

ОЦЕНКА МИНЕРАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ: ХИМИЯ, ГЕОХИМИЯ ИЛИ МИНЕРАЛОГИЯ?

Силаев В.И., Хазов А.Ф., Пискунова Н.Н.

Учреждение Российской академии наук Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар;
silaev@geo.komisc.ru

Внедрение высоких технологий в практику переработки минерального сырья [1] вновь поставило на повестку дня, казалось бы, давно решенный вопрос, что важнее для промышленной оценки минеральных месторождений: химия, геохимия или все же минералогия? Для самих минералогов этот вопрос сугубо риторический: минералогия, безусловно, важнее, поскольку минеральное сырье представляет собой вовсе не химические соединения, а тем более не химические элементы, а, во-первых, горные породы и руды, т. е. полиминеральные смеси, а во-вторых, собственно минералы. К этому следует добавить, что по объему добычи среди минерального сырья преобладают именно горные породы, непосредственно используемые в качестве строительных, облицовочных, поделочных и даже художественных материалов. Соответствующим примером могут служить песчано-гравийные смеси, кварциты и мраморы, так называемые гондиты (кварц-гранатовые кристаллические сланцы), нефриты (разновидность амфиболитов), жадеиты (разновидность пироксенитов), уральский камень-орлец (родонитовые горные породы), офикальцититы и многое другое. Второе место по объему добычи занимают собственно минералы, также часто используемые непосредственно в качестве физико-технического, камнесамоцветного и ювелирного сырья. Здесь впечатляющим примером могут служить алмазы, кварц, благородные корунды (рубин, сапфир, лейкосапфир), гранаты и даже самородные металлы, которые тоже являются не химическими элементами, а минералами (рис. 1). И лишь после всего этого можно говорить о минеральном сырье как источнике химических элементов. Однако и в таком случае технологам приходится иметь дело фактически вовсе не с химическими соединениями, а все с теми же полиминеральными горными породами, рудами и отдельными минералами.



Рис. 1. Минералы как минеральное сырье: а–г – некоторые разновидности алмаза из соответственно Колумбии, России, Южной Африки и Бразилии; д, е – кварц; ж – гранаты (гроссуляр); з – самородное золото; и – самородная медь

Что же такое минерал?

Всем известно, что минералы характеризуются химическим составом, но минералы – гораздо больше, чем просто химические соединения, образовавшиеся в результате химических реакций. Не в последнюю очередь «заслуга» в подобном недопонимании принадлежит именно отцам-основателям современной минералогии, многие из которых подавали соответствующее фундаментальное понятие весьма эклектично.

В.И. Вернадский (минералог-геохимик): минералы - это 1) «продукты химических реакций, протекающих естественным путем в земной коре; 2) физически или химически индивидуализированный продукт химических реакций, состоящий из химических молекул».

П. Ниггли (минералог-петролог): минералы - это «все капельные (жидкие) или плотные неорганические, в физико-химическом смысле гомогенные вещества, которые мы находим в земной коре».

А.Г. Бетехтин (минералог-рудник): минералы - это «природные химические соединения, являющиеся естественными продуктами различных физико-химических процессов, совершающихся в земной коре».

А.К. Болдырев (минералог): минералы - это «химически или физически вполне или приблизительно однородная составная часть земной коры, у которой химический состав и главные физические свойства в разных ее точках постоянны или колеблются в определенных сравнительно узких пределах».

ЕК. Лазаренко (минералог): минерал - это «природное физически или химически индивидуализированное тело, возникшее в результате процессов, происходивших в земной коре».

А.А. Годовиков (минералог): минералы - это «химически или физически индивидуализированный неорганический продукт природной физико-химической реакции».

В целом, из почти всех приведенных выше цитат следует, что минерал это физически или химически индивидуализированный, неорганический, жидкий или твердый («плотный»), гомогенный в физико-химическом смысле продукт естественных, т. е. протекающих в земной коре химических (физико-химических) реакций (процессов). Некоторым отклонением от общей тенденции здесь выглядит только высказывание академика А.К. Лазаренко о том, что минерал это не только продукт химической реакции, но еще и тело.

Что же представляет собой минерал на самом деле? Наиболее лаконично и всеобъемлюще на этот вопрос ответил профессор Д.П. Григорьев: 1) «минералы – естественные каменные тела; 2) минералы это организм» [2–7]. Именно на основе таких представлений мы в настоящее время можем утверждать [8, 9], что минерал следует, прежде всего, понимать как индивидуальное физическое тело – индивид, отличающийся от химического соединения – продукта химической реакции, множеством фундаментальных качеств: 1) фазовой дискретностью, т. е. наличием физических границ, выделяющих минерал из окружающей среды; 2) физической телесностью, сочетающей нетождественные по физико-химическим свойствам внутренний объем и поверхность индивидов; 3) формой, часто кристаллографически закономерной; 4) анатомией, т. е. упорядоченным зонально-секториальным внутренним строением индивидов; 5) кристалличностью, т. е. решетчато-упорядоченной атомной структурой; 6) онтогеничностью, т. е. индивидуальной историей зарождения, роста и изменения каждого индивида.

Из перечисленных свойств с полной очевидностью следует, что минерал никак нельзя отождествлять просто с продуктами химических или физико-химических реакций, для существования которых не требуется ни фазовой дискретности, ни телесности, ни физической формы, ни анатомии, ни, тем более, онтогеничности. Но именно эти выше перечисленные свойства и имеют решающее значение для любых технологических операций с минеральным сырьем.

Фазовые и субфазовые границы, обуславливающие пространственную дискретность минеральных индивидов, определяются в минералогии чаще всего как межзерновые границы [10]. Их принято различать по степени согласия кристаллических структур соседствующих зерен или фрагментов зерен, разделяя на когерентные (при полном согласии структур), частично когерентные (при неполном согласии структур) и некогерентные (при полном несогласии структур). В первом случае мы имеем дело с локальными дислокационными нарушениями непрерывности в пределах индивидов. Во втором случае наблюдаем так называемые малоугловые границы, например, между субиндивидами в минеральных двойниках. В третьем случае сталкиваемся с настоящими межфазовыми (межзерновыми) границами (рис. 2).

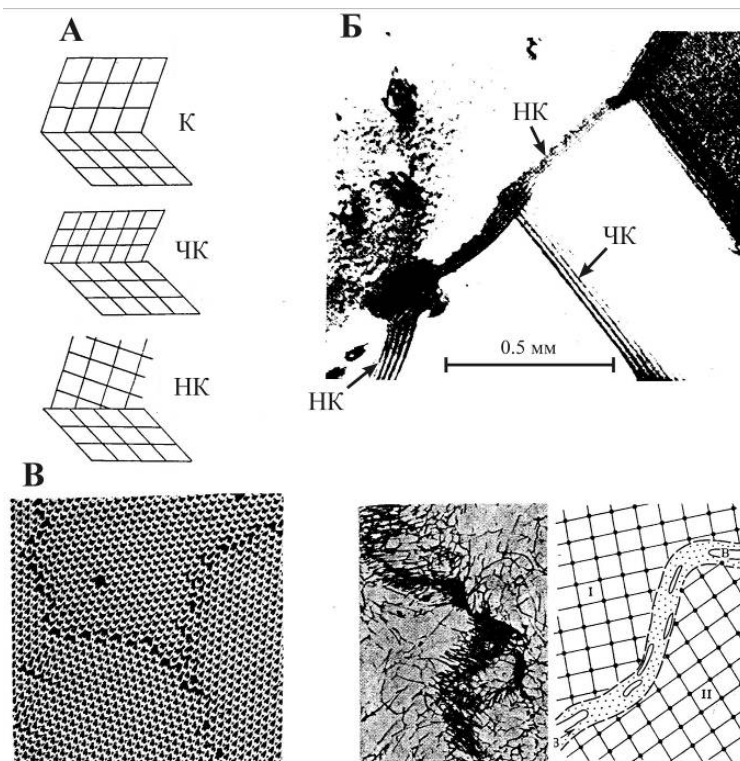


Рис. 2. Межзерновые (фазовые и субфазовые) границы между минералами. А – границы: когерентные (К), частично когерентные (ЧК), некогерентные (НК); Б – пример границ между индивидами (НК) и субиндивидами в двойнике (ЧК); В – некогерентные границы как место аккумуляции твердых, жидких и газообразных примесей

Как показывают многочисленные эксперименты, все отмеченные типы границ являются проводниками и локальными аккумуляторами ксеногенных химических веществ, но особенно активны в этом отношении некогерентные границы, которые, в сущности, представляют собой интерстициальные пространства, выступающие как локальные среды специфичного минералообразования.

