

О двух механизмах образования гранатов

В. П. Макаров

Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе, Москва
litolog@msgpa.ru, тел.: 8 (495) 433 5677, доб. 11 78

Ключевые слова: гранат, пироксены, механизм выделения, минералы, расплав магматический, кимберлит, мафиты, эклогиты, граниты, кислые породы,

Ссылка: Макаров, В. П. (2011), О двух механизмах образования гранатов, *Вестник ОНЗ РАН*, 3, NZ6069, doi:10.2205/2011NZ000199.

Под механизмом выделения минералов понимается химическая реакция, ведущая к осаждению минерала. Решение этой проблемы способствует выяснению условий образования гранатов, а, следовательно, и вмещающих минерал горной породы. Таким образом, задача о механизме выделения минерала является одной из обратных задач геологии, направленной на установление условий образования горных пород (руд).

Базой решения задачи являются законы химии и физической химии. Значительную информацию о механизме выделения минералов представляют разнообразные эксперименты, проводимые отечественными и зарубежными исследователями практически за все время существования геологии, как отрасли научного знания. Эти исследования касались широкого круга минералов, как растворимых в воде (флюиде) в широком интервале температур (T) и давлений (P), так и минералов, выделившихся из магматических расплавов.

Решение задачи опирается на аксиомы: 1) в реакциях природного минералообразования всегда сохраняется состояние термодинамических изотопного и геохимического равновесий между исследуемым минералом M и некоторым соединением \dot{C} . Это - обобщение точки зрения Э.М. Галимова [Галимов, 1973]. 2) геохимическая система M - \dot{C} образуется в результате распада некоторого исходного материнского вещества.

В целом решение задачи разбивается на два этапа: а) определение состава соединения \dot{C} , равновесного исследуемому минералу; б) на этой основе определение состава материнского соединения, при разложении которого образуются соединения M и \dot{C} .

Процедура решения задачи первого этапа исходит из анализа изотермы распределения отношений элементов в минерале или минералах. Для этих минералов методами анализа газово-жидких или расплавных включений определяют принимаемые за эталон температуры ($T_{эм}$) образования этих минералов. Составляются попарно отношения трех элементов. Методика отбора проб для составления выборок описана в [Макаров, 2006^б]. По этим данным строятся диаграммы распределений изотопов (элементов) в одном или нескольких минералах, имеющие угловой коэффициент $S_{набл}$ [Макаров, 1987; 2005^а].

По литературным данным изучен изотопный состав кварца Qw , биотита 4 и мусковита 4, полевых шпатов (калиевый полевой шпат) 4, альбита 4, адуляра, среднего плагиоклаза 4_{40} , граната 4, диоксида, роговой обманки. Установлена последовательность выделения минералов в виде рядов [Макаров, 1991; 2004]

$(Qw, Bio) > (Mt, Il) > Al_1 > Mus > Al_2 > Grn(?)$, (А, магматиты)

$(Qw, Bio) > (Mt, Il) > Pl_{40} > Mus > Grn(?)$. (Б, метаморфиты)

Это наиболее богатый по количеству силикатных анализов минерал. Он отобран из гранитов, перидотитов, пироксенитов, лерцолитов, кимберлитов, гнейсов, сланцев, эндербитов, эклогитов различных регионов мира. По нему рассчитаны химические реакции обмена элементами Ca, Mg, Fe и Mn между соединениями Grn - \dot{C} . В качестве \dot{C} взяты: Ca, Mg, Fe, Ca^{+2} , Mg^{+2} , Fe^{+2} , CaO, MgO, FeO, Fe_2O_3 , Al_2O_3 , пироксены, биотиты, оливины, кордиериты, силлиманиты (для пары Fe^{+3} - Al^{+3}), шпинели (в том числе магнетиты), корунд, гематит. По условиям образования все выборки гранатов условно делятся на две части:

А. *Гранаты* а) кимберлитов; б) ультраосновных пород (мафиты, пироксениты, перидотиты, лампроиты) и в) эклогитов. В группе кимберлитов выборки гранатов в подавляющем большинстве отобраны из алмазоносных трубок Якутии. По расплавным включениям единичные определения $T_{обр}$ гранатов колеблются от 1150°C ((кимберлит) до 1230°C (эклогит, Мугоджары). Такая же $T_{обр}$ граната

