

УДК 548.2+553.22

К ОНТОГЕНИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ МЕТАСОМАТОЗА**В.А. Попов***Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс; popov@mineralogy.ru***ONTOGENETIC APPROACH TO THE METASOMATISM THEORY****V.A. Popov***Institute of Mineralogy UB RAS, Miass; popov@mineralogy.ru*

Метасоматоз – это явление замещения одних минералов другими при одновременном (сопряжённом) растворении ранних минералов и кристаллизации на их месте поздних минералов. Существующая физико-химическая теория метасоматоза, построенная на принципе («законе») дифференциальной подвижности компонентов, не соответствует природным явлениям. Минеральные тела развиваются в пространстве-времени в изменяющихся условиях, и для моделирования их генезиса требуется онтогенический подход. Метаморфические породы земной коры и мантии, судя по морфологическим признакам, образовались преимущественно метасоматическим путём. Механизмы локального и регионального метасоматоза принципиально ничем не отличаются и определяются развитием метакристаллов в твёрдых телах.

Илл. 9. Библ. 9.

Ключевые слова: онтогенез минералов, метасоматоз, метакристалл, псевдоморфоза.

Metasomatism is a phenomenon of substitution of some minerals by other minerals under simultaneous dissolution of early minerals and crystallization of late minerals. The current physico-chemical theory of metasomatism, which is based on a principle (a law) of differential mobility of components, does not correspond to the natural phenomena. The mineral bodies evolve in space and time under variable conditions and ontogenic approach is required for the modeling their genesis. Judging from morphological features, the metamorphic rocks of the Earth's crust and mantle were mostly formed metasomatically. Mechanisms of local and regional metasomatism have no fundamental differences and are caused by formation of metacrystals in solid bodies.

Figures 9. References 9.

Key words: ontogeny of minerals, metasomatism, metacrystal, pseudomorph.**Введение**

При изучении минеральных тел исследователи давно заметили признаки их изменений в пространстве-времени. Изменение минерального состава в агрегате возле трещины названо замещением. С течением времени выяснилось, что замещение в минеральном теле может происходить двумя механизмами: 1 – «одновременный» (сопряжённый) рост поздних минералов с растворением в контакте ранних минералов (*метасоматоз*);

2 – предварительное избирательное растворение ранних минералов с образованием пор и полостей и последующим заполнением пор поздними минералами (это не метасоматоз, а выполнение пустот). Морфологические признаки разных механизмов специально не рассматривались. Второй механизм сложно доказывать, поскольку пористость в минеральных агрегатах может быть связана не только с растворением части минералов, но быть остаточной от предшествующей кристаллизации или деформаций твёрдых тел.



Рис. 1. Плёнки гётита (коричневые) на поверхности и по трещинам метакристаллов пирита в листвените Берёзовского месторождения (Средний Урал).

Fig. 1. Goethite films (brown) on the surface and along the fractures of pyrite metacrystals in listvenite of Berezovsky deposit (Central Urals).

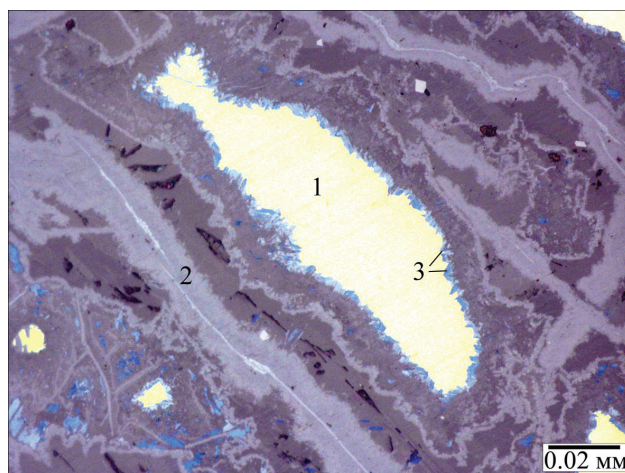


Рис. 2. Ковеллин-гётитовая псевдоморфоза по халькопириту (Меднорудянское месторождение, Средний Урал).

1 – реликты халькопирита, 2 – гётит, 3 – ковеллин. Аншлиф, отражённый свет.

Fig. 2. Covellite-goethite pseudomorph after chalcopyrite from Mednorudyanskoe deposit, Central Urals.

1 – relics of chalcopyrite, 2 – goethite, 3 – covellite. Polished section, reflected light.

К настоящему времени в экспериментах не получено наглядного подтверждения явления метасоматоза, т.е. образования метакристаллов. Замещение по второму механизму (заполнению пустот) – с предварительным растворением без выполнения требования «объём за объём» – широко представлено в публикациях по экспериментальной минералогии и петрологии (Поспелов, 1973; Зарайский, 1998; Гликин, 2004; и др.), однако продукты этих экспериментов не относятся к явлению метасоматоза.

В геологических телах в общем случае происходит совмещение в одном пространстве разновременных тел замещения, возникших разными механизмами. Между тем, различать названные тела замещения (где – метакристаллы, а где – выполнение полостей и пор) полезно как на практике при картировании тел пород и руд, так и для совершенствования теории метасоматоза.