Поверхность как особая функция телесности минеральных индивидов стала осознаваться минералогами достаточно давно. Многочисленные исследования показали, что в силу физических и химических отличий от внутреннего объема минерала поверхность индивидов не остается пассивной, проявляя себя как отдельная и весьма своеобразная среда минералообразования. Подтверждением этого могут служить результаты изучения алабандина из недавно открытого нового типа марганцевых рудных месторождений [11].

С помощью атомно-силовой микроскопии и раман-спектроскопии нами были исследованы кристаллографические и случайные поверхности алабандиновых кристаллов (рис. 3). В результате этого на гранях наряду с наноступенчатым рельефом и ориентированными в одном направлении холмиками роста были обнаружены участки, покрытые новообразованными пленками, состоящими из сложно агрегированных глобул мезонанометрового размера. По данным раман-спектроскопии в состав таких пленок входят гидроксиды марганца (пирохроит, манганит) в сочетании с самородной серой, что можно расценивать как признак формирования на поверхности алабандина наномикрогетероструктур. Все это мы объясняем гидролитическим разложением алабандина, при котором часть серы окислилась лишь до состояния S^0 . Последнее является новым фактом, поскольку ранее считалось, что образующиеся на поверхности окисляющихся сульфидов гетероструктуры не содержат серы [12].

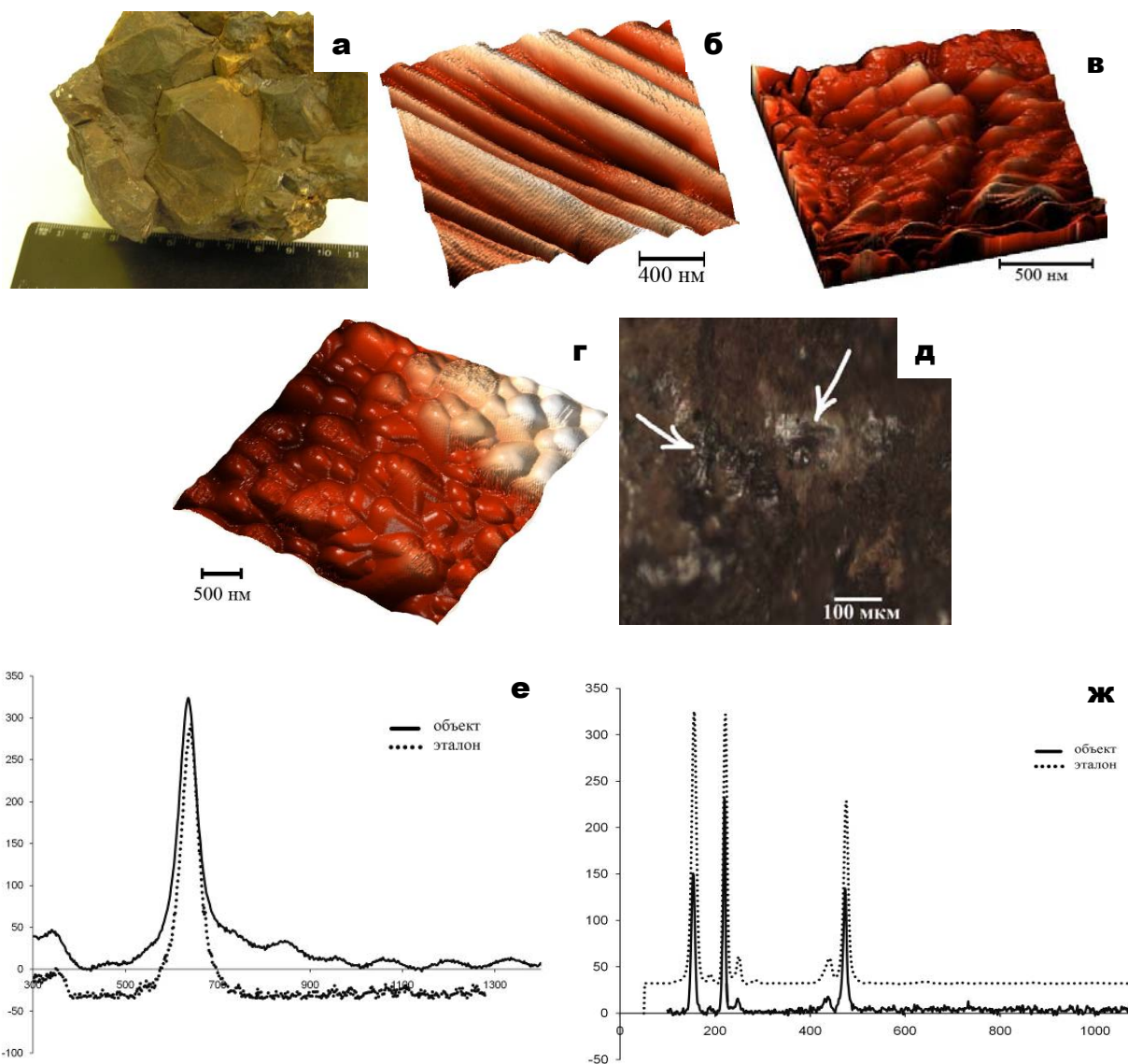


Рис. 3. Кристаллографические индивиды алабандина (а); АСМ-изображения наноступенек (б) и холмиков роста (в) на их поверхности, а также глобулярного строения пленок окисления (г); оптическое изображение образовавшихся на поверхности алабандина наномикроминералов д) и раман-спектры новообразованных пирохроита (е) и самородной серы (ж)

Таким образом, рассмотренный пример алабандина показывает, что поверхность минеральных индивидов действительно следует рассматривать как место, где происходят не только химические процессы (окисление-восстановление, сорбция-десорбция, ионные обмены), но и практически непрерывно идет минералообразование в микро-нанометровом диапазоне размерности индивидов. Очевидно, что такие процессы не могут не влиять на поверхностные свойства макрочастиц, от которых непосредственно зависит и эффективность процедур переработки минерального сырья.

Внутреннее строение минеральных тел, как известно, является строго закономерным, что Д.П. Григорьевым было сформулировано в форме законов анатомии минеральных индивидов: 1) кристаллы состоят из пирамид нарастания граней, плоскостей перемещения ребер и линий перемещения вершин; 2) кристаллографически разные пирамиды, плоскости и линии перемещения нетождественны по своим химическим и физическим свойствам [13]. Изначально выявленный феномен был объяснен различиями в тонких особенностях роста соответствующих элементов анатомии. В настоящее время существует масса прямых и косвенных этому подтверждений, например, образование скелетных и антискелетных форм, зонально-секториальное распределение ксеноминеральных примесей и окраски в индивидах, выборочное осаждение на кристаллографических гранях так называемых минеральных присыпок (рис. 4).

Позже стало понятно, что законам анатомии подчиняется распределение химических элементов даже на изотопном уровне [14, 15].

К сказанному следует добавить следующее. В реальных условиях в индивидах минералов реализуется не только истинная анатомия по Д.П. Григорьеву (с сохранением фазовой гомогенности), но и гораздо более грубая неоднородность, проявляющаяся в закономерной для всего индивида фазовой гетерогенности. Примерами такой анатомии могут служить кристаллы-«матрешки», внутри которых имеются фантомы (рис. 5), или индивиды кристаллографически мотивированных структур распада твердых растворов.

