

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

В.В. Милявский¹, Л.В. Сазонова², И.В. Белятинская², Т.И. Бородина¹,
Д.М. Жерноклетов¹, С.Н. Соколов¹, А.З. Жук¹

УДАРНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ ПЛАГИОКЛАЗА И АМФИБОЛА ПРИ СТУПЕНЧАТОМ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД

¹Институт теплофизики экстремальных состояний Объединенного института высоких температур РАН

ул. Ижорская, 13/19, г. Москва, 125412, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
г. Москва, 119899, Россия

Проведено экспериментальное исследование характера ударного метаморфизма плагиоклаз (Pl)-амфиболового (Amf) сланца с гранатом (Южный Урал) и клинопироксен-Amf-Pl-сланца (Анабарский щит) при ударно-волновом нагружении в ампулах сохранения плоской геометрии. Максимальное ударное давление в образцах варьировалось в диапазоне 26–52 GPa. Установлено, что повышение содержания F, Ti и K в составе Amf, как и понижение содержания Ca в составе Pl, делает эти минералы более устойчивыми к воздействию ударных волн. Изотропизация Pl в экспериментах по ступенчатому ударно-волновому сжатию полиминеральных горных пород начинается при более низких давлениях, чем в аналогичных экспериментах с мономинеральными образцами. При относительно низких давлениях изотропизация Pl обусловлена дроблением вещества на микроуровне и сопровождается образованием маскелинита – типичного минерала метеоритов и пород астроблем. При более высоких давлениях изотропизация Pl связана с аморфизацией вещества в результате плавления.

Введение

Процессы ударного метаморфизма, связанные с соударением космических тел с планетами, в значительной степени определяют состав коры и строение поверхности этих планет. По широко распространенным в настоящее время представлениям, образованию планет сопутствовали интенсивные импактные явления, сопровождавшие аккрецию [1]. Многочисленные признаки импактного и термального метаморфизма, присутствующие в различных метеоритах, указывают на интенсивный импактогенез родительских тел этих метеоритов [2]. Изучение астроблем и горных пород – импактитов, возникающих при соударении крупных метеоритов и астероидов с поверхностью Земли, вносит важный вклад в представления о строении и развитии ее литосферы. В настоящее время в центре внимания исследователей импак-

тогенеза находится детальное изучение химических, структурных и фазовых превращений минералов горных пород в ударных волнах. Механизмы и параметры таких превращений изучаются с помощью физического моделирования импактных процессов в лабораторных условиях [3–6].

В данной работе проведено сравнительное исследование характера ударного метаморфизма минералов групп Pl и Amf при ударно-волновом нагружении в области давлений 26–52 GPa. Основной задачей является сравнение поведения в ударных волнах минералов одних и тех же групп, т.е. обладающих близкими кристаллическими структурами, но имеющих разные химические составы.

Исходные образцы

Образцы Pl-Amf-сланца с гранатом для исследований были отобраны на Южном Урале в обнажении пород Фирсовской толщи, вдоль трассы Уфа–Челябинск, в 5 km от Миасса в сторону Челябинска (образец ДН-31/1). Образцы клинопироксен-Amf-Pl-сланца отбирались из пород Анабарского щита, являющихся мишенью для астроблемы Попигай (образец 73-509a-1).

Образец ДН-31/1 имел плотность $\rho = 3.06 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$. Средние по пяти измерениям в разных точках образца на частоте 2.5 MHz значения продольной C_l и поперечной C_t скоростей звука составляли: $C_l = 5.31 \pm 0.10 \text{ km/s}$, $C_t = 3.30 \pm 0.05 \text{ km/s}$. Главные породообразующие минералы образца ДН-31/1 – Amf (60 vol.%) и Pl (30 vol.%), второстепенные – гранат и кварц (каждый до 5 vol.%), акцессорный минерал – магнетит.

Главные породообразующие минералы образца 73-509a-1 ($\rho = 3.07 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$, $C_l = 5.07 \pm 0.20 \text{ km/s}$, $C_t = 3.02 \pm 0.10 \text{ km/s}$) – Pl (50 vol.%), Amf (30 vol.%) и клинопироксен (20 vol.%). В качестве второстепенного минерала в виде отдельных мелких зерен присутствовал кварц. Акцессорный минерал – магнетит.

