

УДК 523.681; 539.89

**И.В. Белятинская¹, В.И. Фельдман², В.В. Милявский³, Т.И. Бородина⁴,
Г.Е. Вальяно⁵, А.А. Беляков⁶**

УДАРНО-МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ ПОЛОСЧАТОГО АМФИБОЛИТА ЮЖНОГО УРАЛА⁷

Исследованы закономерности ударно-метаморфических преобразований породообразующих минералов (амфибол, плагиоклаз, клинопироксен, скаполит) в полосчатых кристаллических сланцах (Южный Урал), возникающих при нагружении пород с использованием плоских ударных волн. Сопоставление полученных результатов с диаплектовыми преобразованиями перечисленных минералов в природе и экспериментах со сферической сходящейся ударной волной для этой породы выявило значимые различия трансформаций. При ступенчатом ударно-волновом сжатии даже при 52 ГПа не зафиксировано образование полиминеральных ударно-термических агрегатов ни по амфиболу, ни по клинопироксену, по которым в условиях сферического ударно-волнового сжатия этот феномен зафиксирован.

Ключевые слова: ударный метаморфизм, импактиты, диаплектовыми преобразования, минералы.

Shock-metamorphic transformations regularity of rock-forming minerals (amphibole, plagioclase, clinopyroxene, scapolite) from streaky crystal schist (Southern Ural) generated with the use of planar shock waves compression of rock samples have been studied. Comparison of derived results with diaplect changes of listed minerals in nature and experiments with the use of the converging spherical waves for this rock revealed significant transformation differences. Transforming of amphibole and clinopyroxene with forming of shock-thermic aggregates fixed under the spherical shock compression hasn't been registered under the step-like shock wave compression even at 52 GPa.

Key words: shock metamorphism, impactites, diaplect changes, minerals.

Введение. Физическое моделирование импактных процессов с последующим изучением явлений, происходящих в минералах горных пород под воздействием ударных волн, крайне важно при диагностике и изучении природных астроблем. В экспериментальных условиях исследователь получает результат ударно-волнового воздействия на изучаемую породу в чистом виде, без наложенных позже вторичных изменений, которые осложняют, а подчас делают невозможной корректную интерпретацию геолого-петрологических данных.

Лабораторные эксперименты по воспроизведению ударного метаморфизма горных пород в настоящее время проводятся главным образом с использованием плоских ударных волн. При этом ударные напряжения в каждом эксперименте в диске породы диаметром 25–35 мм и толщиной 1–2 мм имеют одну величину и не превышают 55–60 ГПа [Ogilvie et al., 2007; Милявский и др., 2007]. Наряду с этим в Российском федеральном ядерном центре — Всероссийском науч-

но-исследовательском институте технической физики им. Е.И. Забабахина — лабораторные эксперименты выполняются с применением сферических сходящихся ударных волн. Этот метод нагружения имеет ряд преимуществ по сравнению с предыдущим, к ним относятся: большая масса образца (представляющего собой шар диаметром 50 мм и более), непрерывное увеличение нагрузки от края шара (20–25 ГПа) к его центру (до 300–350 ГПа в 1 мм от центра) в каждом эксперименте. Сравнение результатов экспериментов, выполненных этим методом [Фельдман и др., 2006, 2007], с ударным метаморфизмом пород в астроблемах показывает, что этим методом адекватно воспроизводится природный процесс ударного метаморфизма, что позволяет выявить ряд его тонких особенностей. В частности, такие эксперименты подтвердили теоретические предположения [Николаевский, 1969] о том, что ударно-метаморфические (диаплектовыми) преобразования минералов в полиминеральной породе определяются не только свойствами минералов,

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра петрологии, аспирантка, e-mail: belyatirina@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра петрологии, доцент, докт. геол.-минер. н., e-mail: feldman@geol.msu.ru

³ Объединенный институт высоких температур РАН, зав. отделом, канд. физ.-мат. н., e-mail: vlvm@ihed.ras.ru

⁴ Объединенный институт высоких температур РАН, ст. научн. с., канд. физ.-мат. н., e-mail: borodina@ihed.ras.ru

⁵ Объединенный институт высоких температур РАН, ст. научн. с., e-mail: gev@ihed.ras.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра кристаллографии, учебный мастер, e-mail: belyakovaleks@gmail.com

⁷ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-05-00211) и ФЦП «Ведущие научные школы России» (грант НШ-1949.2008.5).

