

**П. Я. Азимов**

*Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, г. Санкт-Петербург,  
pavel.azimov@mail.ru*

## **Метаморфогенные метасоматиты**

Региональный метаморфизм, как и многие другие процессы в земной коре, сопровождается метасоматическими преобразованиями пород [Ferry, Dipple, 1991]. Возникающие породы являются и метаморфическими – они сформированы в условиях метаморфических преобразований, – и метасоматическими одновременно. Цель представляемого сообщения – рассмотреть характерные черты метасоматитов, связанных с метаморфизмом, их особенности, сходство и отличие от других метасоматитов и от изохимически метаморфизованных пород.

Хотя метаморфизм, как правило, является изохимическим процессом, для метаморфических преобразований необходимо присутствие водного флюида. Через флюид происходит массоперенос в породе, растворение неустойчивых минералов и кристаллизация новых, стабильных. Флюид уравнивается с породой, но если он

приходит в движение и проходит через породу другого состава, то реагирует с ней, растворяя одни компоненты и откладывая другие. Степень взаимодействия тем выше, чем больше разница в составах флюида и породы. Причиной движения флюида являются градиенты температуры и/или давления, а наиболее проницаемы горные породы в зоне деформаций. С этим связана приуроченность метасоматитов к зонам деформаций (сдвиговым зонам) [Ague, 2003].

**Структурная позиция.** Тела метасоматитов расположены среди неизменных или слабоизмененных пород. Форма тел различна: линзы, жилы, пластообразные тела, согласные и субсогласные с вмещающими породами или секущие их. Нередко апофизы согласных тел секут структурные элементы вмещающих пород. Метасоматиты приурочены к областям растяжения в сдвиговых зонах (дуплексам растяжения и трастенсии, межбужинным пространствам), ядрам или замковым частям складок, литологическим границам. Внутри тел метасоматитов наблюдается зональность, чаще (но не всегда) конформная границам тел. Границы между зонами могут быть резкими или размытыми, зональность проявляется в смене парагенезисов, изменении структуры и текстуры породы, особенностей морфологии и строения зерен минералов. Передовые (внешние) зоны – наименее измененные, тыловые (внутренние) – наиболее измененные. Однако, поскольку метасоматиты приурочены к зонам деформаций, пространственно тыловые зоны могут располагаться не обязательно в центре тел, одни зоны могут рассекают другие. В случае неоднородности протолита (неизменной породы) картина еще более усложняется, т.к. минеральные ассоциации, слагающие метасоматические зоны, определяются и составом протолита, и степенью метасоматической переработки. Нередко метасоматиты образуются на регрессивной стадии метаморфизма при изменяющихся  $P$  и  $T$ . В этом случае парагенезисы отражают еще и эволюцию параметров метаморфизма. В то же время нередко можно наблюдать и редуцированную зональность, когда какие-то зоны выпадают – вплоть до появления тыловых зон среди протолита. Размеры тел метасоматитов сильно изменчивы – от первых до сотен метров, а мощность зон, насыщенных метасоматитами, может достигать несколько километров.

**Текстуры, структуры и состав.** Для метасоматитов характерны значительные текстурные и структурные вариации – как между зонами, так и в пределах одной зоны, неравномернозернистые структуры, от мелко- и даже тонкозернистых пород, особенно в зонах интенсивной милонитизации, до грубо- и гигантозернистых (порфиробластические кристаллы граната, кианита, ставролита, андалузита, кордиерита и других минералов, достигающие нескольких десятков сантиметров). Обычны реакционные структуры, отражающие эволюцию состава раствора, особенно на границах зон, где минералы становятся неустойчивыми. Часто можно наблюдать сохранившиеся реликты ранних минералов. Практически всегда по таким реликтам возможно установить протолит и последовательность изменений. Для минералов, слагающих метасоматиты, характерны признаки кристаллизации в сильно неравновесных условиях – признаки т.н. минеральной патологии [Пунин, 1989]: скелетные и расщепленные кристаллы, ростовые двойники, ростовой изгиб-кручение кристаллов и др. В промежуточных зонах обычно большое число фаз в минеральной ассоциации (до 12–15), а к тыловым зонам число фаз уменьшается (не обязательно до одной, часто внутренние зоны сложены 2–3 породообразующими минералами). Число фаз в промежуточных зонах может превышать допустимое по правилу фаз, что указывает на сильную неравновесность процесса.

