

УДК 552.16.001.57

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОДВИЖНОСТИ ГЛАВНЫХ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ УДАРНОМ МЕТАМОРФИЗМЕ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ)

© 2003 г. В. И. Фельдман, Л. В. Сазонова, Е. А. Козлов

Представлено академиком А.А. Маракушевым 22.05.2003 г.

Поступило 23.05.2003 г.

В настоящей работе изучены закономерности преобразования вещества при ударном метаморфизме. Для этого проводили эксперименты по нагружению сферическими сходящимися ударными волнами различных горных пород по методике, описанной в [1–2 и др.]. Для опытов готовили образцы пород в форме шара диаметром около 50 мм, которые в вакууме заваривали в стальные гермочехлы и подвергали нагружению сферической сходящейся ударной волной. При этом ударные напряжения изменялись по радиусу шара от 20–25 ГПа на его поверхности до 250–350 ГПа на радиусе 1 мм от центра шара. Длительность импульса нагрузки составляла  $1-3 \cdot 10^{-6}$  с. Начальные скорости охлаждения при разгрузке оценены примерно как  $10^8-10^9$  °C/с. После сферического обжата, разгрузки и остывания образцы распиливали в меридиональной плоскости, полировали и изучали на растровом электронном микроскопе CamScan 4DV с энергодисперсионным анализатором Link AN-10000. В результате установлены важная роль типа кристаллической решетки минералов при их диаплектовых преобразованиях и многоуровневый кристаллохимический контроль этих преобразований.

Выявлен однотипный характер зональности в образцах, подвергнутых ударно-волновому нагружению: от края шара к центру следуют зоны трещиноватости, аморфизации вещества, селективного, а затем и полного плавления, иногда испарения. Ширина этих зон сильно колеблется в зависимости от состава исходной породы и величины нагрузки на внешнем крае шара. Форма зон в общем случае сферическая или близкая к сфе-

ре. Однако она систематически искажается, если исходная порода обладает директивной текстурой – сланцеватой, гнейсовидной, полосчатой.

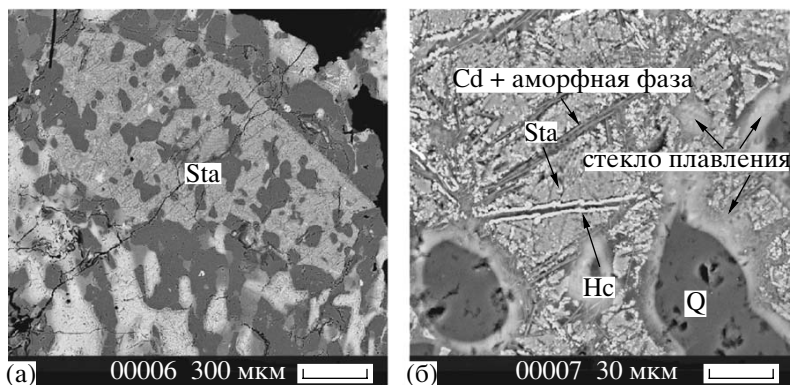
Обобщение результатов экспериментов более чем с 15 минералами (кварцем, плагиоклазами разного состава, калиевым полевым шпатом, биотитом, амфиболом, энстатитом, бронзитом, гиперстеном, диопсидом, авгитом, волластонитом, скаполитом, эпидотом, гранатом, ставролитом) из различных пород [2–6 и др.] позволило оценить характер миграции вещества в широком диапазоне составов, структур и текстур пород.

Особенности кристаллической решетки минерала оказываются решающими при его аморфизации или ударно-термическом разложении (УТР) с образованием ударно-термического агрегата (УТА). Особенности положения ионов в решетке минерала определяют начало их миграции и ее интенсивность.