но и их количественными соотношениями в породе [Фельдман и др., 2007].

Опубликованные результаты ударно-волнового нагружения одних и тех же минералов при разных условиях эксперимента заметно отличаются. Эти отличия касаются как величины напряжений, вызывающей одни и те же диаплектовые изменения минералов, так и появления (или не появления) новых фаз. Между тем вся геобарометрия ударного метаморфизма и в нашей стране, и за рубежом строится на результатах экспериментов с плоскими ударными волнами, не воспроизводящими всю сложность диаплектовых преобразований в природе. Поэтому начали проводить эксперименты с образцами из одной и той же породы с применением плоских и сферических сходящихся ударных волн. Целью этих работ является выявление причин, приводящих к различным изменениям горных пород и минералов при одинаковых ударных нагрузках, поскольку при таком подходе «выносятся за скобки» различия в количественных соотношениях и составе минералов и структурно-текстурных особенностях образцов.

Нами исследованы закономерности ударно-метаморфических преобразований породообразующих минералов в полосчатых кристаллических сланцах, отобранных на Южном Урале. Ранее изучены ударно-термические преобразования породообразующих минералов этой же породы при прохождении сферической сходящейся ударной волны.

Постановка эксперимента и методики исследования. *Постановка эксперимента.* Экспериментальное нагружение природных пород выполняли с применением ампул сохранения плоской геометрии по методике, описанной в работах [Жук и др., 2000; Фельдман и др., 2006; Сазонова и др., 2007; Милявский и др., 2007]. Максимальные значения ударного давления в экспериментах достигались в течение нескольких циркуляций волн в образце (ступенчатое ударно-волновое сжатие) и составляли 26, 36 и 52 ГПа.

Методики исследования. Изучение минералов исходных пород и пород, испытавших ударные нагрузки и сохранившихся после ударно-волнового нагружения, проводили методами оптической и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Кроме того, фазовый состав образцов до и после экспериментов по ударно-волновому нагружению исследовали методом рентгеноструктурного анализа (РФА).

Исследование изменений оптических свойств породообразующих минералов в зависимости от увеличения ударной нагрузки проводили на оптическом микроскопе «Оптон» на кафедре петрологии геологического факультета МГУ.

Исследования методом СЭМ выполняли в Лаборатории локальных методов исследования вещества кафедры петрологии геологического факультета МГУ на растровом электронном микроскопе «Jeol» JSM-6480LV в режиме наблюдения высококонтрастного

изображения в отраженных электронах при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе пучка 14–16 нА.

Локальный количественный анализ химического состава минералов производили с помощью приставки для энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа «Inca Energy-350» со сверхтонким окном АТW-2 (площадь 10 мм²), позволяющим регистрировать пики характеристического рентгеновского излучения в низкоэнергетической части спектра и количественно анализировать легкие элементы. Разрешение на тестовом образце (марганец) составляет 129 эВ. Анализ производили на напыленных углеродом (толщина напыления 20 нм) горизонтальных полированных поверхностях при ускоряющем напряжении 15 кВ и постоянном токе электронного пучка 15±0,05 нА, время накопления спектра 100 с. Для нестабильных под электронным пучком структур (плагиоклазы, слюды) локальный анализ проводили сканированием малых площадей (до 10 мкм в поперечнике). Прочие минералы анализировались сфокусированным пучком (локальность анализа отвечает размеру области взаимодействия и составляет около 2–2,5 мкм в диаметре). Ошибки измерения для этого метода следующие: для концентраций свыше 10 мас.% — до 2 отн.%; 5–10 мас.% — до 5 отн.%; от 1 до 5 мас.% — до 10 отн.%. Порог обнаружения составляет около 0,15–0,2 мас.%. Формулы минералов рассчитывали с учетом координационных позиций катионов в формуле минерала.

Исследование образцов методом РФА осуществляли по стандартной методике на установке «ДРОН-3М» (Cu, K α -излучение) в научной группе исследования материалов ОИВТ РАН. Для проведения количественного фазового анализа использовали метод внутреннего стандарта. Стандартным веществом служил алмазный порошок, имеющий дисперсность 1–2 мкм. При проведении количественного анализа оценивалось изменение интегральной интенсивности дифракционных линий в спектрах образцов до и после экспериментов. В предположении стабильного химического состава фаз на основе изменения интенсивности линий определено изменение содержания кристаллических фаз в образцах после экспериментов. Точность определения количества кристаллических фаз составляла 10 отн.% при содержании фазы <10%; 5 отн.% при содержании фазы от 10 до 50% и 3 отн.% — >50%. Точность определения параметров кристаллических решеток составляла ±0,001 нм.