От наблюдений к теоретическим обобщениям

Явление образования минеральных псевдоморфоз в середине XIX века было названо К.Ф. Науманом метасоматозом (*мета* – после, *сома* – тело) (Коржинский, 1955; Поспелов, 1973; и др.). Если следовать этим представлениям, то для построения общей теории метасоматоза не-

обходимо обобщение обширной информации по онтогенезу разнообразных по анатомическому устройству метакристаллов, псевдоморфоз и метасоматических формаций. В геологических работах самым распространённым примером были псевдоморфозы лимонита по пириту, халькопириту, пирротину. При увеличении под микроскопом неполной псевдоморфозы гётита по пириту (или другим минералам) можно увидеть, что зародыши гётита росли внутрь индивидов пирита от поверхности кристаллов или трещин (рис. 1). Множество мелких метакристаллов гётита или других минералов дорастают друг до друга и образуют общий фронт замещения (рис. 2). Аналогичная картина развития метакристаллов наблюдается и в минеральных агрегатах без образования псевдоморфоз, например, сидерита по агрегату доломита в Бакальском железорудном месторождении (рис. 3) или метакристаллов магнезита в доломите Саткинского месторождения магнезита. Если метакристаллы развиваются в полиминеральном агрегате избирательно по каким-либо минералам, то по ним образуются псевдоморфозы. Если метакристаллы развиваются без видимой приуроченности к отдельным минералам первичного агрегата, то возникает новый агрегат в виде рассеянной вкрапленности метакристаллов (см. рис. 1). Фактически метасома-



Рис. 3. Отдельные метакристаллы сидерита (коричневые) и их агрегаты вдоль трещин в тонкозернистом агрегате доломита Бакальского месторождения (Южный Урал).

Fig. 3. Individual siderite metacrystals (brown) and their aggregates along the fractures in fine-grained aggregate of dolomite from Bakal deposit (South Urals).

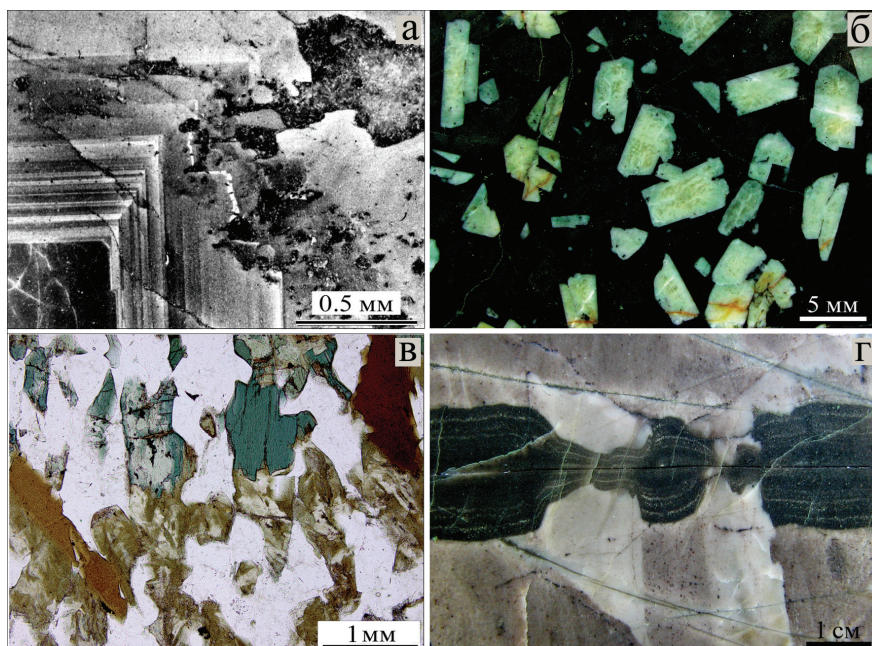


Рис. 4. Разноуровневая зональность в метакристаллах (а), псевдоморфозах (б, в) и геологических телах (г).

а – фрагмент метакристалла пирита (*протравлено*) из березита Берёзовского месторождения; б – тонкозернистые хлорит-пренитовые псевдоморфозы по фенокристаллам плагиоклаза в порфирите (Южный Урал, полированный образец); в – хлоритовые псевдоморфозы по амфиболу (*нижняя половина снимка*) в биотит-амфибол-плагиоклазовом амфиболите (Кусинское месторождение, шлиф, без анализатора); г – флюорит-мусковит-сидерофиллитовый метасоматит около трещины в дацитовом гиалоигнимбрите (Баджалский хребет, полированный образец).

Fig. 4. Multilevel zoning in metacrystals, pseudomorphs and geological bodies.

а – fragment of pyrite metacrystal in beresites from Berezovsky deposit, etched surface; б – fine-grained chlorite-prehnite pseudomorphs after plagioclase phenocrysts in porphyritic rock (South Urals, polished sample); в – chlorite pseudomorphs after amphibole (*lower half of image*) in the biotite-amphibole-plagioclase amphibolite (Kusa deposit, thin section, no analyzer); г – fluorite-muscovite-siderophyllite metasomatic rock near the fractures in dacitic hyaloignimbrite (Badzhal ridge, polished sample).

тоз имеет единственный механизм развития – рост метакристаллов в твёрдой (кристаллической) среде, в том числе – при образовании псевдоморфоз и при распаде твёрдых растворов.