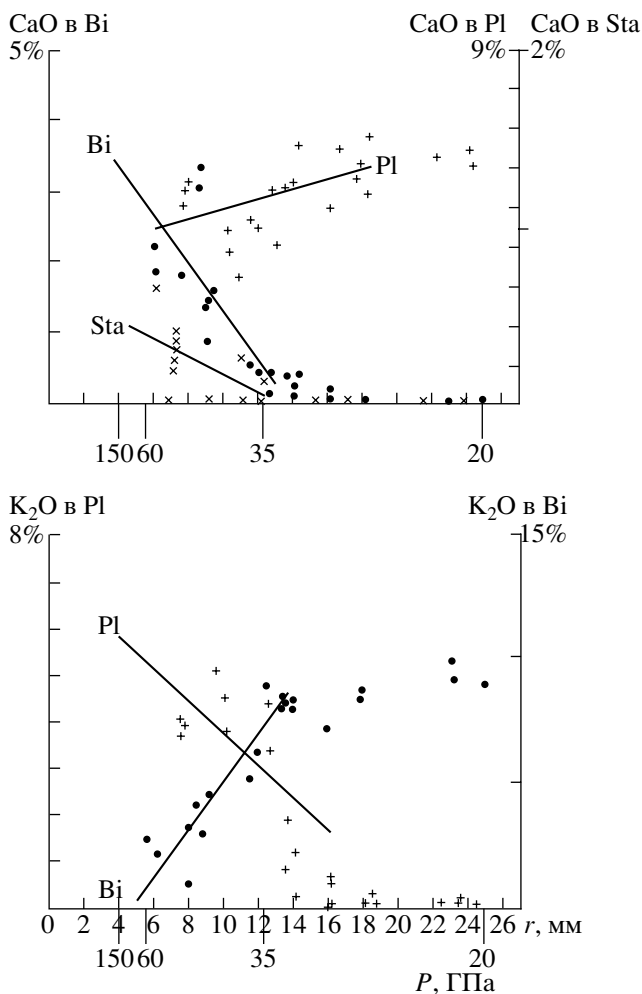
На первом уровне кристаллохимического контроля (КК) минералы делятся на две группы: первая включает кольцевые и каркасные алюмосиликаты и силикаты (плагиоклазы, калиевый полевой шпат, кордиерит), а также кварц. Они испытывают аморфизацию. Минералы второй группы (все остальные типы структур) подвергают ударно-термическому разложению. УТА полностью сохраняют форму и внутреннее строение замещаемого минерала, например, пойкилобластовую структуру ставролита (рис. 1) или граната в сланцах. В состав образующихся УТА обычно входят минералы, устойчивые при соответствующих *PT*-условиях (рис. 1), в том числе высокобарные модификации [6] и остаточная аморфная фаза. Новообразованные фазы УТА фиксируют компоненты исходной (доударной) фазы, но при этом происходит активный обмен веществом с окружающей средой. Благодаря этому аморфная фаза обогащается компонентами окружающих минералов.

Второй уровень КК определяет последовательность УТР минералов. По мере нарастания интен-

Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова  
Российский федеральный ядерный центр.  
Научно-исследовательский  
институт технической физики,  
Снежинск, Челябинской обл.



**Рис. 1.** Ставролит из образца плагиоклазово-кварцево-биотитового сланца, подвергнутого нагружению сферически сходящейся ударной волной. а – общий вид ставролита, по которому развивается ударно-термический агрегат (УТА). Границы с окружающими минералами резкие и четкие. б – деталь рис. а: интенсивное развитие УТА по многочисленным трещинам в ставролите и стекла плавления вокруг включений кварца. Q – кварц; Hc – герцинит; Cd – корунд; Sta – ставролит.

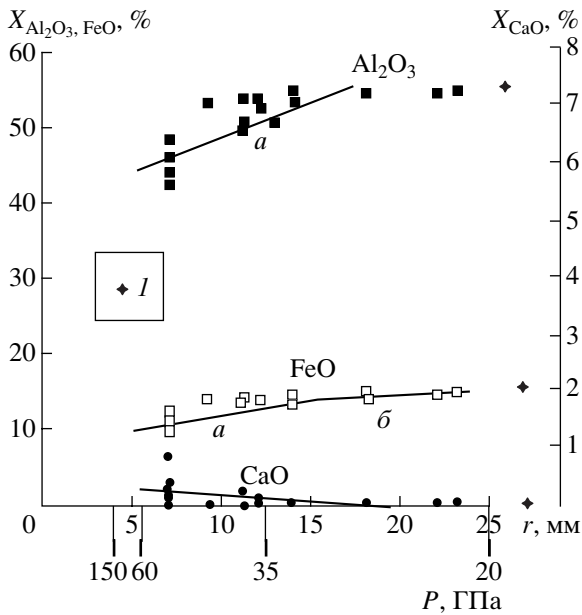


**Рис. 2.** Изменение содержания элементов в минералах из образца плагиоклазово-кварцево-биотитового сланца, подвергнутого нагружению сферически сходящейся ударной волной. Pl – плагиоклаз; Bi – биотит; Sta – ставролит; r, мм – расстояние от центра шара; P, ГПа – ударная нагрузка. Прямыми линиями обозначены только те интервалы, для которых наблюдается значимая корреляция между степенью привноса–выноса элемента и расстоянием от центра шара (ударной нагрузкой).

сивности напряжений в этот процесс вовлекаются слоистые и субслоистые (биотит, ставролит), затем ленточные (амфибол), далее цепочечные (пироксен) силикаты и алюмосиликаты и, наконец, субкаркасные (гранат). Первыми подвергаются УТР кристаллические фазы с максимально неоднородной кристаллической решеткой. При увеличении однородности структуры – при переходе слоистого алюмосиликата биотита к субкаркасному гранату, – напряжения, отвечающие началу УТР, возрастают примерно с 20–25 ГПа до 40 ГПа.

Третий уровень КК определяет последовательность миграции химических компонентов, входящих в состав минералов горной породы. Эта очередность задается координационной позицией иона. Интенсивность миграции химических компонентов падает с уменьшением координационного числа (КЧ) иона от КЧ = XII (калий в слюдах), через КЧ = X (щелочи в плагиоклазах), КЧ = VIII (кальций в плагиоклазе, железо и марганец в гранате) к КЧ = VI (железо в биотите и ставролите, магний в биотите, алюминий в ставролите и др.). Ионы с четверной координацией не мигрируют до начала плавления вещества.