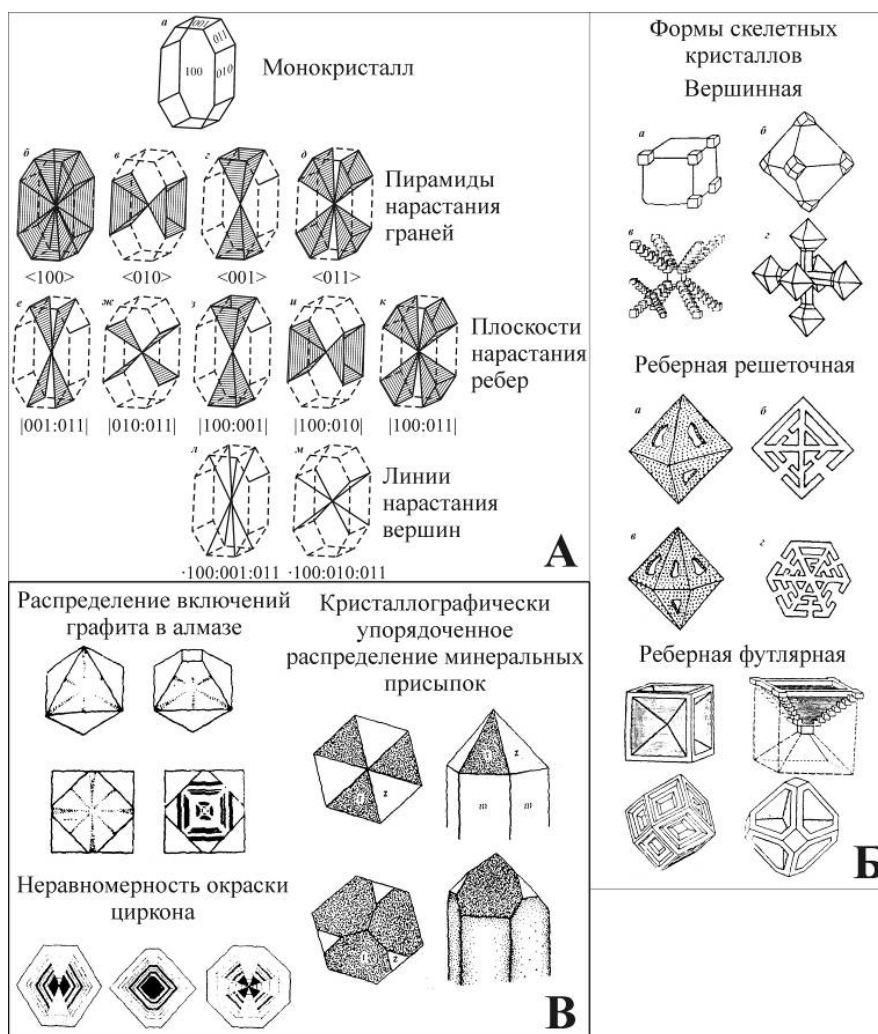
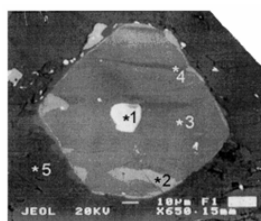
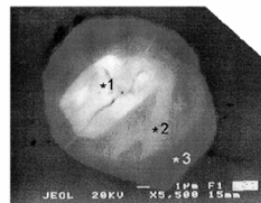


Рис. 4. Элементы анатомии (А) и их проявление в образовании разных скелетных форм индивидов (Б), а также в распределении включений, окраски и минеральных присыпок (В)



1. $(\text{Ca}_{0.19}\text{Sr}_{0.02}\text{La}_{0.31}\text{Ce}_{0.41}\text{Nd}_{0.05})_{0.98}\text{Al}_{2.89}[(\text{PO}_4)_{1.9}(\text{SO}_4)_{0.1}](\text{OH})_{5.5}$ **Sr-Ca-флоренсит**
2. $(\text{Ca}_{0.41}\text{Sr}_{0.27}\text{La}_{0.04}\text{Ce}_{0.11}\text{Nd}_{0.05})_{0.88}\text{Al}_{2.93}[(\text{PO}_4)_{1.33}(\text{SO}_4)_{0.67}](\text{OH})_{5.42}$ **REE-харттит**
3. $(\text{Ca}_{0.54}\text{Sr}_{0.28}\text{Ce}_{0.06}\text{Nd}_{0.03})_{0.91}\text{Al}_{2.97}[(\text{PO}_4)_{1.22}(\text{SO}_4)_{0.78}](\text{OH})_{5.6}$ **REE-харттит**
4. $(\text{Ca}_{0.51}\text{Sr}_{0.33}\text{Ce}_{0.04}\text{Nd}_{0.01})_{0.89}\text{Al}_{2.97}[(\text{PO}_4)_{1.1}(\text{SO}_4)_{0.9}](\text{OH})_{5.64}$ **REE-харттит**
5. $(\text{Ca}_{0.93}\text{Sr}_{0.05})_{0.98}\text{Al}_{2.83}[(\text{PO}_4)_{1.36}(\text{SO}_4)_{0.64}](\text{OH})_{5.09}$ **Вудхаузеит**



1. $(\text{Ca}_{0.2}\text{Sr}_{0.13}\text{La}_{0.16}\text{Ce}_{0.32}\text{Nd}_{0.08})_{0.89}(\text{Al}_{2.68}\text{Fe}_{0.25})_{2.93}[(\text{PO}_4)_{1.66}(\text{SO}_4)_{0.27}](\text{OH})_{5.61}$ **Sr-Ca-флоренсит**
2. $(\text{Ca}_{0.33}\text{Sr}_{0.48}\text{Ce}_{0.04}\text{Nd}_{0.03})_{0.88}(\text{Al}_{2.94}\text{Fe}_{0.02})_{2.96}[(\text{PO}_4)_{1.14}(\text{SO}_4)_{0.77}(\text{SiO}_4)_{0.09}](\text{OH})_{5.75}$ **REE-харттит**
3. $(\text{Ca}_{0.5}\text{Sr}_{0.46}\text{Ba}_{0.03})_{0.99}(\text{Al}_{2.93}\text{Fe}_{0.05})_{2.98}[(\text{PO}_4)_{1.58}(\text{SO}_4)_{0.35}(\text{SiO}_4)_{0.07}](\text{OH})_{5.2}$ **Харттит**

Рис. 5. Индивиды редкоземельных алюмофосфатов с фантомной анатомией, отражающейся в скачкообразном переходе от флоренсита к харттиту [16]

Кристалличность, т. е. решетчатый тип атомной структуры, является важнейшим отличием минералов от химических соединений. Суть этого отличия состоит в том, что для структуры минералов наиболее существенным является не химическая связь как таковая, а характер пространственного координирования отдельных атомов. Наиболее четко это выражено теорией Барлоу-Белова, известной как принцип плотнейших упаковок, до сих пор являющийся универсальным ключом к пониманию многообразных кристаллических структур. Известно также, что химические соединения, приобретая в особых условиях кристалличность, подчиняются после этого не химическим, а кристаллохимическим законам (рис. 6).

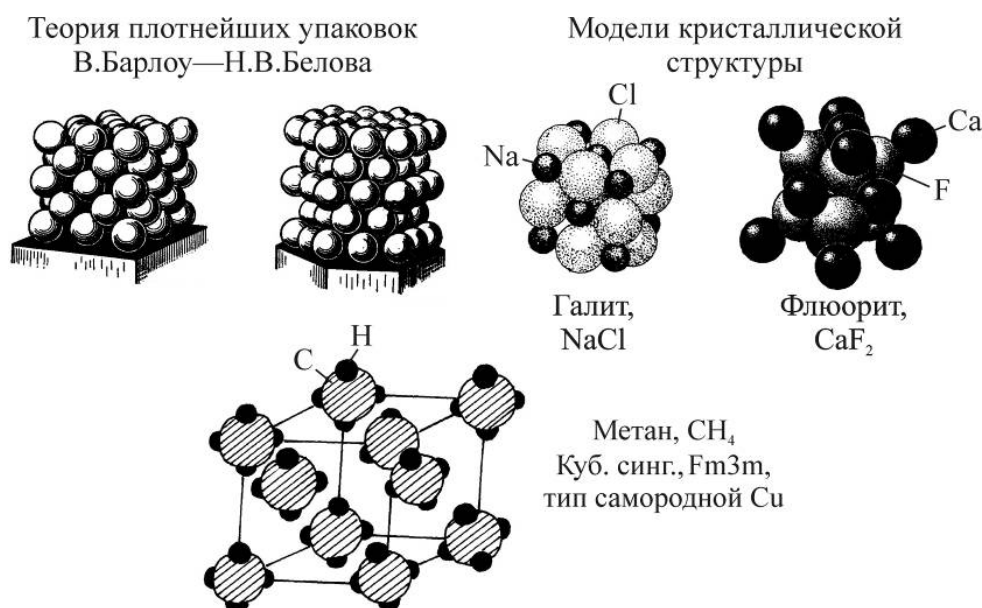


Рис. 6. Важнейший принцип образования кристаллической структуры и некоторые примеры моделей атомно- и молекулярно-решетчатого строения минералов

Важно подчеркнуть, что переход при толковании атомного строения минералов от химического принципа к кристаллохимическому всегда сопровождается изменением представлений о веществе. Наилучшим примером этого является история химической идеи о пресловутом каолинитовом ядре, якобы лежащем в основе структуры алюмосиликатов, выдвинутой и развиваемой на протяжении многих десятилетий В.И. Вернадским. При всей своей правдоподобности упомянутая идея не только способствовала ошибочной трактовке структуры соответствующих минералов, но и мешала правильно оценивать собственно химический состав самого каолинита (рис. 7).