Для формулировки постулатов к созданию физико-химической теории метасоматоза важны морфологические наблюдения над зональностью и разнообразной неоднородностью в метасоматитах на

уровне метакристаллов, псевдоморфоз и геологических тел. В анатомической картине метакристалла (самом мелком элементе сложного метасоматического тела) наблюдаются явления смены формы, состава, деформаций, частичного растворения и регенерации (рис. 4а). Отдельные метакристаллы, дорастая друг до друга, образуют общий фронт замещения с формированием псевдоморфоз при из-

бирательном замещении (см. рис. 4б,в) или зон в метасоматических телах (см. рис. 4г). Анатомия метасоматических тел даёт картину их формирования в изменяющихся в пространстве и во времени условиях. Эти наблюдения не позволяют рассматривать зоны метасоматитов только как синхронные образования одной физико-химической системы, объясняющиеся «дифференциальной подвижностью компонентов». Так, зональный и секториальный метакристалл может пространственно принадлежать одной или нескольким зонам более сложного зонального минерального тела («метасоматической колонке»), и из этих соотношений никак не вытекает предположение о дифференциальной подвижности каких-либо виртуальных компонентов.

В геологической литературе существует множество обзоров и отдельных статей, посвящённых псевдоморфозам и метакристаллам, их анатомическому устройству (Рамдор, 1962; Жабин, 1966; Попов, 2011; и др.). Очень редко встречаются онтогенические описания сложных и крупных тел замещения, где совмещены (телескопированы) продукты разных по механизмам явлений минералообразования (метасоматоз и заполнение пор и полостей трещин). В ранних онтогенических разработках встречается увлечение представлениями о «конвергентности» морфологических признаков явлений (Жабин, 1966). Эти представления фактически затормозили развитие генетической минералогии. Так, многие исследователи используют понятие «относительного идиоморфизма» при описании структур минеральных агрегатов. Констатируется, что такой-то минерал имеет большую степень идиоморфизма (идиоморфнее) по сравнению с другим минералом. В неявном виде используется представление о генетических типах поверхностей на минеральных индивидах. Но ростовых поверхностей на минеральных индивидах всего три (Попов, 2011): идиоморфная, ксеноморфная и индукционная (компромиссная). Эти термины не предполагают их использования в сравнительной степени (идиоморфнее, ксеноморфнее, индукционнее). В петрологических работах не используется понятие самого распространённого в магматических породах типа поверхности на минеральных индивидах – индукционной поверхности, возникающей при сокристаллизации – совместном и одновременном росте минералов. Индукционная поверхность морфологически выглядит очень разнообразно (рис. 5), и диагностика её требует специального обучения минералогов и петрографов. Онтогенический анализ структур минеральных агрегатов всё ещё не

введён в постоянную практику минералогии и петрологии.

Об отсутствии конвергентности в природе говорил на семинарах и совещаниях в своих лекциях Д.П. Григорьев. Представления о конвергентности создаются в наших построениях при недостаточности информации о предмете исследования. Недостаточность морфологической информации об объекте исследования ведёт к неопределённости интерпретации его генезиса и восприятию природы как проявлению парадоксов (Поспелов, 1973). Обнаружение логических парадоксов при создании теории метасоматоза означает наличие неудачно постулированных начал к построению. Например, неясно, в каких рамках можно применять термодинамику при рассмотрении в общем случае сложнейших по онтогенезу тел замещения. Неясно, как в них выделять физико-химические системы: можно ли относить к одной термодинамической системе разновременные соприкасающиеся минералы? Можно ли конкретный кристалл относить к фазе физико-химической системы, когда все элементы его анатомии физически и химически различны (в соответствии с законами ростовой анатомии)? Сейчас уже ясно, что равновесная термодинамика неприменима к ростовым явлениям. Исследователи пытались «обойти» неравновесность в кристаллизационных системах с помощью представлений о мозаичном равновесии. Но произошёл уход (временный?) от сущности минерального мира, в котором явление кристаллизации (как диссимметризации пространства) создаёт все качества тел.

Один из введённых термодинамических постулатов по мысли его создателей должен иметь особое значение для петрологии и геохимии. Это – принцип дифференциальной подвижности компонентов для объяснения возникновения зональности в метасоматитах (Коржинский, 1955). Этот принцип в статус закона счёл возможным перевести В.А. Жариков (1998, с. 29): «...при любом геохимическом процессе компоненты, в нём участвующие, ведут себя качественно различным образом: – для одних устанавливается *инертное поведение*, и независимыми для них являются *экстенсивные* параметры (массы компонентов, содержание или количество их в системе); – для других компонентов устанавливается *вполне подвижное поведение*, и независимыми для них являются *интенсивные* параметры (химические потенциалы компонентов, их активности, концентрации или другие)». В этой формулировке не все термины имеют необходимые

