии. История и типизация / Онтогения, филогения, системы минералогии. Материалы Всероссийской научной конференции. Миасс, 2015. С. 13–20.
- Каулина Т.В. Образование и преобразование циркона в полиметаморфических комплексах. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2010. 114 с.
- Краснова Н.И., Петров Т.Г. Генезис минеральных индивидов и агрегатов. СПб: Невский курьер, 1997. 228 с.
- Кривовичев В.Г. Физико-химическое моделирование поведения микроэлементов в природных системах. СПб: Изд-во СПбГУ, 2003. 84 с.
- Ляхович В.В. Акцессорные минералы в гранитоидах Советского Союза М.: Наука, 1967. 448 с.
- Марин Ю.Б. Рациональное использование минералогических критериев при оценке редкометальной рудоносности гранитоидных массивов / Минералогические критерии оценки рудоносности. Л.: Наука, 1981. С. 63–72.
- Марин Ю.Б. Теоретический и эмпирический подходы в минералогии / Теория минералогии. Л.: Наука, 1988. С. 15–20.

Марин Ю.Б., Скублов Г.Т., Гульбин Ю.Л. Минералого-геохимические критерии локального прогнозирования редкометалльных месторождений / Минералогическое картирование и индикаторы орудуения. Л.: Наука, **1990**. С. 67–94.

Никитина Л.П., Кривовичев В.Г. Межфазовые равновесия в минеральных системах и геотермобарометрия. СПб: Изд-во СПбГУ, **2003**. 97 с.

Оптимальный выбор методов изотопно-геохронологических и изотопно-геохимических исследований. СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, **2007**. 48 с.

Павлишин В.И., Юшкин Н.П., Попов В.А. Онтогенетический метод в минералогии. Киев: Наукова думка, **1988**. 118 с.

Перчук Л.Л., Рябчиков И.Д. Фазовое соответствие в минеральных системах. М.: Недра, **1976**. 287 с.

Петровская Н.В. Неоднородность минералов — один из важнейших вопросов современной минералогии / Неоднородность минералов и рост кристаллов. М.: Наука, **1980**. С. 3–10.

Попов В.А. Онтогенетия минералов и парадигмы минералогии // Уральский геологический журнал. **2007**. № 5. С. 61–66.

Попов В.А. Практическая генетическая минералогия. Екатеринбург: УрО РАН, **2011**. 167 с.

Попова В. И. Нейтронно-активационная радиография минералов. Миасс: ИМин УрО РАН, **1995**. 188 с.

Пунин Ю.О., Штукенберг А.Г. Автодеформационные дефекты кристаллов. СПб: Изд-во СПбГУ, **2008**. 318 с.

Реддер Э. Флюидные включения в минералах. Т. 1. М.: Мир, **1987**. 560 с.

Руденко С.А. Генетические основы минералогических методов поисков и разведки полезных ископаемых / Минералогические критерии оценки рудоносности. Л.: Наука, **1981**. С. 5–25.

Руденко С.А. Основы генетической минералогии. Л.: Изд-во Ленинградского горного института, **1989**. 98 с.

Руденко С.А., Иванов М.А., Романов В.А. Метаморфизм минералов — важное явление в истории их формирования // ЗВМО. **1978**. Вып. 6. С. 697–710.

Сидоренко А. В., Ляхович В.В. Микровключения и геохимия минералов / Проблемы кристаллохимии и генезиса минералов. Л.: Наука, **1983**. С. 30–37.

Соболев В.С. Введение в минералогия силикатов. Изд-во Львовского ун-та, **1949**. 329 с.

Таусон В.Л. Эндокриптия: современное содержание понятия и методы исследования // Геохимия. **1999**. № 6. С. 665–668.

Типоморфизм минералов: Справочник. М.: Недра, **1989**. 560 с.

Урусов В.С. Теоретическая кристаллохимия. М.: Изд-во МГУ, **1987**. 275 с.

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

Шоу Д.М. Геохимия микроэлементов кристаллических пород. Л.: Недра, **1969**. 208 с.

Эшкин В.Ю. Поисковая минералогия и минералогическое картирование. Л.: Изд-во ЛГИ, **1989**. 96 с.

Юргенсон Г.А. Типоморфизм и рудоносность жильного кварца. М.: Недра, **1984**. 149 с.

Юшкин Н.П. Теория и методы минералогии (избранные проблемы). Л.: Наука, **1977**. 291 с.

Юшкин Н.П. Топоминералогия. М.: Недра, **1982**. 288 с.