Выявление и проверка значимости полученных данных об изменении химического состава минералов в исследуемых породах с увеличением ударного давления проводили методом сравнения среднеквадратичного отклонения (2 σ): при перекрытии областей среднеквадратичного отклонения содержания химического элемента в минерале при различных нагрузках не происходит его значимое изменение. Диаграммы приведены только в случае значимого изменения содержания элементов в минералах.

Исходный образец. В качестве исходного образца взят амфиболит из протерозойских толщ, развитых к востоку от г. Миасс на Южном Урале. Порода имеет линзовидно-полосчатую текстуру из чередующихся меланократовых (зеленовато-серых) и лейкократовых (светло-серых) полос. Мощность полос варьирует от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Меланократовые полосы сложены амфибол-плагиоклазовыми сланцами, тогда как лейкократовые представляют клинопироксен-скаполитовые сланцы.

Амфибол-плагиоклазовый сланец. Главные породообразующие минералы амфибол-плагиоклазового сланца — амфибол (50 об.%) и плагиоклаз (45 об.%) ; аксессуарные минералы представлены сфеном, цирконом, апатитом.

*Амфибол (Сам)*⁸ образует ксеноморфные изометричные зерна размером 0,9–1,2 мм и субидиоморфные удлиненные столбчатые кристаллы размером 0,5×1,5 мм. Под микроскопом амфибол интенсивно окрашен, характеризуется сильным плеохроизмом в зеленых тонах. На изображениях в отраженных электронах в зернах амфибола наряду с трещинами спайности видны грубые, изогнутые, произвольно ориентированные трещины (рис. 1, а). По данным микрозондового анализа (табл. 1) состав амфиболов соответствует магнезиогастингситам [Leake et al., 1997]. По данным РФА амфибол имеет моноклинную кристаллическую решетку, параметры которой приведены в табл. 2. Размер областей когерентного рассеяния (ОКР) не менее 100 нм.

Таблица 1

Состав амфиболовых фаз из исходного амфибол-плагиоклазового сланца и образцов, подвергнутых ударному нагружению

Состав	<i>P</i> _{уд} , ГПа							
	0		26		36		52	
	Номер анализа							
	Tish051	Tish052	T26184	T26185	T36064	T36067	T52042	T52041
SiO ₂	41,07	40,06	42,59	42,45	42,09	42,24	41,87	42,25
TiO ₂	1,32	1,19	1,44	1,29	1,21	1,36	1,10	1,26
Al ₂ O ₃	12,07	12,88	11,91	11,78	12,15	12,30	12,02	11,41
FeO	19,03	19,83	16,91	17,01	15,68	15,92	17,91	17,87
MgO	8,92	8,21	10,32	10,35	10,88	10,95	9,46	9,85
CaO	11,40	11,79	11,70	12,09	11,54	11,48	11,56	11,58
Na ₂ O	2,00	1,57	1,98	2,05	2,03	2,03	1,62	2,01
K ₂ O	0,70	1,06	0,61	0,59	0,86	0,73	0,85	0,76
Сумма	96,51	96,59	97,78	97,86	96,45	97,29	96,40	96,99
В пересчете на 23 атома кислорода								
Si	6,24	6,13	6,33	6,33	6,31	6,27	6,33	6,37
Al	2,16	2,32	2,09	2,07	2,15	2,15	2,14	2,03
Al ^T	1,76	1,87	1,67	1,67	1,69	1,73	1,67	1,63
Ti	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Al ^B	0,41	0,45	0,41	0,40	0,46	0,42	0,48	0,39
Ti	0,15	0,14	0,16	0,14	0,14	0,15	0,12	0,14
Fe _{общ} =Fe ²⁺ +Fe ³⁺	2,42	2,54	2,10	2,12	1,97	1,98	2,27	2,25
Fe ³⁺	0,61	0,60	0,52	0,41	0,48	0,64	0,55	0,48
Fe ²⁺	1,82	1,94	1,58	1,72	1,48	1,33	1,71	1,77
Mg	2,02	1,87	2,29	2,30	2,43	2,42	2,13	2,21
Ca	1,86	1,93	1,86	1,93	1,86	1,82	1,87	1,87
Na	0,59	0,46	0,57	0,59	0,59	0,58	0,47	0,59
Na ^B	0,14	0,07	0,14	0,07	0,14	0,17	0,13	0,13
B	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
Na ^A	0,45	0,40	0,43	0,53	0,45	0,41	0,35	0,46
K	0,14	0,21	0,12	0,11	0,17	0,14	0,17	0,15
A	0,58	0,61	0,55	0,64	0,76	0,72	0,64	0,74
Электроны	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00	46,00
Катионы	15,58	15,61	15,55	15,64	15,61	15,55	15,51	15,61