по геохимическим баротермометрам: *Pyr* 1000–1200°C, *Cpx*- 980–1400°C; $P = 40\text{--}75$ кбар. Средняя $T_{обр}$ пироксенов, оливинов и плагиоклазов колеблется около 1250°C, она принята в качестве эталонной; минералы равновесны CO_2 и вместе с ней выделяются. По гранатам изотопные данные отсутствуют. По геологическим данным *Grt* (*Pyr*- пироп) находятся совместно с клино-(*CPX*, диопсид) и ортопироксенами (*OPX*, энстатит), редко – кианитом [Макаров, 2002₆, 2005^b, 2006^a].

По геохимическим данным пироп термодинамически равновесен пироксенам. Связь *Grt* с пироксеном генетическая: они образуются при разложении некоего протовещества. Оценка его состава опирается на данные количественных измерений соотношений *Pyr*/*CPX* в реальных объектах, чаще всего $\text{Pyr}/\text{CPX} \approx 1.0$. Тогда $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} + \text{CaMgSi}_2\text{O}_6 = \text{CaMg}_4\text{Al}_2\text{Si}_5\text{O}_{18}$ – это кордиерит, изначально образованный, возможно, по реакции $(An) = (\text{Mg}-Ol) + 2(\text{Mg}-Opx)$.

Для пироксенов (диопсидов) совместно с оливином и плагиоклазом по изотопным данным установлено равновесие с CO_2 по кислороду. Тогда уравнение выделения граната и пироксена должно имеет вид



Здесь скобки отражают: [...] – изотопное; {...} – геохимическое равновесия.

Таким образом, поставщиком ^{18}O в минералы является CO_2 , согласуясь с хорошей растворимостью CO_2 в ультраосновных расплавах высоких давлений. При анализе влияния CO_2 на плавление силикатов в литературе рассматривались реакции карбонатизации пироксенов (энстатит *Ens*) и оливинов под давлением: (1) $Ol + Dio + \text{CO}_2 \rightarrow Ens + Dol$; (2) $Ol + Dol + \text{CO}_2 \rightarrow Ens + Mgt$ (магнезит). Полученные результаты показывают сомнительность этих уравнений. Эти данные можно понять, если рассматривать, например, уравнение (1) в виде $Ens + Dol \rightarrow Ol + Dio + \text{CO}_2$. Это ведёт к гипотезе, что ультраосновные породы – продукт переработки пироксен (энстатит) – доломитовых (или магнезитовых) пород.

Б. По изотопным данным все биотиты образованы при $T \approx 700^\circ\text{C}$, плагиоклазы $\approx 500^\circ\text{C}$. По изотопным данным [Макаров, 2002₁, 2004, 2005₁] и анализу ГЖВ гранат выделяется при 300–450°C. По официальной точке зрения - $\approx 700^\circ\text{C}$, но она опирается во многом на геохимические термометры, в использовании которых имеются существенные ошибки [Макаров, 2005₂]. Биотит и гранат выделяются в равновесии с водой. О кордиерите информации нет. По экспериментам Л.Л. Перчука и др. (1983) при $T = 550\text{--}1000^\circ\text{C}$ ионный обмен между гранатом и кордиеритом при совместной кристаллизации отсутствует.

Результаты расчетов и сопоставлений показали, что наилучшее согласие наблюдается в равновесии граната с кордиеритом, биотитом и пироксенами. По геологическим данным в изучаемых породах пироксен не установлен. Биотит тоже под подозрением, поскольку между ним и гранатом наблюдается существенное различие в $T_{обр}$. Основной версией является равновесие с кордиеритом, часто присутствующим в гнейсах в ассоциации с гранатом. Таким образом, вероятное уравнение образования гранатов имеет вид