Одна из характерных черт метасоматитов – их частая ассоциация с кварцевыми или карбонатными жилами, реже – с жилами, сложенными темноцветными минералами.

Важно понимать, что в зонах изменения метаморфических пород степень такого изменения может варьировать от весьма незначительной, с малым количеством новообразований, до полной переработки, где реликты сохранились слабо и в небольшом количестве, а состав пород меняется от ультраосновных до кварцитов, или наоборот – от кислых гнейсов и сланцев до гранатитов или биотититов, по содержанию  $\text{SiO}_2$  (около 38 %) отвечающих ультраосновным породам.

Метасоматиты встречаются во всех фациях метаморфизма [Бушмин, 1987] – от низкотемпературных (цеолитовой и пренит-пумпеллиитовой) до гранулитовой, включая УНТ (ультравысокотемпературные) гранулиты, и эклогитовой, включая УНР (ультравысокобарные) породы. Они могут формироваться на пике метаморфизма или на ретроградной стадии. В этом случае по минералам метасоматитов может быть реконструирована Р-Т-t эволюция метаморфизма, с которым связаны эти метасоматиты.

По составу метаморфогенные метасоматиты весьма разнообразны, что связано с разнообразием субстрата, воздействующих на него флюидов и Р-Т условий их взаимодействия. Широко распространены продукты кислотного выщелачивания – разнообразные кварциты (кианитовые, силлиманитовые, мусковитовые, гранатовые, ставролитовые и др.), основные (гранатиты, цоизититы, скарноиды, биотититы), щелочные (альбититы, рибекитовые метасоматиты), магнезиально-глиноземистые (сапфириновые, корундовые, шпинелевые, кордиерит-жедритовые и т.п.), карбонатные (магнезиальные скарны, кальцитовые метасоматиты), бор- и хлорсодержащие (с турмалином, корнерупином, дюмортьеритом, аксинитом, скаполитом) метасоматиты. Нередко метасоматиты обогащены сульфидами – от тонкой вкрапленности до богатых сульфидных руд.

**Металлогения.** Изучение метаморфогенных метасоматитов имеет важное значение для металлогении, т.к. метасоматоз приводит к концентрации элементов, в том числе и в промышленно значимых количествах. С метаморфогенными метасоматитами могут быть связаны месторождения нерудных полезных ископаемых – граната, кианита, мусковита, силлиманита, графита, наждака, ставролита, талька, ювелирных и поделочных минералов (корунда, изумруда, шпинели, лазурита), руд (Au, U, платиноиды, Ti, Cr, V, Pb, Zn, Cu, Fe, W, As, Sb, Ni, редкие металлы, колчеданы). По современным представлениям, среди крупных месторождений, связанных с метаморфогенными метасоматитами – Pb-Zn колчеданные месторождения Брокен-Хилл (Австралия) [Hobbs et al., 1968; Doyle, Cartwright, 2000; Laznicka, 2010] и Холоднинское (Северная Бурятия) [Глебовицкий, Бушмин, 1983; Добрецов и др., 1987], золоторудные месторождения Абитиби (Канада) [Goldfarb et al., 2001], Космозерско-Падминские месторождения U, Cr, V, Se, Cu и платиноидов (Карелия), Кейвское месторождение кианитов (Кольский полуостров). Некоторые из этих месторождений сформированы в результате перераспределения и обогащения руд, возникших до метаморфизма – при осадконакоплении и вулканизме, другие полностью возникли в ходе метаморфизма. Дискуссия о роли разных факторов рудообразования рассмотрена во многих работах, например, [Goldfarb et al., 2001; Laznicka, 2010].

**Критерии выделения метаморфогенных метасоматитов.** Метаморфогенные метасоматиты могут быть сходны с:

- некоторыми видами метасадков;
- изохимически метаморфизованными корами выветривания;

– изохимически метаморфизованными дометаморфическими метасоматитами (поствулканическими, орогенными и т.п.);

– приконтактовыми метасоматитами, развивающимися по метаморфическим породам.