Примечание. A=ΣNa+K; B=ΣAl^{VI}+Ti+Fe_{общ}+Mn+Mg+Ca+Na; T=ΣSi^{IV}+Al^{IV}.

⁸ Условные обозначения на рисунках и в тексте соответствуют общепринятой международной символике для минералов [Kretz, 1983]: Sam — кальциевый моноклинный амфибол; Срх — кальциевый клинопироксен; Pl — плагиоклаз; Scp — скаполит. Арабские цифры в надстрочном индексе, расположенные за символом химического элемента, обозначают его валентность, римские цифры — его координацию в структуре минерала, а прописные латинские буквы — кристаллохимическую позицию элемента.

Таблица 2

Параметры кристаллической решетки* амфиболовых фаз по данным РФА

Образец	Параметры решетки				Объем элементарной ячейки, нм ³	Размер ОКР, нм
	a, нм	b, нм	c, нм	β , град.		
Исходный	0,992	1,804	0,532	105,88	0,9157	≥ 100
26 ГПа	0,990	1,807	0,531	105,58	0,9151	≥ 100
36 ГПа	0,991	1,806	0,531	105,87	0,9141	≥ 100
52 ГПа	0,991	1,806	0,531	105,87	0,9141	70 нм

* Точность измерения параметров решетки составляет $\pm 0,001$ нм, $\pm 0,01^\circ$.

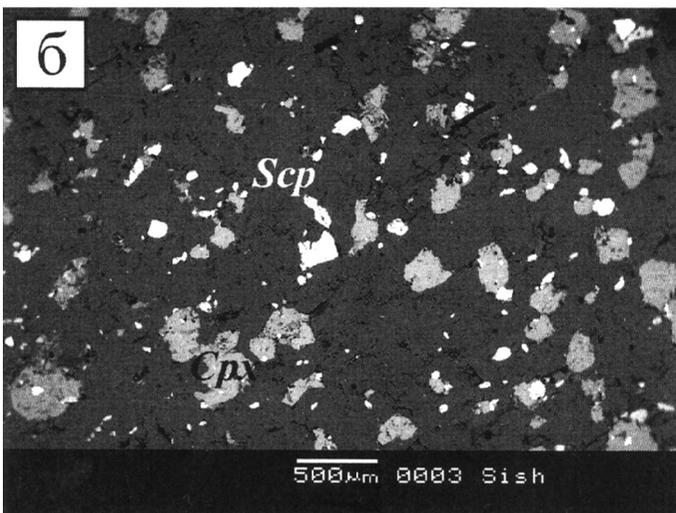
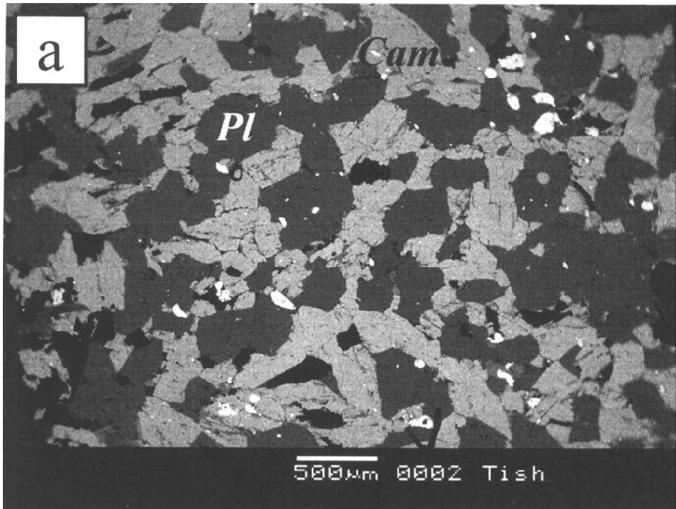