Результаты интерпретации полученных результатов опираются на работу [Елисеев, 1963]. Переход пород фации зеленых сланцев в породы фации эпидотовых амфиболитов осуществляется на основе реакции $Chl + Qw \rightarrow Grn + \text{H}_2\text{O}$ (*Chl* – хлорит). Но, объясняя изотопное равновесие граната с водой, эта реакция не отражает геохимическое равновесие минерала с другими компонентами гнейсов. Описывая происхождение гранатов, Н.А. Елисеев [Елисеев, 1963] пишет также о реакции $Chl + Qw \rightarrow Cor + Ant + \text{H}_2\text{O}$ (*Ant* – антофиллит). Эти реакции протекают при разных P – T условиях. Но объединение их в средних областях P – T условий приводит к искомой реакции образования минералов: $Chl + Qw \rightarrow \{Cor + [Grn] + \text{H}_2\text{O}\}$. Эта реакция соответствует схеме выделению минералов, полученной по изотопно-геохимическим данным.

Таким образом, в истории формирования гранатов намечаются два различных механизма его образования. В кислых породах гранат выделяется в равновесии с водой и кордиеритом, соответствующая обстановке, характерной для фации эпидотовых амфиболитов.

В ультраосновных породах, образующихся при высоких значениях T и P , гранаты выделяются совместно с пироксенами в равновесии с CO_2 . Здесь уже протоматеринским веществом, возможно, является кордиерит; первичными продуктами могут быть также пироксен (энстатит) - доломитовые (или магнезитовые) породы (мрамора или скарны).

Литература

- Галимов, Э. М. (1973), *Изотопы углерода в нефтегазовой геологии*. М: Недра.
Елисеев, Н.А. (1963). *Метаморфизм*. М.: Недра.

МАКАРОВ: МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ГРАНАТОВ

Макаров, В. П. (1987), Способ определения температуры образования природных соединений. Авт.св.1312504. // *Бюлл. изобр. откр.* 19. с.192.

Макаров, В. П. (1991), Последовательность кристаллизации породобразующих минералов по изотопным данным, Всесоюз. конферен. «*Геохимия магматических пород. Щелочной магматизм Земли*», Тез. докл., М.: ГЕОХИ, с. 98.

Макаров, В. П. (2002^a). Температура образования породобразующих минералов, Всерос. Конферен, «*Геохимия магматических пород. Щелочной магматизм Земли*», Тез. докл., М.: ГЕОХИ, с. 66, URL: <http://alkaline2002.narod.ru>.

Макаров, В. П. (2002^b), О механизме образования минералов в кимберлитах. 2. Природа гранатов и шпинелидов, Семинар «*Геохимия магматических пород. Щелочной магматизм Земли*», ГЕОХИ, URL: www.alkaline2002.narod.ru.

Макаров, В. П. (2004), О механизме выделения минералов: магматические и метаморфические породы, *Электрон. науч.-информ. журнал «Вестник Отделения наук о Земле РАН», № 1(22)'2004, М.:ИФЗ РАН, 2004*, URL: www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2004/informbul-1_2004/izotop-2.pdf.

Макаров, В. П. (2005^a), Изотопные геотермометры, *XIII научный семинар «Система «Планета Земля», М.: МГУ, РОО «Гармония строения Земли и планет»*, сс. 228–253.

Макаров, В. П.(2005^b), Сопоставление результатов определения *T* образования минералов, *VII Междунар. Конф. «Новые идеи в науках о Земле», М.: РГГРУ, т.2*, с. 155.

Макаров, В. П. (2005^b), О некоторых условиях кристаллизации минералов мафических пород и метеоритов, Семинар «*Геохимия магматических пород. Щелочной магматизм Земли*», ГЕОХИ, URL: www.alkaline2005.narod.ru.

Макаров, В. П.(2006^a), О механизме выделения минералов. 3.О некоторых условиях кристаллизации минералов мафических пород и метеоритов, *Электрон. науч.-информ. журнал «Вестник Отделения наук о Земле РАН», № 1(24)'2006, М.:ИФЗ РАН, 2006*, URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2006/informbul-1_2006/izotop-3.pdf

Макаров, В. П. (2006^b). Явление компенсации – новый вид связи между геологическими объектами, *Мат-лы I Международной науч.-практич. конф. «Становление современной науки – 2006», Днепропетровск: Наука и образование, т.10*. сс. 85–115.