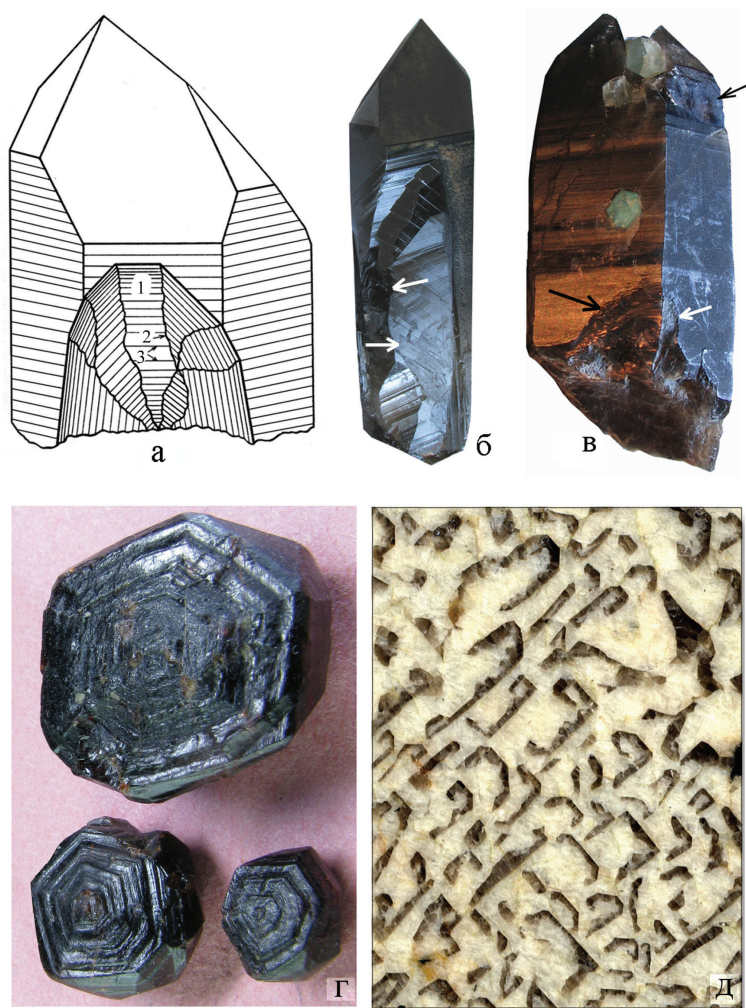


Рис. 5. Индукционные поверхности на кристаллах минералов.

а – схема классической индукционной поверхности, состоящей из псевдограней (1), псевдорёбер (2) и штриховки (3); б – разная скульптура на разноориентированных псевдогранях кварца; в – неклассическая индукционная поверхность на кварце при одновременном росте с «блочными» индивидами других минералов; г – индукционная и идиоморфная (снизу) поверхность на гранате; д – вид индукционных границ между кварцем и калишпатом в плоском сечении. Стелками на рис. б–в указаны участки неклассических поверхностей.

Fig. 5. Compromise surfaces of crystals.

а – scheme of classical compromise surface consisted of pseudofaces (1), pseudoedges (2) and hatch (3); б – different sculpture on variously oriented pseudoedges of quartz; в – non-classical compromise surface on quartz at simultaneous growth of «block» individuals of other minerals; г – compromise and idiomorphic (from the bottom) surface on garnet; д – compromise surface between quartz and K-feldspar in flat section. Arrows in fig. б–в indicate areas of nonclassical surfaces.

определения. Так, неясно, чем геохимический процесс отличается от физико-химического, что такое «компоненты, участвующие в процессе», какой процесс рассматривается – или растворение-рост минералов, или поведение виртуальных компонентов вне зависимости от твёрдотельной части систем? Для чего использован термин «вполне подвижное поведение» и почему нет термина «не вполне...»? Почему в работах используются термины «более инертный компонент» или «более подвижный компонент» – что, они могут использовать «большую или меньшую экстенсивность»? Параметр может быть либо экстенсивным, либо интенсивным. Нет физического смысла в понимании инертного и подвижного поведения компонентов в любой геохимической системе, как нет и алгоритма сравнения их поведения (инертнее, подвижнее).

Фактически физико-химическая теория метасоматоза создана в рамках упрощённых химических представлений о компонентах, якобы имеющих имманентное свойство растворимости.

Метасоматиты являются минеральными телами, и виртуальный конкретный компонент может войти в одной системе в несколько разных синхронных минералов, имеющих разную растворимость в данной среде (например, ZnS и ZnAl_2O_4 или Al_2O_3 и $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$). Компоненты надо рассматривать как следствие растворения минералов, но компоненты не имеют собственной растворимости. Любой химический элемент может находиться в разных типах компонентов в реальных средах. Например, при растворении в воде галита NaCl (при 20°C , 1 атм) образуется 8 % ионов Na^+ и Cl^- , а 92 % – это нераспавшиеся молекулы NaCl , которые и обуславливают солёность раствора. Данных об ионном или молекулярном механизме роста галита нет. Отсюда неясно, по концентрациям каких компонентов надо рассчитывать пересыщение в водном растворе для роста галита. В природных сложных по составу средах (магмах, растворах, газах) типы компонентов обычно неизвестны, как неизвестны и механизмы роста кристаллов минералов. Испол-

зование при моделировании минералообразования представлений о виртуальных компонентах в виде элементов, оксидов, минералов даёт наглядные химические схемы процессов, но недостаточно для количественных расчётов реакций растворения-роста минералов.

Минералы (индивиды) в общем случае не соответствуют фазам физико-химических систем. По определению, фазой называется однородная субстанция, в то время как элементы анатомии минерального индивида физически и химически различны соответственно законам ростовой анатомии (Григорьев, 1971). В литературе можно найти описание минеральных индивидов, в которых установлено несколько минеральных видов по современным классификациям (Попов, 2011; и др.). Следовательно, использование термодинамического правила фаз при построении моделей минералообразования встречает существенные затруднения.