Рис. 1. Текстуры особенностей исходных пород: а — амфибол-плагиоклазовый сланец, б — клинопироксен-скаполитовый сланец

Таблица 3

Состав плагиоклазовых фаз из исходного амфибол-плагиоклазового сланца и образцов, подвергнутых ударному нагружению

Состав	$P_{уд}$, ГПа							
	0		26		36		52	
	Номер анализа							
	Tish060	Tish061	T26193	T26195	T36085	T36086	T52096	T52099
SiO ₂	60,06	58,71	61,16	61,32	60,97	60,27	60,76	63,31
Al ₂ O ₃	24,54	25,19	24,61	24,21	24,79	24,75	24,55	24,26
CaO	6,21	7,31	5,73	5,39	6,12	6,10	6,02	5,18
Na ₂ O	7,95	7,42	8,24	8,48	6,00	8,05	5,72	5,21
K ₂ O	0,14	0,00	0,14	0,00	0,15	0,25	0,12	0,24
Сумма	98,90	98,62	100,15	99,67	98,02	99,43	97,16	98,21
В пересчете на 8 атомов кислорода								
Si	2,70	2,65	2,71	2,73	2,74	2,70	2,75	2,81
Al ^{IV}	1,30	1,34	1,29	1,27	1,31	1,31	1,31	1,27
Ca	0,30	0,35	0,27	0,26	0,29	0,29	0,29	0,25
Na ⁺	0,69	0,65	0,71	0,73	0,52	0,70	0,50	0,45
K	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
X _{Ca}	0,30	0,35	0,28	0,26	0,36	0,29	0,36	0,35
$\Sigma_{Ca+Na+K}$	1,00	1,00	0,99	0,99	0,83	1,01	0,80	0,71
Σ_{Si+Al}	4,00	4,00	4,00	4,00	4,05	4,00	4,05	4,08
Катионы	5,00	5,00	5,00	5,00	4,87	5,01	4,85	4,79

Плагиоклаз (Pl) образует ксеноморфные изометричные зерна поперечником до 0,5 мм. Иногда встречаются слегка удлиненные таблитчатые зерна со скругленными углами (рис. 1, а). По данным микрорзондового анализа (табл. 3) плагиоклаз характеризуется зональным строением: ядра зерен сложены олиоклазом (An_{25–30}), а края — андезином (An_{30–35}). Преобладают ядра зерен плагиоклаза, поэтому при построении диаграмм изменения состава плагиоклаза с ростом ударной нагрузки и выявлении значимости этих изменений будет использован состав этих зон. По данным РФА плагиоклаз имеет следующие параметры кристаллической решетки: $a = 0,817$ нм, $b = 1,286$ нм, $c = 0,710$ нм, $\alpha = 93,45^\circ$, $\beta = 116,05^\circ$, $\gamma = 90,50^\circ$. Размер ОКР не менее 100 нм.

Клинопироксен-скаполитовый сланец. Главные породообразующие минералы клинопироксен-скаполитового сланца — клинопироксен (~30 об.%) и скаполит (~70 об.%) второстепенные минералы представлены плагиоклазом, кальцитом; акцессорные минералы — сфеном, цирконом, апатитом, рудным минералом.

Клинопироксен (Cpx) в породе распределен очень неравномерно, обычно его содержание варьирует от 25 до 30 об.%, но иногда достигает 40 об.%. Минерал образует ксеноморфные изометричные зерна с поперечником 0,4–0,5 мм и удлиненные зерна размером до 0,4×0,9 мм (рис. 1, б). Под микроскопом минерал окрашен в зеленоватый цвет и характеризуется сильным плеохроизмом. Во многих зернах проявлены трещины спайности. По данным микрорзондового анализа (табл. 4) изученные клинопироксены представлены салитами [Morimoto et al., 1988]. По данным РФА клинопироксен имеет следующие параметры кристаллической решетки: $a = 0,9724$ нм; $b = 0,8875$ нм; $c = 0,5281$ нм, $\beta = 107,24^\circ$. Размер ОКР не менее 100 нм.