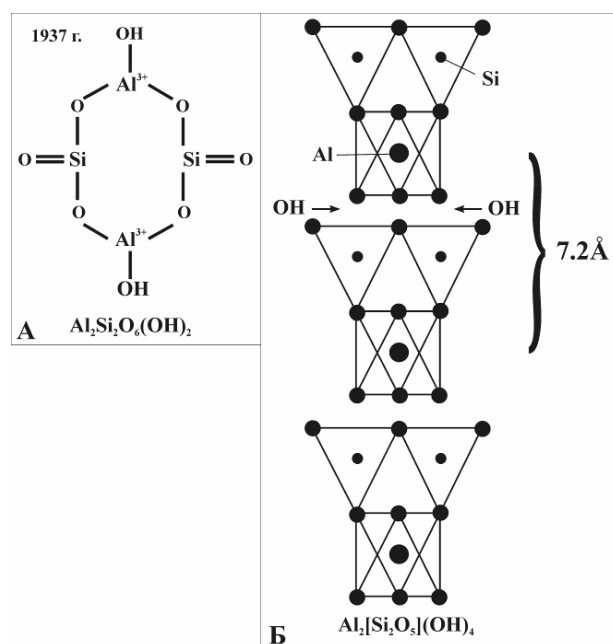


Рис. 7. Последний прижизненный вариант «каолинитового ядра» по В.И. Вернадскому (А) и модель реальной кристаллической структуры каолинита (Б)

Кристаллохимический принцип структуры, принципиально отличающий минералы от химических соединений, проявляется еще и в том, что в минералах, благодаря их кристалличности, образуются структурные дефекты, не предусмотренные никакими химическими теориями. При этом именно дефекты такого рода не только определяют важнейшие качества многих видов минерального сырья [17], но и являются наиболее надежным источником современных знаний о генезисе минералов [18, 19].

Акцентируя внимание на кристалличности минералов, нельзя игнорировать вопрос, а что принципиально нового в сравнении химическими реакциями дает для минералообразования кристаллическая структура? Ответ на этот вопрос лучше всего представить в виде конкретного примера. Как известно, в течение многих десятилетий в литологии существовала и продолжает существовать проблема генезиса доломита. Суть этой проблемы состоит в том, что в результате химического синтеза всегда получается механическая смесь простых солей CaCO_3 и MgCO_3 , поскольку их взаимная растворимость незначительна [20, 21]. Однако в природе, тем не менее, широко распространены не «соли Линка», а именно доломит. Причиной такого парадокса является то, что двойной Ca-Mg карбонат – вещество кристаллическое, в котором химически плохо смешивающиеся ионы кальция и магния разведены по разным подрешеткам и потому практически не мешают друг другу (рис. 8).

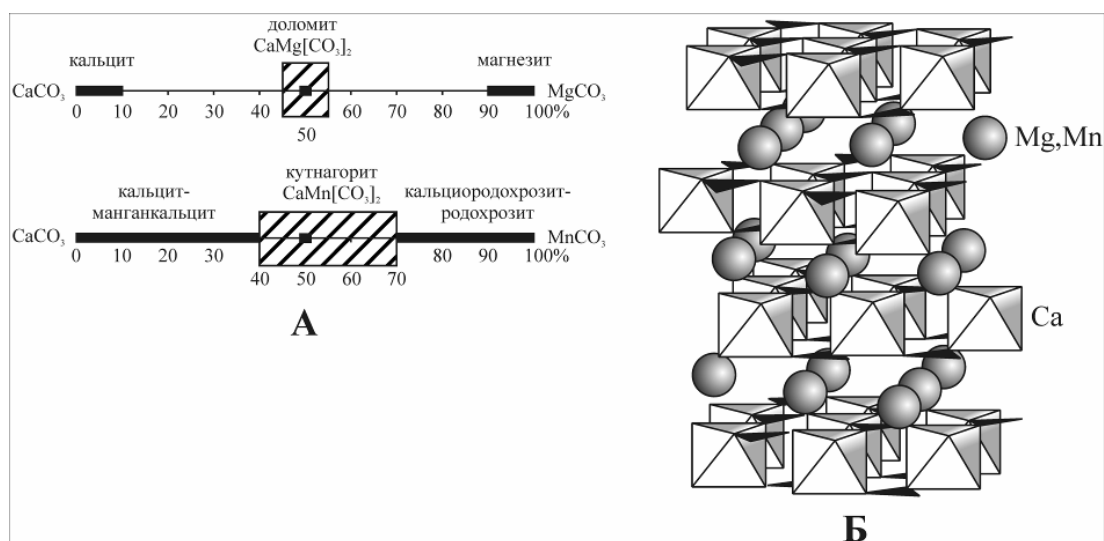


Рис. 8. Диапазоны химической растворимости монокарбонатов Ca, Mg, Mn (А) и кристаллохимическое объяснение причины образования в природе химически запрещенных двойных карбонатов (Б, приведена модель слоистой структуры двойных карбонатов по Н.В. Белову)

Следовательно, образование химически запрещенного доломита стало возможным только благодаря его кристалличности. Ровно таким же образом можно объяснить и образование в природе минерала кутнагорита $\text{CaMn}[\text{CO}_3]_2$. И в этом случае взаимная химическая растворимость соответствующих монокарбонатов не распространяется на область эквимолярных соотношений ионов кальция и марганца, но появлению кристаллического кутнагорита это несколько не мешает.

Онтогеничность, т.е. историчность каждого конкретного индивида является свойством, особенно кардинально отличающим минералы от химических соединений. Очевидно, что именно это свойство и имел в виду Д.П. Григорьев, когда уподобил минерал организму, как бы проводя формальную его аналогию с биологическими объектами [22]. Именно Д.П. Григорьевым и его коллегами было впервые показано, что при известной сноровке во многих минеральных индивидах, переживших сложную историю зарождения, роста и изменений, можно сначала выявить соответствующие этим событиям детали морфологии и внутреннего строения, а потом по таким деталям синхронизировать упомянутые события в масштабе крупных геологических объектов [23].

В настоящее время весь объем минералогических знаний, безусловно, подтверждает справедливость подобного рода выводов. В качестве нового примера можно рассмотреть изученный нами монокристалл флоренсита из одного из уральских алмазоносных месторождений [24]. В продольном разрезе этого кристалла в режиме упруго-отраженных электронов легко выявляются последовательно сменявшие друг друга три фантома, а также оболочка и внешняя корка, обеспечившие окончательный облик индивида (рис. 9). Анализ показал, что после своего образования фантом № 1 подвергся существенному растворению. Позже произошла его регенерация и рост с образованием следующего во времени фантома № 2, который тоже подвергся частичному растворению и химическому изменению. После этого второй фантом претерпел регенерацию, сменившуюся ростом фантома № 3. Последний уже не растворялся, а лишь после некоторого перерыва в минералообразовании нарастал до окончательного ромбоэдрического габитуса. Обращает на себя внимание, что внешняя оболочка кристалла имеет тонкую ростовую зональность, не характерную для фантомов.

В ходе прерывисто-последовательного чередования актов роста и растворения изменялся и химический состав флоренсита. Внутренний фантом № 1 отличается максимальным содержанием Ca и Sr. Следующий по времени кристаллизации фантом № 2 обнаруживает меньшее содержание редкоземельных элементов и более однородное внутреннее строение, еще совершеннее в этом отношении выглядит фантом № 3. С переходом к внешней оболочке в флоренсите вновь увеличилась концентрация Ca и Sr.



Рис. 9. Кристалл уральского флоренсита, сохранивший в своей анатомии сложную историю зарождения, роста и периодического растворения. СЭМ-изображение в режиме упруго-отраженных электронов

Таким образом, флоренсит, находящийся в уральских алмазоносных месторождениях, по длительности и сложности своей истории вряд ли сильно уступает и самому алмазу.

Размер минеральных индивидов как фактор переработки минерального сырья

Во времена В.И. Вернадского и А.Е. Ферсмана предполагалось, что вещество в горных породах и рудах находится в трех формах: 1) минеральной с размером индивидов более 100 мкм; 2) эндокриптной — в виде кластерной неструктурной примеси в минералах; 3) изоморфной — в виде примеси в минералах структурно-когерентных химических элементов. В настоящее время хорошо известно, что размерность частиц минерального вещества распространяется на 12 порядков, восемь из которых приходится на собственно минералы ($10 \dots 10^{-8}$ м), два последующие — на эндокриптные формы ($10^{-8} \dots 10^{-10}$ м), а два оставшиеся ($10^{-10} \dots 10^{-12}$ м) отвечают химическим элементам и элементарным частицам [25–27]. Из всего этого следует, что в действительности подавляющая часть элементов-примесей в горных породах и рудах имеют не химическую, а минералогическую природу, т. е. входят в состав собственных минералов с нано-микрометровой размерностью индивидов [28, 29].