Судьба мигрирующих ионов различна. В одних случаях они закрепляются в решетках соседних минералов – калий, выносимый из биотита и/или калиевого полевого шпата, внедряется в плагиоклаз (рис. 2); здесь же оказывается (частично) железо. Выносимый из плагиоклаза кальций частично появляется в ставролите и биотите (рис. 2, 3), интенсивный привнос–вынос компонентов наблюдается в остаточной аморфной фазе. В других случаях компонент не фиксируется (в статистически значимых количествах) в каких-либо минералах или УТА породы и попадает в межзерновой расплав селективного плавления, а затем и в расплав зоны полного плавления. На процесс перераспределения и фиксации ионов влияет также давление, при котором этот процесс происходит.



**Рис. 3.** Изменение содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{FeO}$  в ставролите из плагиоклазово-кварцево-биотитового сланца на разных расстояниях от центра шара ( $r$ ).  $I$  – содержание элемента в ставролите неизменной породы. Прямые линии – участки шара со значимой корреляцией между степенью выноса элемента и расстоянием от центра шара (ударной нагрузкой). Отрезок а: вынос  $\text{Al}_2\text{O}_3$  описывает уравнение  $X = 36.9 + 1.35r$  ( $S = 2$ ,  $R = 0.872$ ,  $n = 15$ ), вынос  $\text{FeO}$  – уравнение  $X = 8.86 + 0.41r$  ( $S = 0.855$ ,  $R = 0.786$ ,  $n = 15$ ); отрезок б: вынос  $\text{FeO}$  описывает уравнение  $X = 12.7 + 0.099r$  ( $S = 0.172$ ,  $R = 0.899$ ,  $n = 8$ ).  $S$  – стандартное отклонение,  $R$  – коэффициент корреляции,  $n$  – число анализов,  $X$  – содержание элемента в мол. %.

Так, при нагрузках до 50 ГПа по биотиту кварцево-двуслюдяного сланца было зафиксировано формирование  $\gamma$ -оливина (рингвудита), имеющего железистость –  $\text{FeO} \times 100 / (\text{FeO} + \text{MgO})$  – 50 и более процентов. Этот шпинелид интенсивно фиксировал железо и магний, в результате чего в апобиотитовой остаточной массе железа оставалось не более 59%, а магния не более 6% по сравнению с исходным биотитом. Лишь небольшое количество этих компонентов выносилось в меж-

зерновой расплав селективного плавления, где они смешивались с веществом плагиоклаза и кварца.

Четвертый уровень КК определяет очередность выноса ионов, присутствующих в минерале в одной и той же позиции, но имеющих разные радиусы ионов. Например, из граната железо ( $\text{КЧ} = \text{VIII}$ ,  $R_i = 0.80 \text{ \AA}$ ) мигрирует быстрее, чем марганец ( $\text{КЧ} = \text{VIII}$ ,  $R_i = 0.91 \text{ \AA}$ ), алюминий из ставролита ( $\text{КЧ} = \text{VI}$ ,  $R_i = 0.57 \text{ \AA}$ ) быстрее железа ( $\text{КЧ} = \text{VI}$ ,  $R_i = 0.67 \text{ \AA}$ ) (рис. 3), натрий из полевых шпатов ( $\text{КЧ} = \text{X}$ ,  $R_i = 0.98 \text{ \AA}$ ) раньше калия ( $\text{КЧ} = \text{X}$ ,  $R_i = 1.33 \text{ \AA}$ ) и т.д.

Интенсивность миграции химических компонентов нарастает по мере увеличения ударно-волновых напряжений (рис. 3). Это четко выявляет статистическая обработка изменения содержания компонентов в том или ином минерале по радиусу шара. Во внешней зоне (зоне трещиноватости) миграция растет слабо и дисперсии содержаний невелики. С переходом к аморфизации (или УТР) вещества интенсивность миграции резко возрастает и при этом быстро увеличиваются дисперсии содержаний – происходит размывание стехиометрического состава минерала.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 03–05–64496).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов Е.А., Елькин В.М., Литвинов Б.В. и др. // ДАН. 1996. Т. 351. № 6. С. 756–759.
2. Козлов Е.А., Жугин Ю.Н., Литвинов Б.В. и др. // ДАН. 1997. Т. 355. № 3. С. 328–332.
3. Сазонова Л.В., Козлов Е.А., Жугин Ю.Н. // Геохимия. 1998. № 7. С. 687–694.
4. Сазонова Л.В., Козлов Е.А., Жугин Ю.Н. // ДАН. 1997. Т.357. № 3. С. 395–398.
5. Козлов Е.А., Жугин Ю.Н., Литвинов Б.В. и др. // ДАН. 1998. Т. 361. № 3. С. 333–336.
6. Козлов Е.А., Сазонова Л.В., Фельдман В.И. и др. // ДАН. 2003. Т. 390. № 3. С. 379–381.