Юшкин Н.П. Генетические методы минералогии и онтогенетия минералов / Проблемы онтогенетия минералов. Л.: Наука, **1985**. С. 3–9.

Юшкин Н.П. Минералогия на пороге нового тысячелетия // Уральский минералогический сборник № 9. Миасс: ИМин УрО РАН, **1999**. С. 3–21.

Юшкин Н.П., Асхабов А.М. Мир наноминералогии // Вестник института геологии Коми НЦ УрО РАН. **2007**. № 12. С. 2–5.

Mineralogical Studies and the Use of Mineralogical Information when Solving Problems of Petro- and Ore-genesis

Yu. B. Marin*

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

*e-mail: yubmarin@yandex.ru

The deep penetration of crystal chemistry and physics of minerals into mineralogy, as well as the introduction of modern physical methods have advanced mineralogical research to a qualitatively new level. Having provided progress in the knowledge of the constitution and properties of minerals they have somewhat moved mineralogy away from solving its fundamental problems, i.e. deducing mineralogical regularities. With the help of new methods, many spectacular genetic decipherers were made, but due to the ignorance of laws of anatomy

and ontogeny of minerals, many mistakes were also made. Insufficient attention to the study of zoning, sectorality, micro- and nano-inclusions, grain boundaries of the mineral individual precludes obtaining important information that reflects its development, change, and relationships with other minerals, and calls into question the reliability of the conclusions made. There is a need to return to the discussion of rules for obtaining and using mineralogical information, the place and sequence of mineralogical research in solving problems of petro- and ore-genesis. The processes of petro- and ore-genesis are implemented in wide thermodynamic and spatial-temporal boundaries, which leads to the appearance of mineral generation, stages and phasing reflected in the features of the composition and structure of mineral individuals and aggregates. Rational research of minerals in solving genetic problems can be represented as a multi-stage process of establishing the sequence of mineral formation, identifying their indicator parameters, geochronological dating, reconstruction of petro- and ore-genesis conditions. When determining the range of indicator minerals, it is important to take into account their place in the geological evolution of the object under study. The most important requirement for sampling mineral indicators and geochronometers is that their properties match the specific parameters of the object or process being studied. This is a prerequisite for reliable interpretation of genetic information obtained in the course of mineralogical research. Effective use of indicator properties of mineral individuals and aggregates for solving genetic problems is possible only if a systematic approach to the study of objects and accurate spatial and temporal binding of the determined parameters take place, the reliability of which is provided by ontogenic analysis with a detailed study of the structure of individuals and aggregates. Only based on the knowledge of mineragenetic laws, ontogeny methods and a reasonable sequence of their application in the study of minerals, it is possible to effectively use the results obtained in the correlation of rocks, determining the genetic and formation type of mineralization, indicators of its scale, stage, etc.

Keywords: mineralogical research, mineral individuals and aggregates, anatomy and ontogeny of minerals, mineralogical laws and regularities, indicator minerals and geochronometers, typomorphism, petro- and ore-genesis

REFERENCES

- Alekseev V.I., Marin Yu.B. Structural and chemical heterogeneity of virgin crystals and microgeochemistry in ontogeny of minerals. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2012**. N 1. P. 3–21 (in Russian).
- Alekseev V.I., Marin Yu.B. Composition and evolution of accessory mineralization of Li–F granites in the Far East as indicators of their ore potential. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2014**. N 6. P. 1–16. (in Russian, English translation: Geol. Ore Deposits. 2015. Vol. 57. N 8. P. 635–644).
- Alekseev V.I., Marin Yu.B. Variations in the composition of pyrochlore group minerals in ongonites and zwitterites from Verkhneurmitsky massif (Russian Far East). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2018**. N 2. P. 65–79 (in Russian, English translation: Geol. Ore Deposits. 2019. Vol. 61. N 7. P. 655–669).
- Barabanov V.F. To the question of “What is genetic mineralogy?” (Answer to A. G. Zhabin). *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1979**. N. 4. P. 494–499 (in Russian).
- Brodskaia R.L., Marin Yu.B. Ontogenetical analysis on micro- and nanolevel of mineral individuals and aggregates for restoration of ore-genetical conditions and estimations of technological properties of mineral raw materials. *J. Mining Inst.* **2016**. Vol. 219. P. 369–376 (in Russian).
- Cook N.J., Ciobanu C.L., Pring A., Skinner W., Shimizu M., Danyushevsky L.M., Saini-Eidukat B., Melcher F. Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **2009**. Vol. 73. Iss. 16. P. 4761–4791.
- Donald W.D., Ian S.W., Thomas E.K. Historical development of zircon geochronology. *Rev. Miner. Geochem.* **2003**. Vol. 53. N 1. P. 145–181.
- Ermakov N.P. Geochemical systems of inclusions. Moscow: Nedra, **1972**. 376 p. (in Russian).
- Eshkin V.Yu. Prospecting mineralogy and mineralogical mapping. Leningrad: Leningrad Mining Institute, **1989**. 96 p. (in Russian).
- Gavrilenko V.V., Panova E.G. Geochemistry, origin and mineralogical peculiarities of the tin and tungsten ore deposits. Saint-Petersburg: Nevsky courier, **2001**. 260 p. (in Russian).
- Ginzburg A.I. Genetic mineralogy-tasks and problems. In: *Problems of crystal chemistry and Genesis of minerals*. Leningrad: Nauka, **1983**. P. 14–20 (in Russian).