Примеры подобных минерализаций весьма многочисленны и разнообразны. Наиболее изучены в этом отношении благороднометалльные руды, в которых значительная часть платиноидов и золота сосредотачивается в сульфидах в форме дисперсной, трудно визуализируемой вкрапленности малоразмерных индивидов, которые технологически ведут себя, естественно, не как химический, а минеральный компонент (рис. 10).

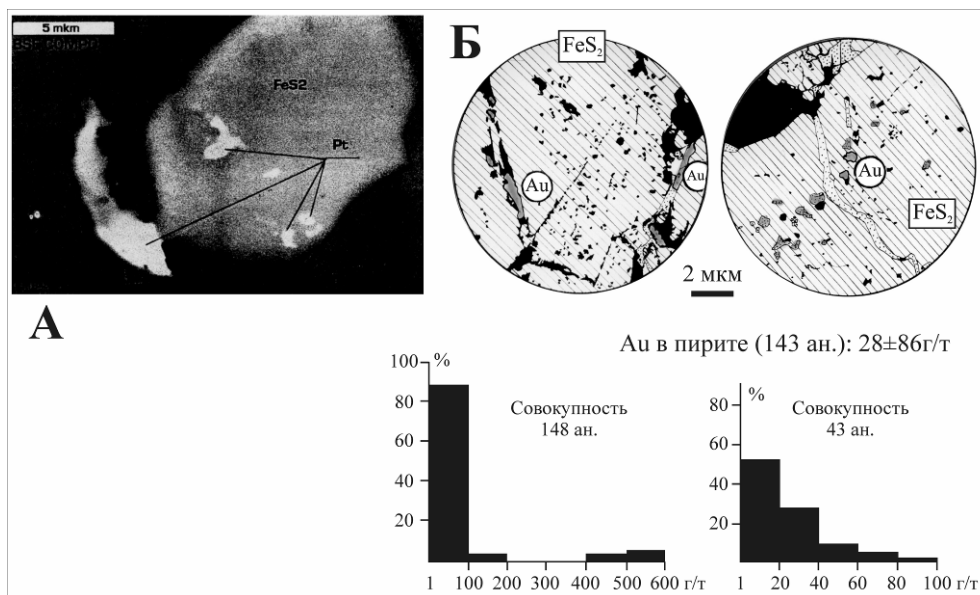


Рис. 10. Дисперсно-фазовая примесь в пирите: А – тетраферроплатины на месторождении Сухой Лог (по Н.П. Лаврову, В.В. Дистлеру и Г.Л. Митрофанову); Б – самородного золота на месторождении Талдыбулак Левобережный.

К не менее интересным результатам привели исследования алмазной фазы в карбонадо. В этом случае, используя особый метод препарирования и высокоразрешающую ПЭМ [30], нам удалось выявить в алмазных индивидах множество твердых включений размером в десятки–первые сотни нм, но при этом обладающих, судя по морфологии, всеми фундаментальными свойствами минералов (рис. 11). Можно также упомянуть и факт открытия сульфидно-индиево-марганцевого месторождения, благодаря обнаружению в нем множества именно наномикрометровых включений разнообразных индиевых сульфидов [31, 32].

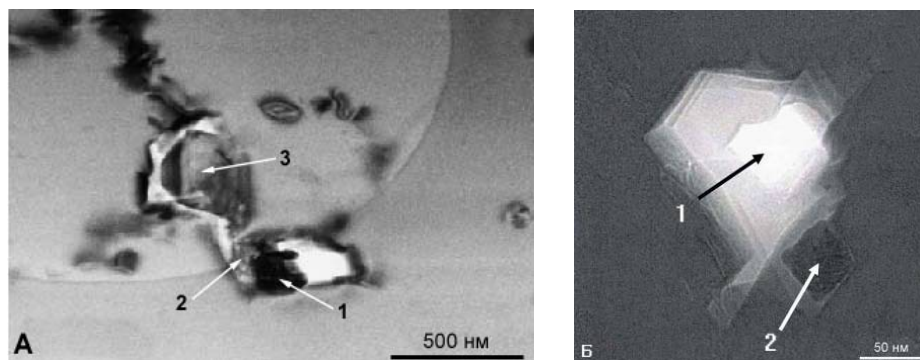


Рис. 11. Ксеноминеральные включения в алмазной фазе бразильских карбонадо. На А: 1 – апатит, 2 – барит + кальцит, 3 – кварц; на Б: 1 – самородный свинец, 2 – циркон. ПЭМ-изображения ультратонкого среза-пленки, полученного ФИБ-методом

Наконец, стоит напомнить, что в ряде случаев только наноминералогический уровень исследований позволяет выявить в минеральном сырье качества, способствующие получению высокотехнологичного и весьма ценного продукта [33, 34].

Как управлять микроминералогическим фактором?

С выходом на наномикрометровый уровень исследований минерального сырья обнаружилась неожиданная, но весьма существенная и для геотехнологий проблема. Оказалось, что кристаллохимическая номенклатура минералов малой размерности существенно не совпадает с таковой для минералов обычного размера. Как известно, среди последних резко преобладают кислородные соединения, халькогениды представлены существенно меньше, а галиды и простые вещества по встречаемости не достигают в совокупности и 10% [35]. Это хорошо коррелируется с распределением минералов и по основным структурным мотивам (рис. 12).

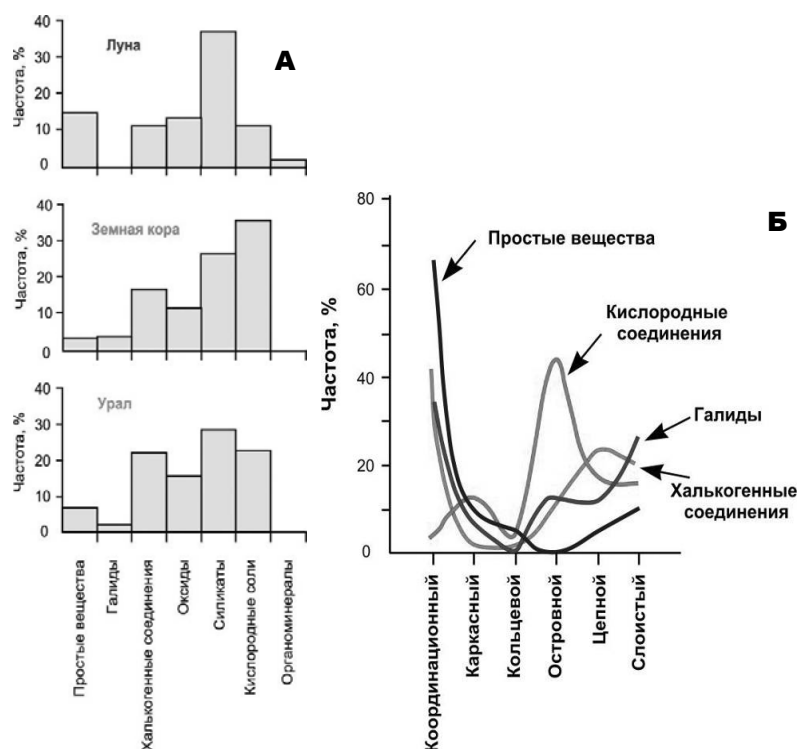


Рис. 12. Распределение минералов нормального размера по кристаллохимическим типам (А) и мотивам кристаллической структуры (Б)

Анализ естественных множеств микроминералов показал, что их распределение по кристаллохимическим типам и мотивам кристаллической структуры существенно иное. Так, на примере полиминеральных кварцитов Полярного Урала [36] было установлено, что среди индивидов менее 5 мкм резко преобладают простые вещества, на диапазон 5—50 мкм приходятся преимущественно зерна сульфидов и их аналогов, а в интервале 50—100 мкм минералы представлены в основном силикатами и кислородными солями (рис. 13а).