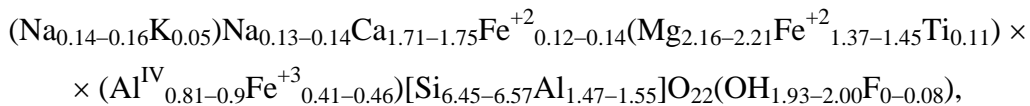
Породы образца ДН-31/1 образовались в условиях амфиболитовой фации, образца 73-509a-1 – в условиях гранулитовой фации.

Плагиоклаз. По данным рентгенофазового анализа (РФА), Pl обоих образцов имеют триклинные кристаллические решетки с близкими параметрами (в скобках указаны значения, соответствующие образцу 73-509a-1): $a = 0.8165 (0.8165) \text{ nm}$, $b = 1.2874 (1.2863) \text{ nm}$, $c = 0.7109 (0.7102) \text{ nm}$, $\alpha = 93.38^\circ (93.34^\circ)$, $\beta = 116.23^\circ (116.15^\circ)$, $\gamma = 90.51^\circ (90.32^\circ)$. Размер областей когерентного рассеяния (ОКР) – не менее 100 nm. По данным микронзондового анализа, Pl обоих образцов являются андезинами. Pl образца ДН-31/1 соответствует химическая формула $(\text{Na}_{0.68-0.71}\text{Ca}_{0.30-0.32}\text{K}_{0.01})[\text{Al}_{1.28-1.31}\text{Si}_{2.68-2.71}]$, а Pl образца 73-509a-1 – $(\text{Na}_{0.51-0.55}\text{Ca}_{0.46-0.49}\text{K}_{0.01-0.02})[\text{Al}_{1.43-1.46}\text{Si}_{2.53-2.55}]$. Как видно, Pl образца 73-509a-1 содержит больше кальция и меньше натрия (анортитовая составляющая An ~ 45–48), чем Pl образца ДН-31/1 (An ~ 30–31). Микронзондовые профили, выполненные поперек зерен, не выявили какой-либо закономерной зональности.

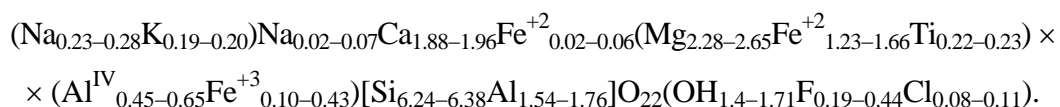
Амфибол. По данным РФА, Amf обоих образцов имеют моноклинную кристаллическую решетку с близкими параметрами (в скобках указаны зна-

чения, соответствующие образцу 73-509а-1): $a = 0.9850$ (0.9854) nm, $b = 1.8034$ (1.8066) nm, $c = 0.5276$ (0.5270) nm, $\beta = 105.43^\circ$ (105.43°). Размер ОКР – не менее 100 nm.

По данным микронзондового анализа, Amf обоих образцов входят в подгруппу кальциевых амфиболов. Amf образца ДН-31/1 соответствует химическая формула



а Amf образца 73-509а-1 –



Согласно современной международной структурно-химической классификации [7] Amf образца ДН-31/1 относится к ряду магнезиальных роговых обманок, а Amf образца 73-509а-1 – к ряду чермакитовых роговых обманок. Таким образом, Amf образца 73-509а-1 отличается от Amf образца ДН-31/1 более высоким содержанием F, Ti и K.

Методика эксперимента

Образцы породы в виде дисков с диаметром 25 mm помещали между двумя медными дисками (толщиной 1 и 2 mm) в стальные (40X13) ампулы сохранения плоской геометрии с наружным диаметром 62 mm. Экспериментальные сборки (рис. 1), состоящие из ампулы сохранения, стального охранного кольца с наружным диаметром 150 mm и массивного стального основания, нагружали плоским ударом алюминиевых (Д16Т) пластин диаметром 90 mm, разгоняемых при помощи взрывных метательных устройств (ВМУ).