Морфологические признаки механизма метасоматоза

Все минеральные тела – малые и большие, простые и сложные – имеют свой онтогенез (историю «жизни», существования). Минералы зарождаются (появляются), живут (изменяются) и исчезают (плавятся, растворяются, сублимируют, замещаются другими минералами). Известна кристаллизация минералов в газовой, жидкой и твёрдой среде. Если в газовой и жидкой среде кристаллу при росте ничто не мешает «захватывать» пространство, то в твёрдой среде возникает необходимость освобождать пространство от твёрдых тел (минералов) для роста новых минералов. Освобождение пространства (растворение старых минералов – протокристаллов) по относительно времени может происходить различно: 1 – до роста новых минералов; 2 – одновременно с их кристаллизацией. В первом случае новые минералы заполняют пространство той формы, которая получилась в твёрдом теле ранее, например, вследствие растворения или приоткрывания полостей трещин в результате деформаций. Поверхность новообразованных индивидов при заполнении пространства камеры является отпечаточной – ксеноморфной (рис. 6а). Во втором случае форму новообразований определяют растущие в твёрдой среде индивиды, они идиоморфны, и их называют метакристаллами (см. рис. 6б). Если метакристаллы развиваются избирательно по части

минералов агрегата, то возникают псевдоморфозы. Псевдоморфозы могут возникать не только по минеральным индивидам, но и по телам минеральных агрегатов.

Теорию метасоматоза разрабатывали многие исследователи (Коржинский, 1955; Поспелов, 1973; Гликин, 2004; и др.), развивавшие разные концепции на несколько различных исходных постулатах. Концепция Д.С. Коржинского построена на химическом и термодинамическом восприятии мира минералов и наиболее широко используется петрологами и геохимиками в России. Критическое рассмотрение этой концепции изложено выше и ранее (Попов, 2011). Г.Л. Поспеловым метасоматоз как явление понимался очень широко, в том числе и кристаллизация в порах тел горных пород, когда собственно метасомы (после тела) нет. В последние три десятилетия А.Э. Гликиным (2004) создана концепция полиминерально-метасоматического кристаллогенеза. В этой концепции частично используются представления Г.Л. Поспелова о парадоксальности едва ли не всех сторон явления метасоматоза. Вероятно, парадоксальность заложена в самих концепциях явления метасоматоза, т.е. парадоксально не явление, а наше мышление. А.Э. Гликин (2004, с. 12) привёл следующее важное определение: «Под метасоматическим замещением понимается процесс, состоящий из *взаимосвязанных* и *сопряжённых* во времени и пространстве стадий растворения протокристалла и осаждения новообразования другого состава». В этой взаимосвязи, однако, не отмечено *следование* – одно за другим (причина и следствие).

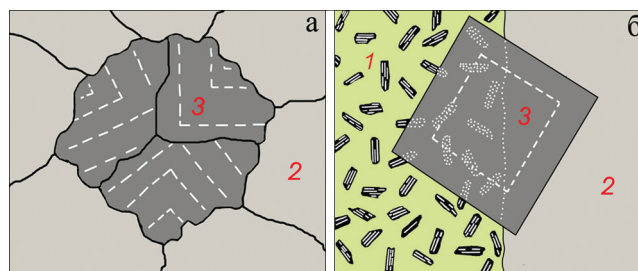


Рис. 6. Морфологические типы поверхностей, возникающих на минералах при заполнении пор (а, ксеноморфная) и метасоматозе (б, идиоморфная) – схема в плоском сечении.

1 – березит, 2 – кварц, 3 – пирит. Плоское сечение минеральных агрегатов.

Fig. 6. Morphological types of surfaces formed during interstitial growths (a, xenomorphic) and metasomatoses (b, euhedral).

1 – beresite, 2 – quartz, 3 – pyrite. Flat section of mineral aggregates.

Это следование можно вывести только из морфологических признаков, имеющих на телах (кристаллах), и невозможно – из рассмотрения поведения компонентов. В монографии А.Э. Гликина (2004) есть глава, посвящённая кристалломорфологии, но фактически форма кристаллов не задействована для определения последовательности событий при метасоматозе. Более того, приведённые в литературе эксперименты по «метасоматозу» велись в кристаллизаторах со свободным доступом минералов к открытому пространству с раствором. Следовательно, минералы имели возможность отталкивать друг друга и повышенного плёночного давления между ними не возникало. Вторичный минерал, в случае наличия пересыщения для него, имел возможность кристаллизоваться в свободном пространстве, не воздействуя на предшественника «расклинивающим» (плёночным) давлением. В экспериментах акты растворения протокристаллов идут по времени впереди актов отложения новых кристаллов, а это уже относится к росту в свободном от твёрдых тел пространстве! Это критическое замечание относится и к экспериментам по «метасоматозу» при высоких температурах и давлениях в автоклавах (Зарайский, 1998).

Принципиальная разница между свободно выросшими кристаллами и метакристаллами (выросшими в твёрдой среде) – это различие анатомической картины кристаллов и агрегатов (Попов, 2011). По наблюдениям, метакристаллы всегда идиоморфны по отношению к замещаемому минералу, и в анатомической картине метакристаллов всегда есть какая-либо «тень» предшествующего твёрдого тела как элемент анатомии нового тела (рис. 7). Эти

наблюдения позволяют сформулировать основополагающие генетические вопросы.