Скаполит (Scp) образует ксеноморфные изометричные и слегка удлиненные зерна размером 2,0–2,5 мм. В некоторых зернах наблюдается средняя спайность в одном направлении вдоль удлинения кристаллов. По

Таблица 4

Состав клинопироксенов из исходного клинопироксен-скаполитового сланца и образцов, подвергнутых ударному нагружению

Состав		$P_{уд}$, ГПа							
		0		26		36		52	
		Номер анализа							
		Sish005	Sish006	S26208	S26211	S36163	S36164	S52008	S52009
SiO ₂		49,46	50,22	50,55	52,23	49,95	52,25	49,36	50,27
Al ₂ O ₃		1,55	1,09	1,72	0,86	2,29	0,74	1,70	1,14
FeO		15,43	14,38	14,27	11,64	16,23	11,34	13,98	13,37
MnO		0,40	0,51	0,32	0,44	0,39	0,57	0,00	0,00
MgO		8,23	8,98	9,35	11,22	7,82	11,09	9,18	9,77
CaO		22,37	22,81	22,87	23,41	22,81	23,58	22,62	23,21
Na ₂ O		0,51	0,55	0,47	0,34	0,61	0,55	0,70	0,44
Сумма		97,96	98,55	99,55	100,14	100,09	100,14	97,54	98,20
В пересчете на 6 атомов кислорода									
Si	{T}	1,94	1,95	1,94	1,97	1,93	1,97	1,93	1,95
Al	Σ_{Al}	0,07	0,05	0,08	0,04	0,10	0,03	0,08	0,05
	{T}	0,06	0,05	0,06	0,03	0,08	0,03	0,07	0,05
	{M1}	0,02	0,00	0,02	0,01	0,03	0,01	0,01	0,00
Fe ³⁺	{M1}	0,08	0,09	0,07	0,04	0,09	0,06	0,12	0,08
Fe ²⁺	{M1}	0,43	0,38	0,39	0,33	0,43	0,30	0,34	0,36
Fe=Fe ²⁺ +Fe ³⁺		0,51	0,47	0,46	0,37	0,52	0,36	0,46	0,43
Mn	{M1}	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00
Mg	{M1}	0,48	0,52	0,54	0,63	0,45	0,62	0,54	0,57
Ca	{M2}	0,94	0,95	0,94	0,95	0,94	0,95	0,95	0,97
Na	{M2}	0,04	0,04	0,04	0,03	0,05	0,04	0,05	0,03
Сумма катионов	общая	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
	{T}	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
	{M1}	1,02	1,01	1,02	1,03	1,01	1,01	1,00	1,00
	{M2}	0,98	0,99	0,98	0,97	0,99	0,99	1,00	1,00

данным микрозондового анализа (табл. 5) изученные скаполиты содержат 0,53–0,71 мейонитового компонента. По данным РФА скаполит имеет тетрагональную кристаллическую решетку с параметрами: $a = 1,218$ нм, $c = 0,7571$ нм. Размер ОКР не менее 100 нм.

Результаты эксперимента. Амфибол-плагноклазовый сланец. В образцах этой породы после нагружения до 26, 36 и 52 ГПа детально изучены преобразования в амфиболе и плагноклазе.

Амфибол (Сам). После нагрузки 26 ГПа амфибол в оптическом микроскопе становится изумрудно-зеленым. Центральные области зерен часто зелено-черные и непрозрачные. На изображениях в отраженных электронах видно, что по сравнению с исходным образцом (рис. 2, а) амфибол после нагрузки 26 ГПа становится более трещиноватым (рис. 2, б). Помимо наблюдаемых в исходном амфиболе грубых изгибающихся трещин и протяженных трещин спайности при 26 ГПа в минерале наблюдается сеть более коротких и тонких, часто закономерно ориентированных трещинок. По данным РФА после нагрузки 26 ГПа количество кристаллического амфибола в образце составляет 88% от его содержания в исходном мате-

риале. Параметры решетки амфибола меняются незначительно по сравнению с исходными значениями (табл. 2). Размер ОКР амфибола, как и в исходном образце, превышает 100 нм.