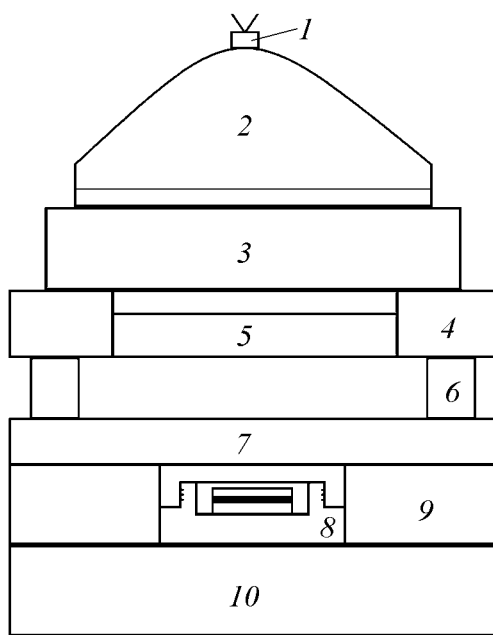


Рис. 1. Экспериментальная сборка: 1 – детонатор; 2 – генератор плоской ударной волны; 3 – взрывчатое вещество; 4 – направляющее кольцо; 5 – ударник; 6 – столбики, задающие подлетную базу (25 mm); 7 – пластина-ослабитель (ПММА); 8 – ампула сохранения; 9 – охранный диск; 10 – основание

Таблица 1

Параметры ударно-волнового нагружения

Максимальное давление, GPa	26	36	52
Толщина ударника, mm	10	10	5
Скорость ударника, km/s	2.5	2.5	3.35
Толщина пластины-ослабителя, mm	9	–	–
Толщина образца, mm	1	2	1
h^* , mm	8	10	8

* h – расстояние от верхней (обращенной к ударнику) поверхности образца до верхней поверхности ампулы сохранения.

Максимальное ударное давление достигалось в течение нескольких циркуляций волн в образце (ступенчатое ударно-волновое сжатие) и составляло 26, 36 и 52 GPa. Характерные для использованных в данной работе сборок сохранения и ВМУ зависимости давления в исследуемом материале от времени нагружения приведены в работе [8], а конкретные параметры нагружения – в табл. 1.

Изучение минералов, испытавших ударные нагрузки, проводили методами оптической и сканирующей электронной микроскопии на электронном микроскопе CamScan-4DV. Химические составы минералов определяли на микрозонде SX 100. Фазовые составы образцов исследовали методами РФА на установке ДРОН-3М. Использовали $\text{Cu } K_{\alpha}$ -излучение. Количественный фазовый анализ проводили методом внутреннего стандарта. В качестве стандартного вещества использовали алмаз.

Плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания на весах OHAUS Analytical Plus AP210. Продольную и поперечную скорости звука в образцах определяли на установке «УЗИС-ГЭТУ», разработанной на кафедре электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», методом измерения времени однократного прохождения ультразвукового импульса через образец. Необходимо отметить, что в исследованном диапазоне частот (1.25–5 MHz) результаты измерений скорости звука в образцах породы значительно зависели от частоты, на которой проводились измерения.

Результаты

Плагиоклаз. Особенности ударно-метаморфических преобразований Pl образцов ДН-31/1 и 73-509а-1 суммированы в табл. 2. При ударной нагрузке 26 GPa плагиоклаз образца ДН-31/1 ($A_n \sim 30\text{--}31$) испытывает преимущественно механические деформации (волнистое и блоковое погасание), изотропизирована лишь небольшая часть зерен. В то же время большая часть зерен Pl образца 73-509а-1 ($A_n \sim 45\text{--}48$) интенсивно изотропизируется уже при этом давлении. Рентгеноструктурные исследования показали, что размер ОКР неизотропизированного Pl обоих образцов составляет ~ 40 nm (ОКР Pl до эксперимента – более 100 nm). Остальная часть Pl-фазы в обоих образцах преимущественно находится в мелкодисперсном состоянии с размером ОКР 1–2 nm.

Особенности ударно-метаморфических преобразований PI

Давление, GPa	Изотропизация		Состояние		Вынос Na	
	ДН-31/1	73-509a-1	ДН-31/1	73-509a-1	ДН-31/1	73-509a-1
26	+	++	Мелкодисперсное		0	
36	+++		Аморфное		36	9
52					14.5	3.8

Примечание. Особенности исходных PI образцов ДН-31/1 и 73-509a-1: An составляет соответственно 30–31 и 45–48; содержание в породе (vol.%) – соответственно 30 и 50.

При нагрузках 36 и 52 GPa плагиоклазы обеих пород практически полностью изотропизируются. После нагрузки 36 GPa в обоих образцах количество кристаллического PI не превышает 2 wt.%, а остальная часть PI-фазы преимущественно находится в аморфном состоянии. Размер ОКР кристаллического PI составляет 20 и 40 nm (для образцов ДН-31/1 и 73-509a-1 соответственно). После нагружения до давления 52 GPa практически 100% PI-фазы в обоих образцах является аморфной, что, видимо, связано с полным плавлением PI при указанных давлениях. Такой вывод подтверждается данными СЭМ: PI-фаза при этих давлениях часто имеет пузыристую (пористую) текстуру (рис. 2) и местами обладает перлитовой отдельностью, что характерно для стекол, образующихся при застывании жидкого расплава.