Чтобы отличить эти породы от метаморфогенных метасоматитов, может быть использован ряд критериев, в первую очередь, структурных и петрологических:

– метаосадки образуют пластовые тела и не связаны с региональными структурами, такими, как сдвиговые зоны;

– в метаосадках возможны градиенты размерности и состава, но не может быть зональности с реакционными взаимоотношениями между зонами;

– метаморфизованные коры выветривания также не связаны с деформационными структурами, они залегают на стратиграфических границах, а их состав зависит от состава подстилающих пород;

– коры выветривания обладают направленной зональностью, а концентрации компонентов по их разрезу изменяются постепенно, тогда как в метаморфогенных метасоматитах могут быть резкие границы между зонами, а зональность может быть симметричной или более сложной;

– коры выветривания не могут залегать внутри магматических (в том числе метаморфизованных) тел;

– приконтактовые метасоматиты приурочены к контактам интрузий и не связаны с региональными деформациями (в частности, в них отсутствуют такие элементы, как сланцеватость и линейность);

– положение метаморфогенных метасоматитов контролируется структурными элементами, возникшими в ходе деформаций, сопровождающих метаморфизм (косыми сколами в сдвиговых зонах, осевыми плоскостями складок и др.) – в отличие от изохимически метаморфизованных пород и приконтактовых метасоматитов;

– тела метаморфогенных метасоматитов могут рассекать плоскостные дометаморфические и связанные с метаморфизмом структурные элементы (слоистость и сланцеватость);

– метаморфогенные метасоматиты могут иметь более простой структурный рисунок по сравнению с вмещающими метаморфическими породами, особенно в полиметаморфических комплексах;

– от изохимически метаморфизованных пород метаморфогенные метасоматиты отличаются реакционными соотношениями между зонами, реликтами ранних ассоциаций, ассоциациями с избыточным числом фаз (минералов), тогда как при изохимическом метаморфизме сохраняются особенности состава, но не сохраняются неравновесные соотношения;

– в отличие от изохимически метаморфизованных пород метасоматиты часто ассоциируют с гидротермальными жилами;

– от контактово-метасоматических пород метаморфогенные метасоматиты отличаются P-T условиями образования, в частности, более высоким давлением, отвечающими условиям метаморфизма вмещающих пород или отражающими регрессивную ветвь метаморфизма;

– поскольку метаморфогенные метасоматиты образуются в ходе деформаций, разные элементы тел метасоматитов могут иметь разное структурное положение, в частности, ранние зоны могут быть рассечены более поздними.

В целом, метаморфогенные метасоматиты отличаются приуроченностью к зонам деформации, большой неоднородностью состава, структур и текстур, неравновесными соотношениями минералов, реликтами ранних минералов и парагенезисов.

### Литература

*Бушмин С. А.* Минеральные фации метасоматитов, связанных с региональным метаморфизмом // Записки ВМО. 1987. Ч. 116. Вып. 5. С. 585–601.

*Глебовицкий В. А., Бушмин С. А.* Послемигматитовый метасоматоз. Л.: Наука, 1983. 216 с.

*Добрецов Н. Л., Меляховский А. А., Ащепков И. В. и др.* Структурно-минералогические критерии метаморфогенного оруденения. Новосибирск: Наука, 1987. 168 с.

*Пунин Ю. О.* Патология минеральных индивидов // Минералогический журнал. 1989. Т. 11. № 1. С. 92–98.

*Ague J. J.* Fluid flow in the deep crust (chapter 3.06) // Treatise on Geochemistry. 2003. Vol. 3. P. 195–228.

*Doyle C., Cartwright I.* The role of fluids in retrograde shearing: Broken Hill, Australia // Journal of Geochemical Exploration. 2000. Vol. 69–70. P. 575–579.

*Ferry J. M., Dipple G. M.* Fluid flow, mineral reactions, and metasomatism // Geology. 1991. Vol. 19. № 3. P. 211–214.

*Goldfarb R. J., Groves D. I., Gardoll S.* Orogenic gold and geologic time: a global synthesis // Ore Geology Reviews. 2001. Vol. 18. № 1–2. P. 1–75.

*Hobbs B. E., Ransom D. M., Vernon R. H., Williams P. F.* The Broken Hill ore body, Australia // Mineralium Deposita. 1968. Vol. 3. № 4. P. 293–316.

*Laznicka P.* Giant metallic deposits: future sources of industrial metals. Springer, 2010. 950 p.