

PACS: 62.50.+p, 91.60.Gf, 91.60.-x

И.В. Белятинская<sup>1,2</sup>, В.И. Фельдман<sup>1</sup>, В.В. Милявский<sup>2</sup>, Т.И. Бородина<sup>2</sup>

## УДАРНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ ПОЛОСЧАТОГО АМФИБОЛИТА

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
Воробьевы горы, г. Москва, 119899, Россия

<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур РАН  
ул. Ижорская, 13, строение 2, г. Москва, 125412, Россия

*Проведено ударно-волновое нагружение полосчатого амфиболита с Южного Урала в ампулах сохранения плоской геометрии (ступенчатое ударно-волновое сжатие) с последующим изучением ударно-метаморфических трансформаций породообразующих минералов – плагиоклаза, амфибола, клинопироксена, скаполита. Максимальные ударные давления составляли 26, 36 и 52 GPa. В ходе исследований выявлены механические и химические преобразования породообразующих минералов. Наиболее сильные изменения наблюдаются в плагиоклазе: при 36 GPa минерал практически полностью аморфизован, фиксируется вынос  $Na^+$ , а при 52 GPa  $Ca^{2+}$  тоже начинает выноситься. Преобразования в амфиболе выражены слабее: при 36 GPa он сильно трещиноват и практически не аморфизован, а при 52 GPa минерал аморфизуется лишь наполовину. В клинопироксене и скаполите фиксируются лишь слабые диаплектовые трансформации. Наблюдаемая последовательность нарастания изменений в минералах при ступенчатом ударно-волновом сжатии соответствует установленному ранее ряду ударно-термического разложения силикатов.*

### Введение

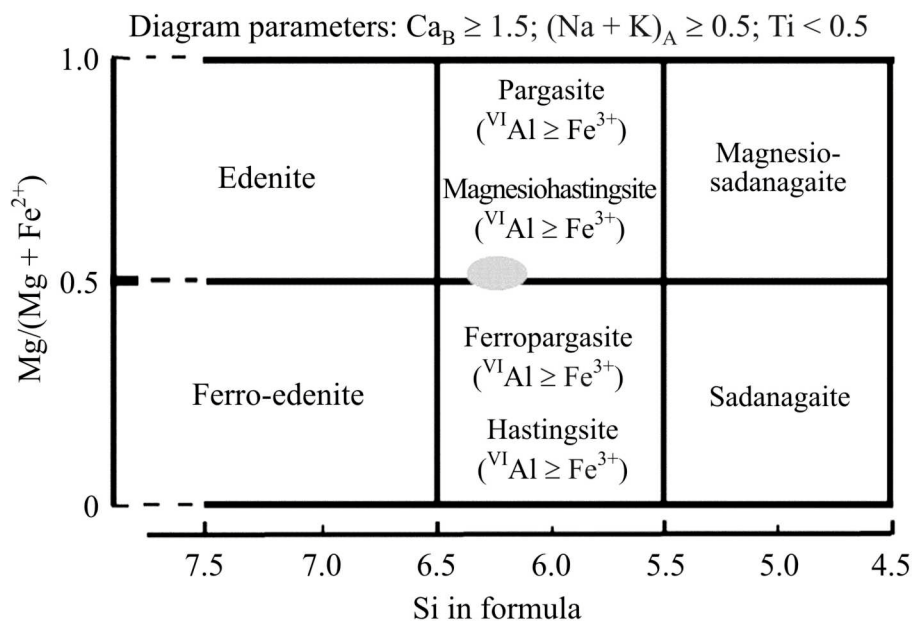
Изучение геологии, петрологии и механизмов формирования природных импактных структур (астроблем) и горных пород ударного метаморфизма вносит важный вклад в представления о строении и развитии литосферы Земли. Эксперименты по ударно-волновому нагружению горных пород не только позволяют в лабораторных условиях изучить процессы, происходящие при падении метеоритов, образовании импактных структур и специфических горных пород ударного метаморфизма – импактитов, но и помогают развитию различных научных геологических направлений, являются важным аспектом исследований нашей планеты и других космических тел.