Исследования химических составов ударно-метаморфизованных PI-фаз на микрозонде показали, что уже начиная с 26 GPa в зернах PI обоих образцов зафиксирована миграция Ca и Na в пределах отдельных зерен. При 36 и 52 GPa на фоне продолжающегося увеличения интенсивности миграции Ca в пределах отдельных зерен Na выносятся за пределы зерен в значимых количествах в расплав, возникающий по трещинам и в межзерновом пространстве.

Таким образом, в проведенных экспериментах выявлено два механизма изотропизации PI: при нагрузке 26 GPa – мелкодисперсное дробление материала на микроуровне, сопровождающееся образованием маскелинита, при 36 и 52 GPa – аморфизация, связанная с плавлением.

Результаты проведенных экспериментов хорошо согласуются с природными данными. Как показывают исследования ударно-метаморфизованных гнейсов из астроблемы Попигай [9], PI андезинового состава (An ~ 31–37) при ударных нагрузках око-

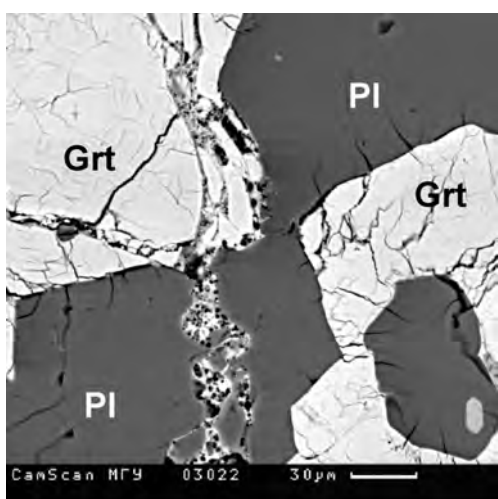


Рис. 2. Участки пористого материала в PI образца ДН-31/1, испытавшего ударную нагрузку 52 GPa

ло 20 GPa испытывает только механические трансформации; при нагрузках около 30 GPa по Pl преимущественно образуется диаплектовое стекло (маскеленит), т.е. происходит изотропизация Pl без плавления; при нагрузках 45–55 GPa по Pl образуется ударное стекло плавления.

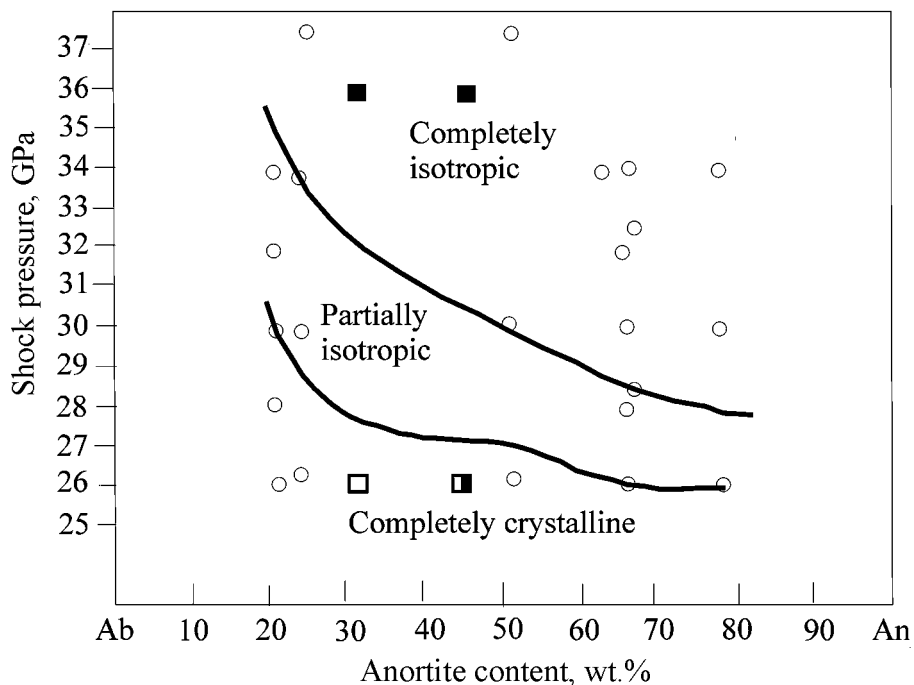


Рис. 3. Зависимость степени изотропизации Pl от его состава (содержания An) [10]: ○ – экспериментальные данные [10]; □, ◻, ■ – соответственно неизотропизированный, частично изотропизированный и полностью изотропизированный Pl (результаты настоящей работы)