После нагрузки 36 ГПа амфибол в оптическом микроскопе черный, непрозрачный, иногда слабо просвечивает только на краях зерен, где имеет темно-зеленый цвет. Для амфибола характерна интенсивная трещиноватость. Трещины в основном открытые, часто практически прямые. Наблюдаются более грубые протяженные, а также и более тонкие короткие трещины, часть из которых подчиняется кристаллографическим направлениям. После нагрузки 36 ГПа в амфиболе наблюдаются зоны, где вдоль трещин или на краях зерен происходило дробление с образованием микроблоков размером до 3–5 мкм. По данным РФА после нагрузки 36 ГПа содержание кристаллического амфибола составляет 80% от его исходного содержания. Объем элементарной ячейки амфибола уменьшился на 0,17% по сравнению с исходным значением. Размеры ОКР амфибола не отличаются от соответствующих величины в исходном образце, т.е. превышают 100 нм.

Таблица 5

Состав скаполитов из исходного клинопироксен-скаполитового сланца и образцов, подвергнутых ударному нагружению

Состав	$P_{уд}$, ГПа							
	0		26		36		52	
	Номер анализа							
	Sish109	Sish110	S26205	S26206	S36126	S36127	S52133	S52134
SiO ₂	48,78	50,84	47,03	49,64	49,41	48,69	51,51	47,94
Al ₂ O ₃	27,19	26,09	27,59	26,33	26,75	26,63	25,13	27,16
CaO	16,99	14,46	17,76	15,02	15,83	16,48	13,32	17,00
Na ₂ O	4,29	5,40	3,58	4,97	4,41	4,02	4,91	3,79
K ₂ O	0,26	0,25	0,00	0,39	0,32	0,25	0,40	0,19
SO ₃	0,60	0,22	0,00	0,00	0,29	0,27	0,28	0,63
Сумма	98,11	97,26	95,96	96,54	97,02	96,34	95,56	96,71
Кислород	2,81	2,81	2,75	2,78	2,79	2,77	2,78	2,77
В пересчете на 24 атома кислорода								
Si	6,94	7,23	6,83	7,14	7,07	7,02	7,41	6,92
Al ^{IV}	4,56	4,37	4,72	4,46	4,51	4,53	4,26	4,62
Ca	2,59	2,20	2,76	2,31	2,43	2,55	2,05	2,63
Na	1,18	1,49	1,01	1,38	1,22	1,12	1,37	1,06
K	0,05	0,05	0,00	0,07	0,06	0,05	0,07	0,04
S	0,06	0,02	0,00	0,00	0,03	0,03	0,03	0,07
X _{Ca}	0,68	0,59	0,73	0,61	0,65	0,69	0,59	0,71
$\Sigma_{Ca+Na+K}$	3,82	3,74	3,77	3,77	3,71	3,72	3,49	3,72
Σ_{Si+Al}	11,50	11,60	11,55	11,59	11,58	11,55	11,66	11,53
Катионы	15,39	15,35	15,32	15,36	15,32	15,30	15,19	15,32