В данной работе было проведено изучение закономерностей ударно-метаморфических преобразований породообразующих минералов (плагиок-

лаз, амфибол, клинопироксен, скаполит) полосчатых кристаллических сланцев, которые были подвергнуты воздействию ударных волн в ампулах сохранения плоской геометрии.

**Исходные образцы, подготовка эксперимента, методика исследования**

Исходные образцы для проведения экспериментов были отобраны из протерозойских пород, развитых к востоку от г. Миасс на Южном Урале. Исходный плагиоклаз по химическому составу является существенно натровым и отвечает границе олигоклаза–андезина  $An_{28-33}$ . Исходные амфиболы относятся к группе моноклиновых кальциевых амфиболов и являются магнезиопаргасситами (рис. 1). Исходный клинопироксен относится к кальциевым моноклиновым пироксенам и по химическому составу является железистым членом ряда диопсид–геденбергита. Исходный скаполит относится к миццонитам (содержание мейонитового, т.е. кальциевого, компонента достигает 53–71 mol.%).



**Рис. 1.** Химические составы исходных амфиболов (область, закрашенная серым) в сравнении с систематикой [4]

Методика экспериментов по физическому моделированию импактных процессов представлена в работах [1–3]. Максимальные ударные давления в экспериментах составляли 26, 36 и 52 GPa и достигались в течение нескольких циркуляций волн в образце (ступенчатое ударно-волновое сжатие). Изучение минералов исходных пород и тех, что испытали ударно-волновое нагружение, проводилось с применением оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), микрозондового и рентгенофазового (РФА) анализов.

Результаты

При исследовании влияния плоских ударных волн на породообразующие минералы были выявлены их механические и химические преобразования. Механические трансформации заключаются в основном в формировании трещиноватости в минералах и их аморфизации, а химические преобразования – в привносе или выносе тех или иных компонентов. При 26 GPa во всех изученных минералах фиксируются только механические преобразования – наблюдается интенсивное растрескивание. При 36 и 52 GPa ярко выражены различия в ударно-метаморфических преобразованиях исследованных минералов.

**Плагиоклаз.** Наиболее сильные трансформации, как механические, так и химические, характерны для плагиоклаза. При 36 GPa 90 wt.% плагиоклаза аморфизовано. Реликты кристаллического плагиоклаза настолько малы, что практически неотличимы от аморфизованного плагиоклаза под оптическим микроскопом.

В СЭМ они выделяются на фоне светло-серой аморфизованной массы темно-серым цветом и грубыми открытыми трещинами (рис. 2). В этих реликтах фиксируется уменьшение размера кристаллитов от 100 nm в исходном образце до 15 nm. При 36 GPa также наблюдается изменение химического состава плагиоклаза. Из аморфизованного плагиоклаза интенсивно выносится  $Na^+$  (рис. 3). В реликтах кристаллического плагиоклаза количество каких-либо элементов статистически не уменьшается.

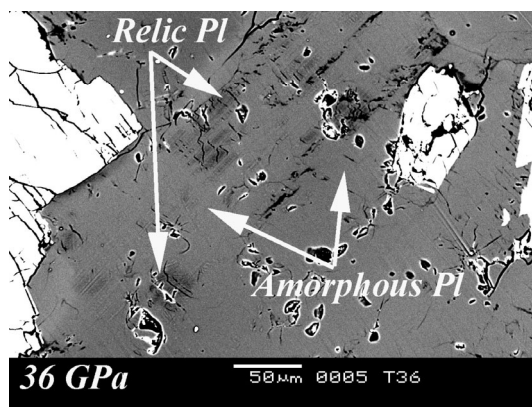


Рис. 2. Аморфизованный плагиоклаз (Pl) с реликтами кристаллического плагиоклаза (ударное давление 36 GPa)