- Ginzburg A.I., Kuzmin V.I., Sidorenko G.A. Mineralogical research in the practice of geological exploration. Moscow: Nedra, **1981**. 236 p. (in Russian).
- Götze J. Chemistry, textures and physical properties of quartz – geological interpretation and technical application. *Miner. Mag.* **2009**. Vol. 73. N 4. P. 645–671.
- Green T.H. Experimental studies of trace-element partitioning applicable to igneous petrogenesis – Sedona 16 years later. *Chem. Geol.* **1994**. Vol. 117. P. 1–36.
- Grigoriev D.P. Ontogeny of minerals. Lviv: Lviv Univ., **1961**. 284 p. (in Russian).
- Grigoriev D. P. On the laws of crystal anatomy. *Crystallography*. **1971**. Vol. 16. Iss. 6. P. 1226–1229 (in Russian).
- Grigoriev D.P. Arguments about mineralogy. Syktyvkar: Geoprint, **1998**. 88 p. (in Russian).
- Grigoriev D.P., Zhabin A. G. Ontogeny of minerals. Individuals. Moscow: Nauka, **1975**. 340 p. (in Russian).
- Ivanov O.K. Laws of mineralogy. History and typification. In: *Ontogeny, phylogeny, systems of mineralogy*. Proc. All-Russian Sci. Conf. Miass, **2015**. P. 13–20 (in Russian).
- Kaulina T.V. Formation and transformation of zircon in polymetamorphic complexes. Apatity: Kola SC RAS, **2010**. 114 p. (in Russian).
- Krasnova N.I., Petrov T.G. Genesis of mineral individuals and aggregates. Saint Petersburg: Nevsky courier, **1997**. 228 p. (in Russian).
- Krivovichev V.G. Physical and chemical modeling of the behavior of trace elements in natural systems. Saint Petersburg: SPbSU, **2003**. 84 p. (in Russian).
- Logvinova A.M., Wirth R., Fedorova E.N., Sobolev N.V. Nanometre-sized mineral and fluid inclusions in cloudy Siberian diamonds: new insights on diamond formation. *Eur. J. Miner.* **2008**. Vol. 20. P. 317–331.
- Lyakhovich V.V. Accessory minerals in granitic rocks of the Soviet Union. Moscow: Nauka, **1967**. 448 p. (in Russian).
- Malaspina N., Hermann J., Scambelluri M. Fluid/mineral interaction in UHP garnet peridotite. *Lithos*. **2009**. Vol. 107. P. 38–52.
- Marin Yu. B. Rational use of mineralogical criteria for evaluating rare-metal ore content of granitoid massifs. In: *Mineralogical criteria for evaluating ore content*. Leningrad: Nauka, **1981**. P. 63–72 (in Russian).
- Marin Yu. B. Theoretical and empirical approaches in mineralogy. In: *Theory of Mineralogy*. Leningrad: Nauka, **1988**. P. 15–20 (in Russian).
- Marin Yu.B., Skublov G.T., Gulbin Yu.L. Mineralogical and geochemical criteria local forecasting rare metal deposits. In: *Mineralogical Mapping and Indicators of Mineralization*. Leningrad: Nauka, **1990**. P. 67–94 (in Russian).
- Optimal choice of isotope-geochronological and isotope-geochemical research methods. SPb: VSEGEI, **2007**. 48 p. (in Russian).
- Pavlishin V.I., Yushkin N.P., Popov V.A. Ontogenic method in mineralogy. Kiev: Naukova Dumka, **1988**. 118 p. (in Russian).
- Perchuk L.L., Ryabchikov I.D. Phase matching in mineral systems. Moscow: Nedra, **1976**. 287 p. (in Russian).
- Petrovskaya N. V. Heterogeneity of minerals – one of the most important issues of modern Mineralogy. In: *Heterogeneity of minerals and growth of crystals*. Moscow: Nauka, **1980**. P. 3–10 (in Russian).
- Popov V.A. Ontogeny of minerals and paradigms of mineralogy. *Uralian Geol. J.* **2007**. N 5. P. 61–66.
- Popov V.A. Practical genetic mineralogy. Yekaterinburg: UB RAS, **2011**. 167 p. (in Russian).
- Popova V.I. Neutron activation radiography of minerals. Miass: IM UB RAS, **1995**. 188 p. (in Russian).
- Punin Yu. O., Stukenberg A. G. Auto-deformational defects of crystals. Saint Petersburg: SPbSU, **2008**. 318 p. (in Russian).
- Redder E. Fluid inclusions in minerals. *Rev. Miner.* **1984**. Vol. 12. 646 p.
- Rudenko S.A. Genetic bases of mineralogical methods of prospecting and exploration of mineral resources. In: *Mineralogical criteria for evaluating ore content*. Leningrad: Nauka, **1981**. P. 5–25 (in Russian).
- Rudenko S.A. Fundamentals of genetic mineralogy. Leningrad: Leningrad mining institute, **1989**. 98 p. (in Russian).
- Rudenko S.A., Ivanov M.A., Romanov V.A. Metamorphism of minerals – an important phenomenon in the history of their formation. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1978**. N 6. P. 697–710 (in Russian).
- Shaw D.M. Trace elements in magmas: a theoretical treatment. Cambridge University Press, **2006**. 254 p.
- Sidorenko A.V., Lyakhovich V.V. Microinclusions and geochemistry of minerals. In: *Problems of crystal chemistry and genesis of minerals*. Leningrad: Nauka, **1983**. P. 30–37 (in Russian).
- Sobolev V.S. Introduction to silicate mineralogy. Lviv: Lviv. Univ., **1949**. 329 p. (in Russian).