Итак, зададимся вопросом: *почему протокристалл растворяется только по контакту с метакристаллом, а не в любом другом месте около трещины с функционирующим (движущимся) раствором?* Возможный ответ: чтобы протокристалл растворялся, необходимо недосыщение относительно него в плёночном растворе. По наблюдениям, плёночный раствор в трещинной системе быстро приходит в состояние насыщения по отношению к минералам, в которых проходит трещина (рис. 8). Дальнейшее растворение минералов прекращается, если нет изменения параметров движущихся трещинных растворов. При насыщенном состоянии плёночного раствора в трещинной системе может создаться местное недосыщение с помощью утонения плёнки за счёт роста метакристалла (рис. 9). Утонение плёнки ведёт к увеличению «расклинивающего» давления раствора в месте прирастания метакристалла и к увеличению растворимости протокристалла, т.е. к состоянию недосыщения относительно него только в месте соприкосновения с метакристаллом.

Таким образом, для растворения протокристалла в такой системе необходим опережающий акт роста (подрастания, увеличения объёма) метакристалла. Естественно, в системе в контактовой плёнке должно возникнуть пересыщение по отношению к метакристаллу за счёт взаимодействий функционирующего раствора с минералами системы. Поскольку увеличение давления в плёночном растворе увеличивает растворимость обоих минералов (протокристалла и метакристалла), то пере-

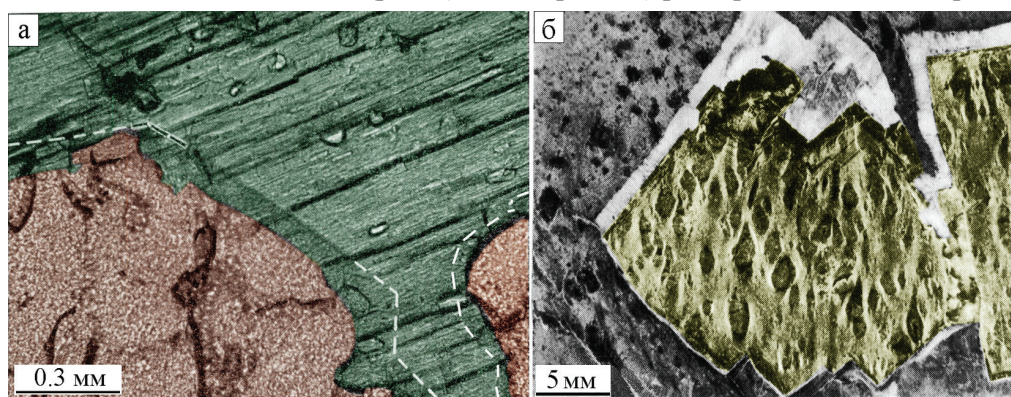


Рис. 7. «Тени» предшествующих твёрдых тел в метакристаллах.

а – тень частично замещённого граната (коричневый) в метакристалле амфибола (зелёный), Уфалей; б – тень текстуры сланца в метакристалле пирита (протравлено) с оторочкой белого кварца, Кулар, Якутия.

Fig. 7. Relics of former solid bodies in metacrystals.

а – relic of garnet (brown) partly replaced by the amphibole metacrystal (green); б – relic of schist structure in pyrite metacrystal (protable) with white quartz rim (Kular, Yakutia).

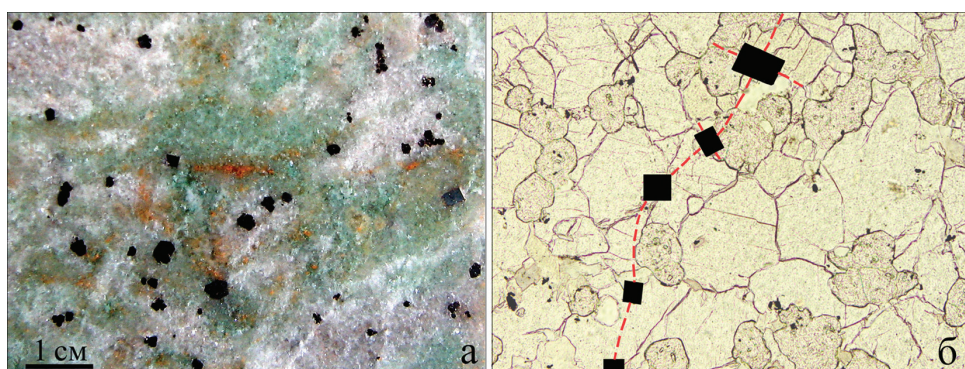


Рис. 8. Метакристаллы пирита в листвените (а) и вдоль тончайших трещин в породе (б, схема).
Fig. 8. Pyrite metacrystals in listvenite (a) and along the thinnest fractures in rock (б).

сыщение для метакристалла достигается путём местного изменения химического состава раствора и, соответственно, растворимости протокристалла.