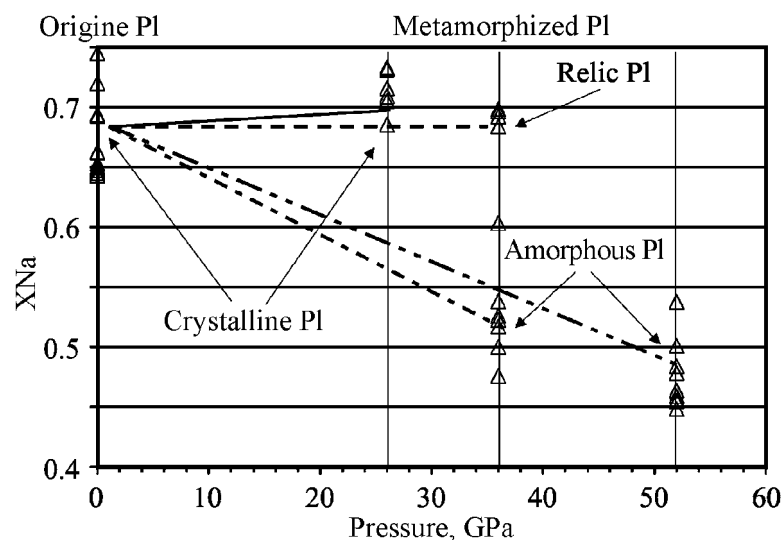
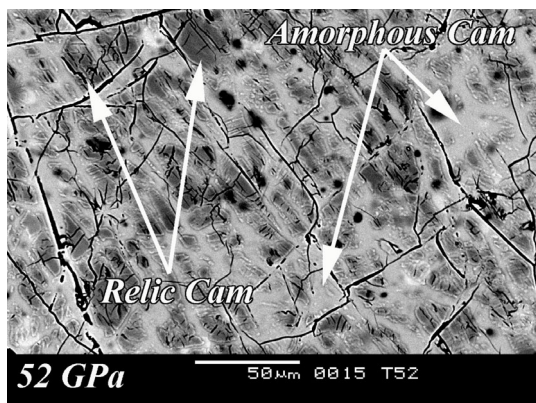


Рис. 3. Изменение содержания натрия в Pl при воздействии ударной волны

При 52 GPa плагиоклаз аморфизован полностью. При этом давлении помимо  $\text{Na}^+$  из плагиоклаза начинает выноситься и  $\text{Ca}^{2+}$ .

Кроме того, при 36 и 52 GPa в аморфизованном плагиоклазе фиксируется снижение суммы катионов (с 1.0 формульных единиц (f.u.) в исходном плагиоклазе до 0.77–0.86 f.u. при 36 GPa и 0.72–0.86 f.u. при 52 GPa). Также наблюдается изменение суммы  $\text{Al}^{3+} + \text{Si}^{4+}$  (в исходном плагиоклазе сумма  $\text{Al}^{3+} + \text{Si}^{4+}$  составляла  $4.00 \pm 0.01$ , а в аморфизованном –  $4.05 \pm 0.01$  при 36 GPa и  $4.06 \pm 0.02$  при 52 GPa). Эти факты свидетельствуют о начале плавления минерала, так как очевидно начало разложения алюмосиликатных тетраэдров.

**Амфибол.** Преобразования амфибола не так сильны, как изменения плагиоклаза. При 36 GPa все зерна амфибола покрыты обширной системой грубых открытых трещин (в амфиболе наблюдается пик трещиноватости), но аморфизация минерала при данном давлении не обнаружена.