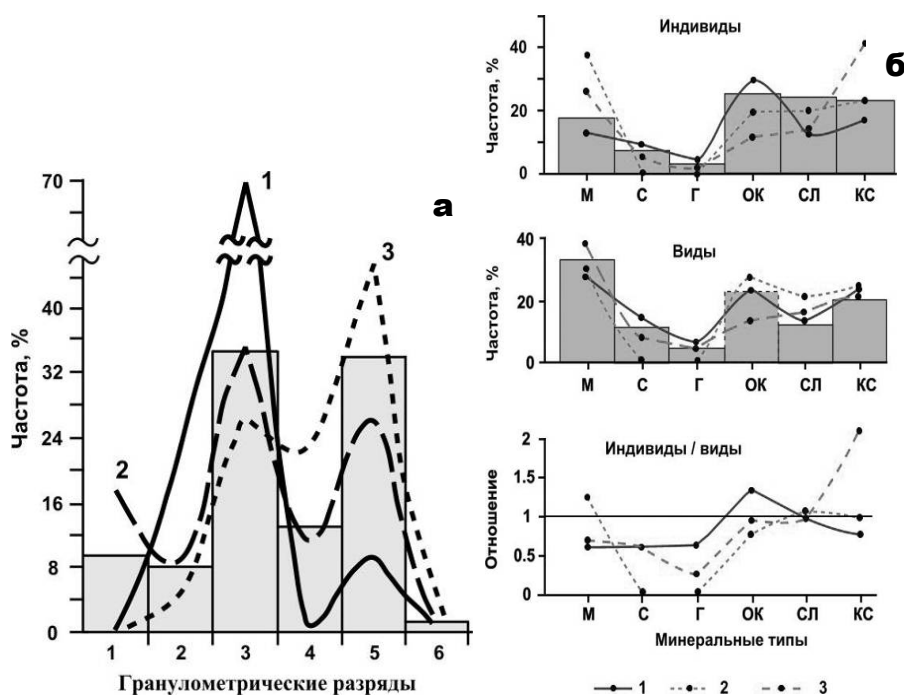


Рис. 13. Примеры распределений микроминералов по кристаллохимическим типам: а – кварциты Полярного Урала; гранулометрические разряды: 1 — (0.1...0.49), 2 — (0.5...0.9), 3 - (1...4.9), 4 — (5...9.9), 5 - (10...49.9), 6 - (50...100); кристаллохимические типы: 1 - простые вещества, 2 - сульфиды, 3 - кислородные соединения; б - бразильские карбонаты; кристаллохимические типы: М - простые вещества, С - сульфиды, Г - галиды, ОК - окислы, СЛ - силикаты, КС - кислородные соли; алмазоносные площади: 1 - бассейн р. Макаубас, 2 - Шапада-Диамантина, 3 - Гарсас-Диамантина

К похожим результатам привело и исследование микроминеральных примесей в бразильских карбонадо [37]. В этом случае доля простых веществ, галидов и сульфидов также оказалась резко повышенной (рис. 13б).

Таким образом, получается, что в континууме микроминералов за счет кислородных соединений существенно возрастает сначала доля халькогенных соединений, а затем и простых веществ. Этот тренд явно противоречит упомянутой выше генеральной тенденции кристаллохимического развития подцарства минералов нормального размера, свидетельствуя, вероятно, о реализации в природе размерного фактора минерального видообразования. Последнее может иметь громадное значение для геотехнологов, поскольку дает возможность лучше прогнозировать свойства минерального сырья в отношении ценных микроэлементов.

Сырье или не сырье?

Обычно считается, что задача технологов состоит лишь в определении более или менее рентабельного способа переработки минерального сырья. Однако на практике бывают случаи, когда сначала следует убедиться, что мы вообще имеем дело именно с таковым сырьем, а не с его имитацией. И это тоже задача не химическая, а минералогическая.

Примером подобной коллизии может служить история с оценкой перспектив извлечения ванадия из антраксолита — природного твердобитумного вещества. Вывод о потенциально промышленной ванадиеносности антраксолита был сделан на основании факта обнаружения в нем многочисленных включений так называемой «ванадиевой фазы» и данных химического анализа о повышенном валовом содержании ванадия [38]. Однако проведенные впоследствии исследования показали [39], что в действительности в антраксолите имеют место не минеральные включения, а всего лишь нечетко ограниченные выделения металлуглеродистых композитов с атомным содержанием углерода от 85 до 95%, образовавшихся в ходе прогрессирующего разложения первичных органических соединений (рис. 14). Понятно, что в обозримой временной перспективе природные битумы с такого рода «фазами» вряд ли смогут стать действительным источником ванадия.

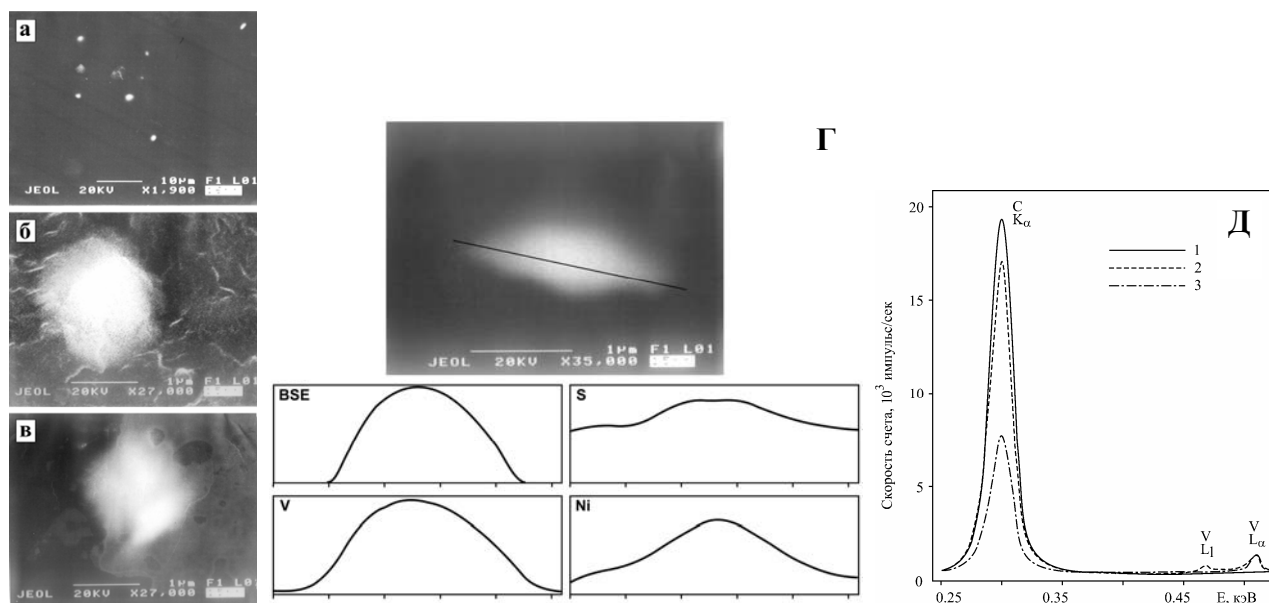


Рис. 14. Выделения «ванадиевой фазы» в новоземельском антраксолите (а–в), оценка по рентгеновскому спектру содержания в ней продуктивных элементов (г) и определение в ней содержания углерода по волновому рентгеновскому спектру (д: 1 – антраксолит, 2, 3 – ванадиевая фаза с различным содержанием «сульфидных» и «алюмосиликатных» примесей)

Актуальной проблемой для современных геотехнологов и экологов являются непрерывно накапливающиеся горные отходы - естественный источник химических токсикантов, масштаб и механизмы кругооборота которых в биосфере, а также формы их вторичной минеральной консервации изучены очень слабо. Не менее важно и то, что отходы горного производства, в среде которых практически непрерывно осуществляется перегруппировка вещества с образованием и концентрированием аутигенных минералов вплоть до образования геотехногенных рудных месторождений, могут оказаться серьезным источником возобновляемых минеральных ресурсов для будущих поколений. Изучать и оценивать такие объекты также лучше минералогическими методами. Примером может послужить наш опыт изучения многолетних отвалов, оставшихся после отработки на Урале Исовских золотоплатиновых россыпей.

Проведенные исследования показали, что первоначально сыпучие и рыхлые отходы довольно быстро подвергаются вторичной литификации с существенным модифицированием первичных и образованием множества новых рудных минералов, накапливающихся в своеобразных рудных конгломерациях [40]. Среди модифицированных и новообразованных минералов выявлено множество самородно-металлических,

халькогенных и оксидных фаз (рис. 15, 16), в том числе растворы Ni и Сг в железе, отвечающие *тениту*; Ir-Os смеси с примесью до 15-17 ат. % Pt и Fe; железо-платиновые растворы с содержанием тугоплавких платиноидов, как правило, до 10 ат. % и частицы хорошо окристаллизованных незначительной примесью Pd, по составу тяготеющие в *изоферроплатине*; многочисленные Au-Ag смесей (до электрума) с варьирующей примесью Hg от 5 (ртутьсодержащее золото) до 20 ат. %; частицы Hg-содержащего медистого золота, большей частью близкого по составу к *тетрааурикуприду* (AuCu); золото-свинцовые фазы, включая *хунчунит* [41, 42].