- Towson V.L. Endocrypty: modern maintenance concepts and research methods. *Geochem. Int.* **1999**. N 6. P. 665–668 (*in Russian*).
- Typomorphism of minerals: Handbook.* Moscow: Nedra, **1989**. 560 p. (*in Russian*).
- Tuttle O.F. L'origine et la classification des granites. *Sci. Terre, num. hors. serie.* **1955**. P. 299–310.
- Urusov V.S. Theoretical crystal chemistry. Moscow: MSU, **1987**. 275 p. (*in Russian*).
- Urusov V.S., Towson V.L., Akimov V.V. Solid state geochemistry. Moscow: GEOS, **1997**. 500 p. (*in Russian*).
- Yurgenson G.A. Typomorphism and ore-bearing properties of vein quartz. Moscow: Nedra, **1984**, 149 p. (*in Russian*).
- Yushkin N.P. Theory and methods of Mineralogy (selected problems). Leningrad: Nauka, **1977**. 291 p. (*in Russian*).
- Yushkin N.P. Topomineralogy. Moscow: Nedra, **1982**. 288 p. (*in Russian*).
- Yushkin N.P. Genetic methods of mineralogy and ontogeny of minerals. In: *Problems of ontogeny of minerals*. Leningrad: Nauka, **1985**. P. 3–9 (*in Russian*).
- Yushkin N.P. Mineralogy on the threshold of the new Millennium. *Ural Miner. Miscellany*. Miass: IMin UrO RAS, **1999**. P. 3–21 (*in Russian*).
- Yushkin N.P., Askhabov A.M. The world of nanomineralogy. *Vestnik IG Komi SC UD RAS*. **2007**. N 12. P. 2–5 (*in Russian*).
- Zhabin A.G. What is genetic mineralogy? *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1978**. N. 5. P. 620–622 (*in Russian*).
- Zhabin A.G. Ontogeny of minerals. Aggregates. Moscow: Nauka, **1979**. 279 p. (*in Russian*).
- Zhabin A.G. Mineral individual as an organism, as a morphoprocess: historical methodology. In: *Theory of mineralogy*. Leningrad: Nauka, **1988**. P. 27–33 (*in Russian*).
- Zircon. Ed. J.M. Hanchar and P.W.O. Hoskin. *Rev. Miner. Geochem.* **2003**. Vol. 53. 500 p.