Сопоставление полученных данных с результатами экспериментов по ударно-волновому нагружению мономинеральных образцов Pl подтверждает обнаруженную ранее тенденцию [10]: чем выше An в составе Pl, тем меньше ударное давление, при котором он изотропизируется (рис. 3). В то же время при ударно-волновом нагружении изотропизация Pl из полиминеральной породы образца 73-509a-1 фиксируется при более низких давлениях, чем изотропизация в экспериментах [10] с мономинеральными образцами близкого состава, что может являться следствием особенностей прохождения ударной волны в моно- и полиминеральных породах.

Амфибол. Особенности ударно-метаморфических преобразований Amf образцов ДН-31/1 и 73-509a-1 суммированы в табл. 3. При амплитуде ударных нагрузок 26, 36 и 52 GPa характерно появление в Amf обеих пород трещиноватости (рис. 4). Трещины в основном открытые, часть из них подчиняется кристаллографическим направлениям. При нарастании силы ударного давления количество трещин на единицу площади увеличивается. При ударной нагрузке 52 GPa в Amf образца 73-509a-1 вдоль отдельных трещин развивается несколько отличный по окраске материал, по составу аналогичный Amf. Вероятно,

вдоль трещин происходит частичная аморфизация Amf (рис. 4,д). Никакие другие ударно-метаморфические трансформации, а также миграции элементов для Amf образца 73-509a-1 в исследованном диапазоне давлений не обнаружены.

Таблица 3

Особенности ударно-метаморфических преобразований Amf

Давление, GPa	Механические трансформации		Аморфизация		Миграция элементов		Размер ОКР, nm		V, nm ³	
	ДН-31/1	73-509a-1	ДН-31/1	73-509a-1	ДН-31/1	73-509a-1	ДН-31/1	73-509a-1	ДН-31/1	73-509a-1
26	+		-		+	-	≥ 100		903.85	904.49
36	++						50		≥ 100	901.44
52	+++		++	Следы	++	45		30	910.79	915.64

Примечание. Особенности исходных Amf образцов ДН-31/1 и 73-509a-1: содержание в породе (wt.%) составляет соответственно 60 и 30, размер ОКР (nm) – для обоих ≥ 100; объем элементарной ячейки V (nm³) – соответственно 903.36 и 904.31.

В Amf образца ДН-31/1 при амплитуде ударной нагрузки 52 GPa фиксируется аморфизация в результате плавления вдоль многочисленных трещин. К краям зерен трещины становятся шире, сеть их сгущается, фрагменты нерасплавленного амфибола округляются, приобретают изъеденные, корродированные формы. Местами по краям зерен Amf появляются участки, насыщенные пустотами – следы ухода флюидной фазы. Именно такие участки Amf являются доказательством того, что мы имеем дело с плавлением («вскипанием») этого минерала (рис. 4,е). Химический состав стекла в трещинах и по краям зерен близок к составу Amf. Это позволяет предположить, что соответствующие участки расплава по Amf застывали практически мгновенно, без перемещения и смешивания с расплавом по другим минералам (в частности, Pl). Иногда вдоль трещин появляется мельчайшая осыпь рудного минерала (предположительно, магнетита). По данным РФА, количество подвергшегося аморфизации Amf составляет ~ 20 wt.%.

Содержание FeO в Amf образца ДН-31/1 статистически значимо уменьшается по сравнению с исходным как в зернах трещиноватых Amf, испытавших ударные нагрузки 26, 36 и 52 GPa, так и в стекле, образованном по Amf при 52 GPa, но в последнем это уменьшение более интенсивное. Уменьшение количества данного элемента связано с выносом (миграцией) его из Amf-фазы. При этом часть железа уходит в Pl-фазу, а часть, окисляясь, входит в новообразованную фазу – оксид, который иногда образует мельчайшую осыпь вдоль трещин в Amf. Содержание MgO, напротив, статистически значимо увеличивается по сравнению с исходным в амфиболах, испытавших ударные нагрузки 26, 36 и 52 GPa. Но в пузырьчатом стекле, образованном по Amf при 52 GPa, его содержание резко падает. Кроме того, в Amf образца ДН-31/1 отмечается увеличение дисперсии массовых содержаний многих химических элементов, возрастающее с ростом ударного давления от 36 к 52 GPa, что указывает на миграцию элементов внутри отдельных зерен.