**Рис. 4.** Реликты трещиноватого амфибола (Cam) среди прожилков и линз аморфизованного амфибола (ударное давление 52 GPa)

При 52 GPa фиксируется аморфизация амфибола (количество аморфизованного амфибола оценивается в 50 wt.% и более). Аморфизация минерала начинается вдоль трещин. Они становятся похожи на тонкие прожилки, заполненные аморфизованным материалом. При движении к краям зерен трещины часто становятся более широкими, и от кристаллического амфибола остаются только реликты (рис. 4). Изменения параметров кристаллической решетки и диспергация кристаллитов амфибола в наших экспериментах не обнаружены.

В амфиболе и при 36, и при 52 GPa фиксируются вынос  $\text{Fe}^{2+}$  и привнос  $\text{Mg}^{2+}$ , более выраженный в трещиноватом амфиболе при 36 GPa. Кроме того, при исследованных нагрузках в амфиболе выявлен вынос  $\text{Al}^{3+}$ , интенсивность которого выше при 52 GPa.

**Клинопироксен и скаполит.** Ударно-метаморфические трансформации в клинопироксене и скаполите выражены слабее, чем в других породообразующих минералах. Для этих минералов в исследованном диапазоне ударных нагрузок ни аморфизация, ни миграция компонентов не зафиксированы – среди всех видов трансформаций в них отмечается только растрескивание.

### Выводы

Ранее были изучены ударно-метаморфические трансформации породообразующих минералов этого же амфиболита в экспериментах со сферической сходящейся ударной волной [5]. При сравнении характера изменений поро-

дообразующих минералов, вызванных воздействием сферической сходящейся ударной волны и являющихся результатом ступенчатого ударно-волнового сжатия, были выявлены значимые различия. Так, в сферических сходящихся ударных волнах амфибол уже при 40 GPa испытывает ударно-термическое разложение с возникновением агрегата андезина, амфибола и рудного минерала, чего не происходит при ступенчатом ударно-волновом сжатии даже при 52 GPa. Подобная ситуация имеет место и для пироксена – в сферических ударных волнах в интервале 40–60 GPa он превращается в агрегат плагиоклаза, амфибола, клинопироксена и магнетита. Скаполит в сферических ударных волнах в этом же интервале давлений претерпевает химические преобразования (привнос  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  и вынос  $\text{Al}^{3+}$  и  $\text{Na}^+$ ), чего не наблюдается при ступенчатом ударно-волновом сжатии. Различия в диаплектовых преобразованиях минералов, вероятно, вызваны тем, что в цикле ступенчатого ударно-волнового сжатия реализуется более низкая (по сравнению с нагружением сферической сходящейся волной) ударная температура.

Тем не менее наблюдаемая в данной работе последовательность нарастания изменений в минералах при нагружении пород плоской ударной волной (ступенчатое ударно-волновое сжатие) соответствует установленному ранее [6] ряду ударно-термического разложения: слоистые–ленточные–цепочечные силикаты и алюмосиликаты–силикаты с одиночными тетраэдрами.

Работа поддержана РФФИ (проект № 09-05-00211).

1. *V.I. Fel'dman, L.V. Sazonova, V.V. Milyavskii, T.I. Borodina, S.N. Sokolov, A.Z. Zhuk, Izvestiya, Physics of the Solid Earth* **42**, 477 (2006).
2. *L.V. Sazonova, V.V. Milyavskii, T.I. Borodina, S.N. Sokolov, A.Z. Zhuk, Izvestiya, Physics of the Solid Earth* **43**, 707 (2007).
3. *В.В. Милявский, Л.В. Сазонова, И.В. Белятинская, Т.И. Бородин, Д.М. Жерноклетов, С.Н. Соколов, А.З. Жук, ФТВД* **17**, № 1, 126 (2007).
4. *B.E. Leake, A.R. Wooley, C.E.S. Arps, W.D. Birch, M.C. Gilbert, J.D. Grice, F.C. Hawthorne, A. Kato, H.J. Kisch, V.G. Krivovichev, K. Linthout, J. Laird, J.A. Mandarino, W.V. Maresch, E.H. Nickel, N.M.S. Rock, J.C. Schumacher, D.C. Smith, N.C.N. Stephenson, L. Ungaretti, E.J.W. Whittaker, Y.Z. Guo, Canadian mineralogist* **35**, 219 (1997).
5. *V.I. Feldman, E.A. Kozlov, Yu.N. Zhugin*, in: Abstracts of 6<sup>th</sup> workshop of the ESF-Impact programme: Impact makers in the stratigraphic record, Spain, Granada, May 19–25 (2001), p. 29.
6. *Е.А. Козлов, Л.В. Сазонова, В.И. Фельдман, Н.А. Дубровинская, Л.С. Дубровинский*, в сб.: Тезисы докладов Российской конференции «Фазовые превращения при высоких давлениях», Россия, Московская обл., г. Черноголовка, 20–22 мая (2002), с. У13.