Важный резерв для грядущих поколений

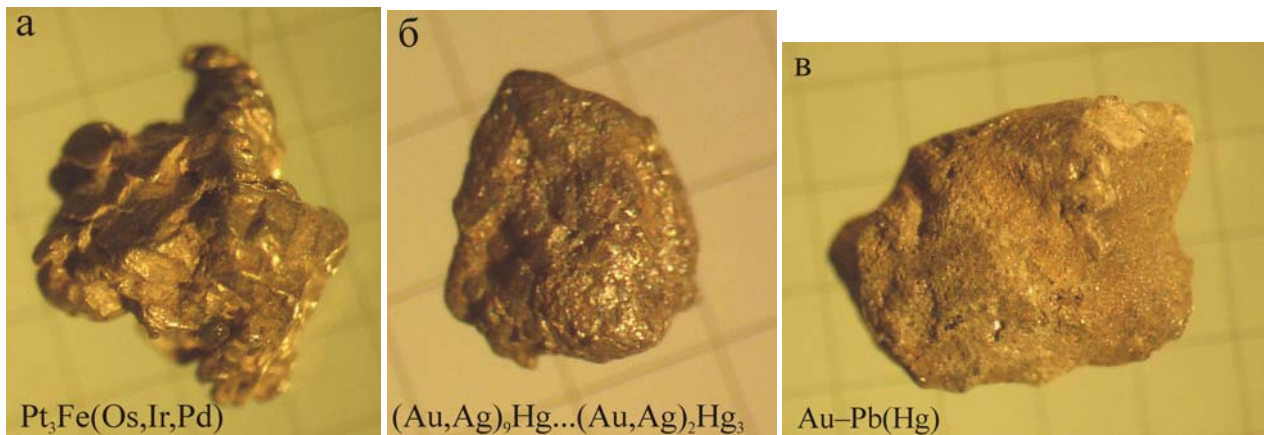


Рис. 15. Примеры частиц новообразованных в техногенных отходах минералов (а-в)

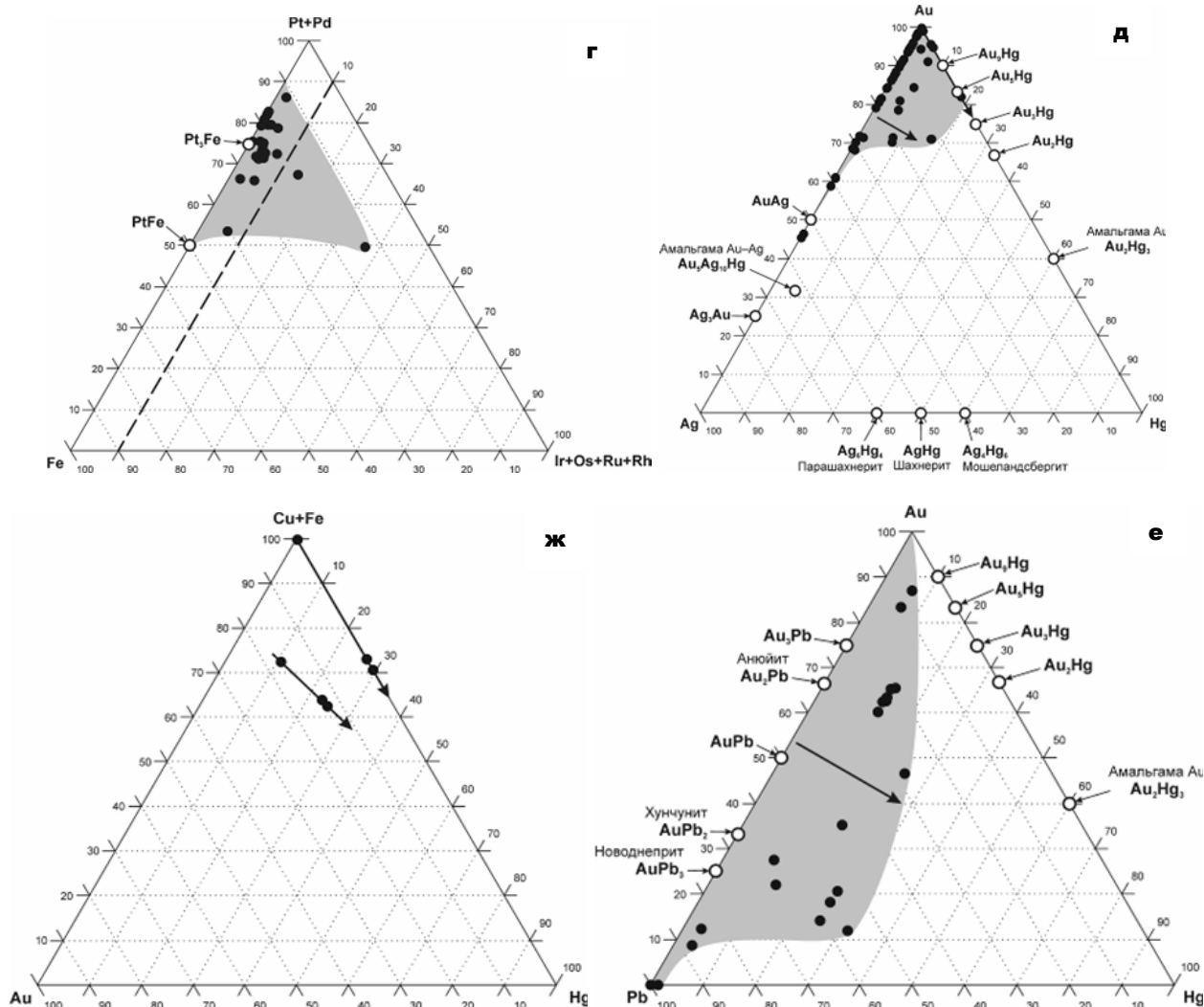


Рис. 16. Характеристика химизма некоторых аутигенных самороднометаллических (г-е) и сульфидных (ж) систем. Пунктирной линией отмечен предел обогащения тугоплавкими платиноидами природных железо-платиновых соединений

Таким образом, можно констатировать, что в результате минералого-геохимических преобразований отвальной толщи действительно возникла вторичная сульфидно-благороднометалльная минерализация - признак формирующегося практически на наших глазах геотехногенного рудного месторождения.