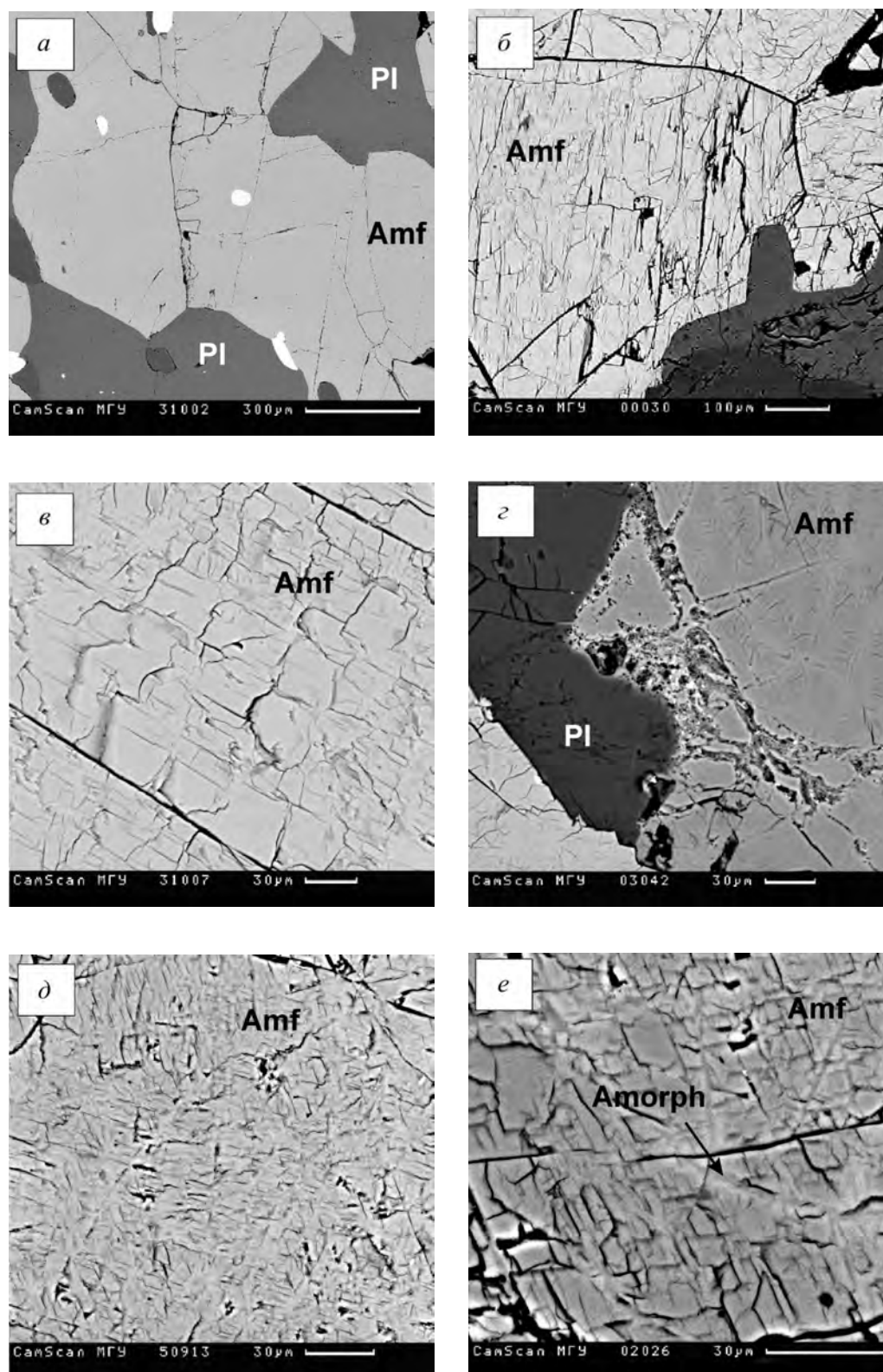


Рис. 4. Амфибол в образцах кристаллических сланцев: ДН-31/1: *a* – исходный; *b*, *в*, *г* – испытывавшие ударную нагрузку (GPa) соответственно 26, 36 и 52; 73-509а-1: *д*, *е* – испытывавшие нагрузку (GPa) соответственно 36 и 52