Здесь важно привести необходимое пояснение к предшествующему утверждению, связанное в петрологии с представлениями о «кристаллизационном давлении». Рассмотрим два известных примера. В технологии минерального сырья давно применяется способ разрушения горных пород с помощью смачивающих жидкостей, создающих расклинивающее давление в трещинах. Другой пример: множество кристалликов льда на пористой почве могут приподнять крупную каменную глыбу. В первом случае ясно, что разрушающее давление создано жидкостью. Во втором – появление давления неверно приписывали кристаллизующемуся льду. На самом деле давление создаёт плёночная жидкость, а кристаллики льда своим ростом (снизу, от почвы) лишь уменьшили толщину жидкостной плёнки между льдом и почвой и передали от неё давление на глыбу. В специальных экспериментах за «кристаллизационную силу» ошибочно принято расклинивающее (капиллярное) давление, представление о котором разработал Б.В. Дерягин в 1934 году при исследовании коллоидных систем. Это давление возникает независимо от явлений кристаллизации между соприкасающимися телами при наличии жидкости, смачивающей поверхности тел. Так, если между сухими кристаллом и положенной на него небольшой гирькой ввести любую смачивающую жидкость, то гирька приподымет-ся над кристаллом на толщину возникшей плёнки жидкости. Величина давления при этом будет зависеть от угла «клина» (скульптуры грани) или толщины плёнки, от сил взаимодействия жидкости с конкретными поверхностями кристаллов.

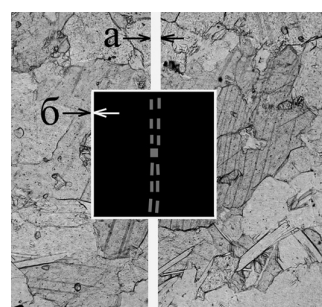


Рис. 9. Соотношение толщины трещины с функционирующим раствором (а) и плёнки жидкости вокруг метакристалла (б) при метасоматозе ($a > б$).

Fig. 9. Comparison of the thickness of fracture with a fluid (а) and a liquid film around metacrystal (б) during metasomatism ($a > б$).

Другой вопрос: **почему метакристаллы всегда идиоморфны по отношению к замещаемому минералу?** Возможный ответ: кристаллы всегда растут собственной (идиоморфной) поверхностью. Поскольку при метасоматозе рост метакристалла «вынуждает» растворяться протокристалл, то метакристалл имеет свою ростовую поверхность (идиоморфная поверхность далеко не всегда плоскогранна – см. рост скелетных, расщеплённых, блочных, скрученных кристаллов). Если растворения протокристалла не происходит (для него может быть не достигнуто состояние недосыщения в плёночной жидкости), то новый минерал (но не метакристалл!) из пересыщенного для него раствора может расти только в пределах открытых трещин и пор, образуя ксеноморфные (отпечатковые) выделения (см. рис. 6а).

Собственно метасоматоз происходит в тончайшей плёнке, химический состав и форма облекания тел которой формируются в соответствии с составом, трещиноватостью (спайностью, отдельностью), включениями, пористостью исходного твёрдого тела. Всё это отражается в анатомии метакрис-

талла, формируя «тень» предшествующего тела. Если растворение твёрдого тела предшествует росту нового кристалла, то все детали его анатомии в участке растворения исчезают, никакого наследования анатомических признаков предшественника не может происходить. При метасоматозе часть информации о предшествующих телах сохраняется в виде «тени» (см. рис. 7).

Природные минеральные тела в общем случае имеют сложный онтогенез, в процессе которого могут чередоваться явления роста и растворения минералов вследствие трещинообразования при тектонических движениях. Сложный онтогенез ведёт к сложноустроенным минеральным телам, в анатомии которых записана история их «жизни». Череда деформаций, роста, растворения минералов записывается в каменном теле «каменным языком». Если «каменную» книгу удаётся прочесть, то можно сложное тело представить в виде последовательных простых тел, среди которых могут оказаться тела, позволяющие рассматривать их как элементы системы с какими-либо эмерджентными свойствами (например, соответствие состава и формы).

Минеральные индивиды и сложные минеральные тела образуются путём кристаллизации (роста) и перекристаллизации. ***В процессе кристаллизации индивиды всегда растут собственной (идиоморфной) поверхностью***, в них закладывается ростовая анатомическая картина, позволяющая говорить о разделении атомов элементов и их изотопов растущими кристаллами из кристаллизационной среды. Кристаллизация – процесс вынужденный (обусловлен пересыщением в среде).

Перекристаллизация – процесс самопроизвольный, происходит в пределах мономинерального пространства за счёт внутрикристаллической и поверхностной энергии индивидов. Для перекристаллизации не требуется растворитель, не задействован механизм «растворение–рост» – движение границ зёрен происходит путём перемещения (диффузии) строительных частиц (атомов, молекул, комплексов) в зоне контакта энергетически различных индивидов с разной плотностью дислокаций, дефектов, вакансий, напряжений (Попов, 2011). В перекристаллизованных агрегатах не выявлено ни индивидов с зонально-секториальным строением, ни первичных двойников, ни блочности, ни расщепления, ни скручивания, не наблюдалось индивидов крупнее 8–10 мм (деформационные дефекты возможны позднее только как наложенные, как и метасоматоз).

Термин «метаморфизм» в геологии объединяет три явления – деформация твёрдых (минеральных) тел, перекристаллизация (рекристаллизация) минералов и метасоматоз. Все метаморфические породы с новообразованными минералами по механизму являются метасоматическими (за исключением кристаллизации минералов в порах и трещинах). Так, если на месте глинистого сланца возник роговик, то это означает, что на месте индивидов глинистых минералов (твёрдых тел) выросли индивиды слюды, граната, кордиерита, полевого шпата и других. Ни один из новообразованных минералов не равен по составу глинистому минералу, занимавшему конкретное пространство. Следовательно, в этом пространстве должен произойти привнос–вынос вещества: на месте одного твёрдого тела образовалось другое по составу твёрдое тело (метасома!), что по определению относится к метасоматозу.