Заключение

Рассмотренные нами примеры призваны доказать, что при всей важности химической и геохимической информации приоритетными для геотехнологов являются все же данные минералогических исследований. Именно поэтому неустанное повышение в условиях перманентной научно-технической революции уровня минералогической подготовки соответствующих кадров и есть важнейшее условие для успешной оценки и переработки минерального сырья. Другими словами: современная оценка минеральных месторождений - это минералогия плюс прогрессивная технологизация и приборизация всех наук о Земле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чантурия В.А. Инновационные процессы в технологиях переработки труднообогатимого минерального сырья // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50. № 6. С. 558–568.
2. Григорьев Д.П. Основные проблемы минералогии. Сообщение 1-е: определение понятия минерал // Записки ВМО. 1943. Ч. 72. № 2. С. 108–115.
3. Григорьев Д.П. Что такое минерал? // Записки ВМО. 1961. Ч. 90. Вып. 4. С. 431–437.
4. Григорьев Д.П. Онтогенез минералов. Львов: Изд-во Львовского ун-та, 1961.
5. Григорьев Д. П., Жабин А. Г. Онтогенез минералов. Индивиды. М.: Изд-во Наука, 1975. 339 с.
6. Григорьев Д.П. Естественные объекты минералогии: минеральные индивиды и минеральные виды // Записки ВМО. 1975. Ч. 104. № 4. С. 512–514.
7. Григорьев Д.П. Рассуждения о минералогии. Сыктывкар: Геопринт, 1998. 88 с.
8. Юшкин Н.П. Теория и методы минералогии. Л.: Наука, 1977. 291 с.
9. Силаев В.И. Еще раз об ученых монахах, минералогии и пользе многообразия научных школ // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2-1. № 8. С. 37–42.
10. Жабин А. Г. Онтогенез минералов. Агрегаты. М.: Изд-во Наука, 1979. 276 с.
11. Кокин А.В., Силаев В.И., Киселева Д.В., Филиппов В.Н. Новый потенциально промышленный сульфидно-индиево-марганцевый тип оруденения // Доклады РАН. 2010. Т. 430. № 3. С. 372–377.
12. Катеринчук В.Н., Ковалюк М.З., Литвин О.С. Поверхностные нанообразования при окислении слоистых кристаллов SnS_2 // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2007. № 3. С. 41–42.
13. Григорьев Д.П. О законах анатомии кристаллов // Кристаллография. 1971. Т. 16. № 6. С. 1226–1229.
14. Признаки неоднородности минералообразующей среды в свойствах кристаллов кальцита / Петровский В.А., Силаев В.И., Бобров В.А. и др. // Минералы и минеральные комплексы европейского Северо-Востока СССР. Сыктывкар: Изд-во Коми ВАН СССР, 1983. С. 71–78.
15. Силаев В.И., Хазов А.Ф. Изотопное диспропорционирование карбонатного углерода в процессах гипергенно-экзогенной перегруппировки вещества земной коры. Сыктывкар: Геопринт, 2003. 41 с.
16. Силаев В.И., Филиппов В.Н., Сокерин М.Ю. Твердые растворы вудхаузит-сванбергит-флоренсит во вторичных кварцитах // Записки ВМО. 2001. № 1. С. 99–110.
17. Булатов Ф.М. Кристаллохимическая информативность мёссбауэровских исследований промышленного мусковита // Разведка и охрана недр. 2009. № 8. С. 22–26.
18. Распределение спектроскопически-активных центров в флюорите как отражение эволюции процессов рудообразования / Лунашко Т.Н., Шурига Т.Н., Силаев В.И. и др. // Минералогический журнал. 2007. Т. 29. № 3. С. 82–92.
19. Лютоев В.П., Силаев В.И. Типоморфизм парамагнитных центров в структуре кварца из уральского редкометалльного месторождения // Минералогический журнал. 2008. Т. 30. № 2. С. 64–74.
20. Иоффе Л. И. Об устойчивости природных магшнелиальных кальцитов // Доклады АН СССР. 1872. Т. 203. № 5. С. 1167–1169.
21. Davidson P.M. Ternary iron, magnesium, calcium carbonates: A thermodynamic model for dolomite as an ordered derivative of calcite-structure solutions // Amer. Mineral. 1994. V. 79. P. 332–339.
22. Григорьев Д.П. Минерал как организм // Проблемы генетической информации в минералогии: Материалы к Всесоюзному минералогическому семинару. Сыктывкар, 1978. С. 6–7.
23. Григорьев Д.П., Буканов В.В., Маркова Г.А. Синхронизация процессов кристаллизации по зональности кристаллов // Доклады АН СССР. 1969. Т. 185. № 5.
24. К проблеме атипичных и нетрадиционных минералов-спутников алмаза (на примере Урала) / Силаев В.И., Чайковский И.И., Харитонов Т.В. и др. Сыктывкар: Геопринт, 2009. 65 с.
25. Булах А.Г. Микроминералы: границы, объекты, явления // Записки ВМО. 1998. № 5. С. 124–134.
26. Силаев В.И., Филиппов В.Н. Микроминералы и микроминеральные парагенезисы в зонах вторичного гипергенно-инфильтрационного обогащения как новая филогенетическая проблема // Микро- и нанодисперсные структуры минерального вещества. Сыктывкар: Геопринт, 1999. С. 82–94.
27. Асхабов А.М. Особенности современного этапа вторжения в «мир обойденных величин» // Минералогическая интервенция в микро- и наномир: Материалы Международного минералогического семинара. Сыктывкар: Геопринт, 2009. С. 9–10.

28. Конеев Р.И., Турсебеков А.Х., Кушмурадов О.К. Микроминералогия: от макроминералогии до наноминералогии // Минералогическое общество и минералогическая наука на пороге XXI века. СПб., 1999. С. 21–22.
29. Фактор размерности индивидов в минералогии / Силаев В.И., Лютоев В.П., Чайковский И.И. и др. // Минералогическая интервенция в микро- и наномир. Сыктывкар: Геопринт, 2009. С.67–72.
30. Петровский В.А., Силаев В.И., Мартинс М., Карфункель Й., Сухарев А.Е. Нанометровые минеральные включения в алмазной фазе карбонадо // Доклады академии наук. 2008. Т. 421, № 5. С. 658–661.
31. Алабандин с нанометровыми полисульфидными включениями как новый тип промышленного марганцевого оруденения / Силаев В.И., Кокин А.В., Пискунова Н.Н. и др. // Геоматериалы для высоких технологий, алмазы, благородные металлы, самоцветы Тимано-Североуральского региона: Материалы Всероссийского минералогического семинара с международным участием. Сыктывкар: Геопринт, 2010. С. 110–114.
32. Силаев В.И., Кокин А.В., Пискунова Н. Н., Филиппов В.Н. Рудное месторождение, открытое под микроскопом // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2010. № 9/1. С. 14–16
33. Фазовый состав и структурное состояние природных железоокисных пигментов / Лютоев В.П., Кочергин А.В., Лысюк А.Ю. и др. // Доклады АН. 2009. Т. 425. № 3. С. 372–377.
34. Лютоев В. П., Лысюк А. Ю., Силаев В.И. Микро-нанометрические тайны природных пигментов // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2010. № 9/1. С. 18–20.
35. Юшкин Н.П., Силаев В.И., Плоскова С.И. Минералогический облик Урала (анализ минеральных кадастров) // К 70-летию академика В.А. Коротеева. Екатеринбург: УрО РАН, 2007.
36. Силаев В.И. Кобальтсодержащие квалузиты Полярного Урала. К проблеме минерально-геохимической дифференциации марганца в земной коре. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 132
37. Силаев В.И., Петровский В.А., Сухарев А.Е., Мартинс М. Новый вклад в минералогию карбонадо: резюме итогов исследований // Геология алмаза – настоящее и будущее. Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 2005. С. 695–704.
38. Безруков В.М., Винокуров И.Ю., Суханов А.А. Антраксолиты Новой земли как ванадийсодержащее сырье // Углерод. Минералогия, геохимия, минералогия: Материалы Международной конференции. Сыктывкар: Геолпринт, 2003. С. 126–127.
39. Силаев В.И., Ильченко В.О., Лютоев В.П. и др. Аутигенная псевдоминерализация в антраксолите // Проблемы геологии и минералогии. Сыктывкар: Геопринт, 2006. С. 283–314.
40. Хазов А.Ф., Наумов В.А. Горные отвалы как среда образования техногенных // рудных месторождений (на примере исовских золотоплатиновых россыпей) // Минералогическая интервенция в микро- и наномир: Материалы Международного минералогического семинара. Сыктывкар: Геопринт, 2009. С. 506–507.
41. Хазов А.Ф. Модифицированные и аутигенные минералы в техногенных комплексах (на примере отвалов Исовского прииска) // Геоматериалы для высоких технологий, алмазы, благородные металлы, самоцветы Тимано-Североуральского региона: Материалы Всероссийского минералогического семинара с международным участием. Сыктывкар: Геопринт, 2010. С. 188–193.
42. Хазов А.Ф. Отходы горного производства — важный резерв минеральных ресурсов для будущих поколений // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2010. № 9/2. С. 18–20.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ И МЕТОДЫ К ПРОБЛЕМЕ РАСКРЫТИЯ МИНЕРАЛОВ

Котова О.Б.

Учреждение Российской академии наук Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

Современная технологическая минералогия объединяет все виды минералогических исследований, связанных с изучением зависимости технологических свойств минералов от их состава и строения, поведения минералов в технологических процессах, направленного изменения свойств минералов с целью их разделения, обогащения и создания новых материалов. **Основной целью** является создание научных и методических предпосылок расширения и укрепление отечественной минерально-сырьевой базы, рационального освоения минерального сырья, эффективного извлечения и комплексного использования всех минералов.

Сегодня к ресурсам земных недр причисляются не только разрабатываемые месторождения, но и объекты забалансового минерального сырья, отвалы вскрышных пород, шахтные терриконы, отходы переработки сырья (хвостохранилища и сливы промывочных обогатительных установок, отвалы металлургических шлаков), захоронения отходов и т.д. В этих условиях особую значимость приобретают новые методы и подходы переработки минерального сырья с использованием современных концепций технологической минералогии применительно к процессам вскрытия минеральных компонентов. В переработку вовлекаются упорные ультратонкодисперсные разновидности руд. Для модернизации и оптимизации схемы обогатимости минерального сырья на всех этапах (минеральное сырье → методы исследования → интерпретация и систематизация информации о составе и строении руды → решаемые задачи: создание технологий обогащения и передела, получение концентратов соответствующего качества и товарных продуктов) используются результаты фундаментальных и прикладных исследований целого ряда междисциплинарных научных направлений [1].