*I.V. Білятинська, В.І. Фельдман, В.В. Мілявський, Т.І. Бородіна*

## УДАРНИЙ МЕТАМОРФІЗМ ПОРОДОУТВОРЮЮЧИХ МІНЕРАЛІВ СМУЖЧАТОГО АМФІБОЛІТУ

Проведено ударно-хвильове навантаження смужчатого амфіболіту з Південного Уралу в ампулах збереження плоскої геометрії (ступінчасте ударно-хвильове стиснення) з подальшим вивченням ударно-метаморфічних трансформацій породоутворюючих мінералів – плагіоклазу, амфіболу, клінопіроксену, скаполіту. Максимальний ударний тиск складав 26, 36 і 52 GPa. В ході досліджень виявлено механічні і хімічні перетворення породоутворюючих мінералів. Найбільш сильні зміни спостерігаються в плагіоклазі: при 36 GPa мінерал практично повністю аморфізований, фіксується винесення  $\text{Na}^+$ , а при 52 GPa спостерігається винесення  $\text{Ca}^{2+}$ . Перетворення в амфіболіті виражені слабкіше: при 36 GPa він сильно тріщинуватий і практично не аморфізований, а при 52 GPa мінерал аморфізується лише наполовину. У клінопіроксені та скаполіті фіксуються лише слабкі діаплектові трансформації. Спостережувана послідовність наростання змін в мінералах при ступінчастому ударно-хвильовому стисненні відповідає встановленому раніше ряду ударно-термічного розкладання силікатів.

*I.V. Belyatinskaya, V.I. Fel'dman, V.V. Milyavskiy, T.I. Borodina*

## SHOCK METAMORPHISM OF STREAKY AMPHIBOLITE ROCK-FORMING MINERALS

Shock-wave loading of Southern Ural's streaky amphibolite were carried out in recovery ampoules (step-like shock compression). Shock-induced transformations of rock-forming minerals (amphibole, plagioclase, clinopyroxene, scapolite) were studied. The maximal shock pressures were 26, 36 and 52 GPa. In the course of studying mechanical and chemical transformations of rock-forming minerals were observed. The strongest transformations were observed in plagioclase: at 36 GPa the mineral almost completely became amorphous, escape of  $\text{Na}^+$  was fixed, and at 52 GPa  $\text{Ca}^{2+}$  started escaping too. Transformations of amphibole were less pronounced: at 36 GPa it was heavily cracked, but almost did not become amorphous, and at 52 GPa it became semiamorphous. Clinopyroxene and scapolite revealed just weak diaplectic transformations. The observed consistency of shock-induced changes of minerals under step-like shock compression corresponds to previously ascertained shock-thermal decomposition row of silicates.

**Fig. 1.** Composition of the pristine amphibole (grey area) in comparison with the systematics [4]

**Fig. 2.** Amorphous plagioclase (Pl) with crystalline plagioclase relics (shock pressure 36 GPa)

**Fig. 3.** Changing of Na concentration in Pl under shock wave influence

**Fig. 4.** Crystalline amphibole (Cam) relics among streaks and lenses of amorphous amphibole (shock pressure 52 GPa)