Результаты рентгеноструктурных исследований ударно-метаморфизованных фаз выявляют для Amf образца 73-509a-1 монотонное увеличение объема элементарной ячейки с ростом ударного давления (см. табл. 3), что, вероятно, связано с увеличением количества дефектов в кристаллической решетке Amf в результате прохождения ударной волны. В то же время объем элементарной ячейки Amf образца ДН-31/1, испытавшего ударную нагрузку 36 GPa, уменьшается примерно на 0.2% по сравнению с исходным, а при 52 GPa – увеличивается. Можно предположить, что немонотонный характер изменения объема V элементарной ячейки Amf в данном случае связан с конкуренцией двух процессов: ростом дефектности кристаллической решетки, что приводит к увеличению V , и изменением химического состава ударно-метаморфизованных Amf образца ДН-31/1, что приводит к уменьшению V (в первую очередь за счет обезвоживания Amf).

В сравнении с другими главными породообразующими минералами ударно-метаморфические трансформации амфибола изучены значительно хуже [1]. При амплитуде ударных нагрузок до 20 GPa в Amf из ударно-метаморфизованных пород астроблем фиксируются только механические деформации и образование планарных элементов. При более высоких нагрузках лишь для роговой обманки из импактированных амфиболитов и плагиогнейсов Пучеж-Катунской астроблемы, по составу близкой к Amf образца ДН-31/1, зафиксировано ударно-термическое разложение с образованием новых фаз [11].

В статических условиях на стабильность Amf влияют самые разнообразные причины. В частности, было показано, что стабильность Amf по отношению к статическому сжатию возрастает при увеличении содержания Al_2O_3 и Al(IV) [12,13].

Температура стабильности роговых обманок зависит от многих факторов, в том числе от их химического состава. Например, увеличение содержания Fe снижает, а увеличение содержания K и Ti повышает эту температуру [14]. Также известно, что увеличение содержания F в роговой обманке повышает температуру ее стабильности [15–17]. Исследования стабильности паргасита (магнезиальной высокоглиноземистой роговой обманки) в статических экспериментах показали, что фторсодержащий паргасит стабилен до 1100°C при 0.5 GPa [18] и до 1300°C при 3.5 GPa [19]. В то же время для бесфтористого паргасита верхний предел стабильности оценивается не больше, чем в 1050°C [20,21].

Как следует из полученных в данной работе экспериментальных данных, роговая обманка, которая является более фтористой, содержит больше Ti и K (в нашем случае это Amf образца 73-509a-1) при ударно-волновом нагружении, так же как и в статических условиях, оказывается более стабильной. В то же время необходимо учитывать, что содержание Amf в породе 73-509a-1 в два раза ниже, чем в породе ДН-31/1, что может оказывать влияние на характер ударно-волнового сжатия Amf и, как следствие, на особенности его ударно-метаморфических трансформаций.

Выводы

Проведено сравнительное исследование характера ударного метаморфизма Pl и Amf разного химического состава в области давлений 26–52 ГПа. Показано, что уже на твердофазной стадии преобразований в Pl и Amf начинается миграция некоторых химических элементов, усиливающаяся на стадии плавления.

Установлено, что изотропизация Pl с более низким содержанием Na (и соответственно более высоким содержанием Ca) происходит при более низких ударных давлениях. Аналогичная тенденция ранее была зафиксирована в ударно-волновых экспериментах с мономинеральными образцами. В то же время изотропизация Pl в экспериментах с полиминеральными образцами наблюдается при более низких давлениях, чем в экспериментах с мономинеральными образцами.

Обнаружено, что изотропизация Pl в условиях ступенчатого ударно-волнового сжатия происходит по двум различным механизмам: при относительно низких давлениях изотропизация обусловлена дроблением вещества на микроуровне, сопровождающемся образованием маскелинита. При более высоких давлениях изотропизация связана с аморфизацией вещества в результате плавления.

Установлено, что при повышении в составе Amf содержания F, Ti и K аморфизация Amf происходит при более высоких давлениях. Аналогичная тенденция ранее была обнаружена при исследовании Amf в статических условиях.

Авторы благодарят В.И. Фельдмана (МГУ им. Ломоносова) за интерес к данной работе и полезные замечания. Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН «Исследования вещества в экстремальных условиях» и Российского фонда фундаментальных исследований.