Онтогенический анализ метаморфических пород показывает, что в земной коре практически не встречаются случаи образования в них минералов при «изохимическом метаморфизме» в том виде, как он был первоначально сформулирован. Это согласуется и с общетеоретическими представлениями: всё минералообразование в земной коре (или других телах) происходит в градиентных полях температуры, давления, концентраций химических элементов. Они порождают обязательное движение жидкостей, газов, атомов элементов, т.е. тепломассоперенос.

Заключение

Существующая физико-химическая теория метасоматоза, построенная на принципе («законе») дифференциальной подвижности компонентов, не соответствует природным явлениям. Компоненты не имеют свойства растворимости. Этим свойством обладают газы, жидкости и минералы. Сам принцип сформулирован неудачно в рамках химических (компонентных) систем, требующих применения представлений о термодинамическом равновесии, стационарности протекания химических процессов и введения множества других условностей (изменения правила фаз, классификации компонентов по участию в геохимических процессах, удаления некоторых компонентов из системного рассмотрения (H_2O и CO_2), введения представления об избыточных компонентах и др.). Истинность перечисленных представлений невозможно подтвердить наблюдениями. Теория не учитывает пространство и время в минеральных объектах, не касается ка-

честв минеральных тел, а также обходит стороной проблему второстепенных и аксессуарных минералов природных систем. В литературе нет примеров предсказания полного минерального состава метасоматитов с использованием физико-химической теории (например, в экспериментальных системах), за исключением простейших случаев.

Минеральные тела развиваются в пространстве-времени в изменяющихся условиях. Метаморфические породы земной коры, судя по морфологическим признакам, образовались преимущественно метасоматическим путём. Следовательно, в метаморфических толщах не существует изо-химического преобразования за исключением локальных случаев чисто механической деформации и рекристаллизации напряжённых минеральных тел. Механизмы локального и регионального метасоматоза принципиально ничем не отличаются и определяются развитием метакристаллов в твёрдых (кристаллических) телах.

Минеральность (кристалличность) биологических (живых) систем позволяет полагать одинаковость механизма метасоматоза в них с механизмом в неорганической части минерального мира. К этому выводу уже есть некоторые наблюдения микробиологов, но вследствие преобладания микро- и нанокристаллических агрегатов в растительных и животных клетках морфологические наблюдения сложно выполнять.

Онтогенический подход использует морфологические признаки явлений в минеральных телах: рост, растворение, рекристаллизация, химическая и физическая диссимметризация пространства, диффузия, двойникование, синтаксия, эпитаксия, блочность, расщепление, скручивание, распад твёрдых растворов, метасоматоз. Всякому явлению в минеральном мире соответствует только ему присущий набор морфологических признаков, иначе разные явления не отличить. Явления кристаллизации невозможно понять только в рамках химической науки, то есть с позиций компонентных систем и использования соответственных диаграмм. Кристаллы обладают множеством эмерджентных свойств, отсутствующих у компонентов. Особое значение для моделирования природных явлений имеет то, что кристаллизация создаёт тела, в которых есть признаки последовательности событий – раньше, одновременно, позднее. Отсюда может следовать правильность выделения физико-химических систем. В частности, собственно метасоматоз по морфологическим признакам предполагает синхрон-

ность явлений растворения–роста в едином пространстве и определяет возможность рассмотрения их в рамках единой физико-химической системы.

В общем случае сложный онтогенез минеральных тел с явлениями наложения (телескопирования) одновременного минералообразования в едином пространстве не позволяет моделировать метасоматический процесс в рамках равновесных термодинамических систем без их предварительного пространственно-временного исследования. Практичной (эвристичной) теорией метасоматоза, как представляется, может быть онтогеническая теория, использующая пространственно-временные основания. Создание такой теории впереди.

Работа выполнена в рамках темы ГР № 01201374594 «Минералы и минеральные парагенезисы в истории становления редкометалльной минерализации щелочных комплексов Урала».

Литература

- Гликин А.Э. Полиминерально-метасоматический кристаллогенез. СПб.: Изд-во «Журнал Нева», 2004. 320 с.
- Григорьев Д.П. О законах анатомии кристаллов // Кристаллография. 1971. Т. 16. Вып. 6. С. 1226–1229.
- Жабин А.Г. Метакристаллы и критерий относительного идиоморфизма минералов / Генезис минеральных индивидов и агрегатов (онтогенез минералов). М.: Наука, 1966. С. 34–50.
- Жариков В.А. Теоретические основы метасоматизма / Метасоматизм и метасоматические породы. М.: Научный мир, 1998. С. 17–102.
- Зарайский Г.П. Экспериментальное исследование метасоматизма / Метасоматизм и метасоматические породы. М.: Научный мир, 1998. С. 141–164.
- Коржинский Д.С. Очерк метасоматических процессов / Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. М.: Изд-во АН СССР, 1955. С. 335–456.
- Попов В.А. Практическая генетическая минералогия. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 167 с.
- Поспелов Г.Л. Парадоксы, геолого-физическая сущность и механизмы метасоматоза. Новосибирск: Наука, 1973. 355 с.
- Рамдор П. Рудные минералы и их сростания. М.: Изд-во иностранной литературы, 1962. 1130 с.

Поступила в редакцию 7 ноября 2016 г