1. В.И. Фельдман, Петрология импактитов, Изд-во Моск. ун-та, Москва (1990).
2. K. Metzler, K.D. Bobe, H. Palme, B. Spettel, D. Stöffler, Planet. Space Sci. **43**, 499 (1995).
3. D. Stöffler, Fortschr. Mineral. **49**, 50 (1972).
4. D. Stöffler, Fortschr. Mineral. **51**, 256 (1974).
5. В.И. Фельдман, Л.В. Сазонова, Е.А. Козлов, ДАН **393**, 813 (2003).
6. V.I. Fel'dman, L.V. Sazonova, V.V. Milyavskii, T.I. Borodina, S.N. Sokolov, A.Z. Zhuk, Izvestiya, Phys. Solid Earth **42**, 477 (2006).
7. 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. 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, G. Youzhi, Am. Mineral. **82**, 1019 (1997).
8. А.З. Жук, Т.И. Бородина, В.В. Милявский, В.Е. Форттов, ДАН **370**, 328 (2000).
9. Л.В. Сазонова, Геохимия **30**, 338 (1992).
10. D. Stöffler, R. Ostertag, C. Jammes, G. Pfannschmidt, Geochim. Cosmochim. Acta **50**, 889 (1986).

11. Глубокое бурение в Пучеж-Катунской импактной структуре, В.Л. Масайтис, Л.А. Певзнер (ред.), Изд-во ВСЕГЕИ, С.-Петербург (1999).
12. J.M. Hammerstrom, E. Zen, Am. Mineral. **71**, 1297 (1986).
13. L. Hollister, G. Grissom, E. Peters, Am. Mineral. **72**, 231 (1987).
14. F.S. Spear, Am. J. Sci. **281**, 697 (1981).
15. M. Gilbert, R. Helz, R. Popp, Rev. Miner. **B9**, 229 (1982).
16. T. Tsunogae, Y. Osanai, M. Owada, T. Toyoshima, T. Hokada, W.A. Crowe, Lithos **70**, 21 (2003).
17. H. Sato, S. Nakada, T. Fujii, Journal of Volcanology and Geothermal Research **89**, 197 (1999).
18. J. Holloway, C.E. Ford, Earth Planet. Sci. Lett. **25**, 44 (1975).
19. S. Foley, Geochim. Cosmochim. Acta **55**, 2689 (1991).
20. J. Holloway, Geochim. Cosmochim. Acta **37**, 651 (1973).
21. R. Lykins, D. Jenkin, Contr. Mineral. Petrol. **112**, 405 (1992).

V.V. Milyavskiy, L.V. Sazonova, I.V. Beljatinskaja, T.I. Borodina, D.M. Zhernokletov, S.N. Sokolov, A.Z. Zhuk

THE IMPACT METAMORPHISM OF PLAGIOCLASE AND AMPHIBOLE IN CONDITIONS OF STEPWISE SHOCK-WAVE COMPRESSION OF POLYMINERAL ROCKS

The impact transformations of plagioclase (Pl)-amphibole (Amf) schist with garnet (Southern Urals) and clinopyroxene-Amf-Pl schist (Anabar Shield) have been studied with use of recovery assemblies of planar geometry. In the specimens, shock pressures were ranged from 26 to 52 GPa. It was found that an increase of content of F, Ti, and K in a composition of Amf, as well as a decrease of content of Ca in a composition of Pl, make these minerals more resistant to action of shock waves. In experiments with the stepwise shock compression of polymineralic rocks the isotropization of Pl begins at lower pressures than in analogous experiments with monomineralic specimens. Under relatively low pressures, Pl isotropization is caused by its fragmentation on a microscopic scale and is associated with the origin of maskelynite – a typical mineral of meteorites and astrolemites. At higher pressures, Pl isotropization is related to amorphization by means of melting.

Fig. 1. An experimental assembly: 1 – detonator; 2 – plane shock wave generator; 3 – explosives; 4 – focusing ring; 5 – flyer; 6 – supports (with a height of 25 mm); 7 – damping plate (PMMA); 8 – recovery ampoule; 9 – momentum trap; 10 – baseplate

Fig. 2. Sites of a porous material in Pl of DN-31/1 specimen shocked up to 52 GPa

Fig. 3. A degree of isotropization of Pl versus its composition (the content of An) [10]: ○ – experimental data [10]; □, ■, ■ – non-isotropic, partially isotropic and completely isotropic Pl, accordingly (the results of the present paper)

Fig. 4. Amphibole in the specimens of crystalline schists: DN-31/1: a – starting; \bar{b} , \bar{v} , \bar{z} – shock tested (GPa, respectively 26, 36 and 52; 73-509a-1: \bar{d} , \bar{e} – shock tested (GPa), respectively 36 and 52