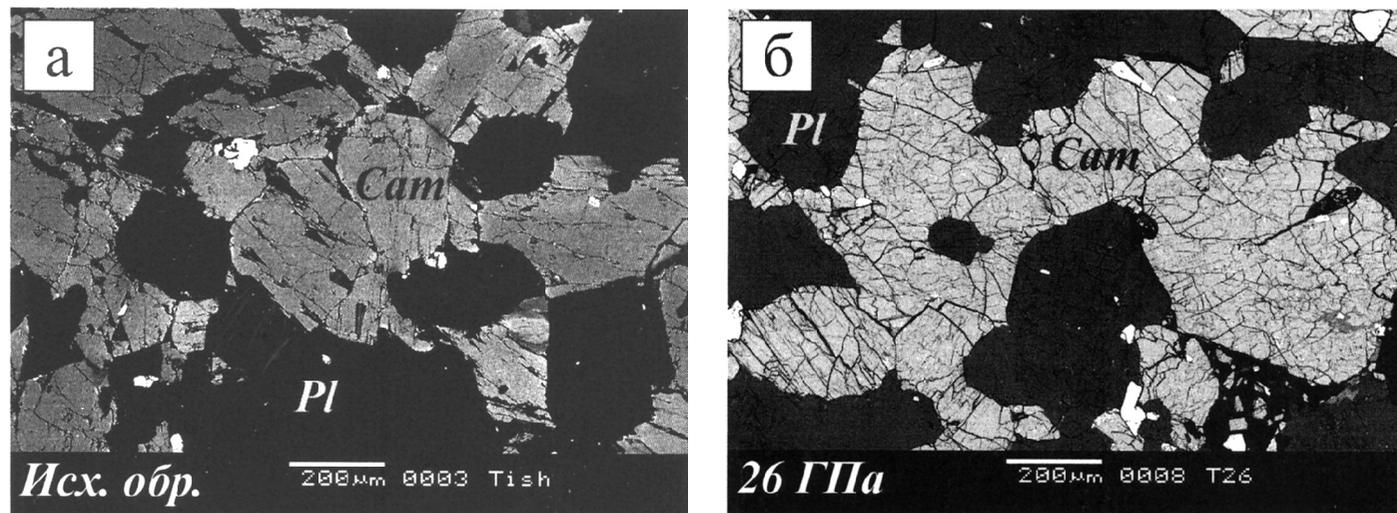


Рис. 2. Характер трещиноватости амфибола из исходного (а) и испытывавшего ударную нагрузку 26 ГПа (б) амфибол-плагиоклазового сланца

После нагрузки 52 ГПа в оптическом диапазоне амфибол обладает более тусклым зеленовато-желтым цветом по сравнению с амфиболом из исходной породы. При большом увеличении видна неравномерность окраски амфибола: более темные блоки разделены тонкими прожилками и линзочками, развивающимися вдоль трещин и на краях зерен. На изображениях в отраженных электронах видно, что амфибол трещиноват, наблюдаются тончайшие прожилки шириной 1–2 мкм (рис. 3, а), имеющие более светлую окраску,

чем окружающий амфибол. Эти прожилки однородны, не обнаруживают признаков минеральных новообразований. Состав этих прожилков (анализ 042 в табл. 1) близок к составу трещиноватого (анализ 041 в табл. 1) и исходного амфибола. Это позволяет считать данную фазу диаплектовым стеклом, возникающим при аморфизации амфибола. В некоторых зернах видны участки аморфизованного амфибола, возникающего вдоль многочисленных трещин, где его количество достигает 50% (рис. 3, б), и переходящего

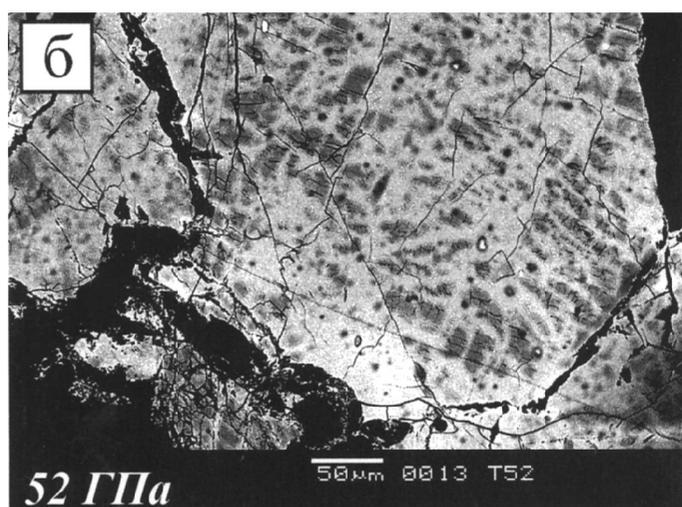


Рис. 3. Характер трещиноватости и аморфизации амфибола (а, б, в) после нагрузки 52 ГПа. Аморфизованный амфибол обладает в отраженных электронах более светлой окраской по сравнению с реликтами кристаллического амфибола, который разбит сетью многочисленных грубых трещин

в сплошной аморфизованный материал на краях зерен. Кроме того, после нагрузки 52 ГПа в амфиболе появляется пластинчатое строение (рис. 3, в). Местами по краям зерен амфибола появляются участки, насыщенные пустотами — следами ухода флюидной фазы, их возникновение — доказательство того, что мы имеем дело с плавлением и «вскипанием» этого минерала.

По данным РФА после нагрузки 52 ГПа содержание кристаллического амфибола составляет 58% от его количества в образце до эксперимента. Параметры кристаллической решетки амфибола идентичны зафиксированным в пробе после эксперимента с нагрузкой 36 ГПа (табл. 2). Размер ОКР амфибола несколько снижается по сравнению с исходным значением и составляет 70 нм.

Значимые изменения в составе амфибола наблюдаются уже после нагрузки 26 ГПа. При этом давлении наблюдается значимое уменьшение содержания железа и увеличение содержания магния (табл. 1, рис. 4).

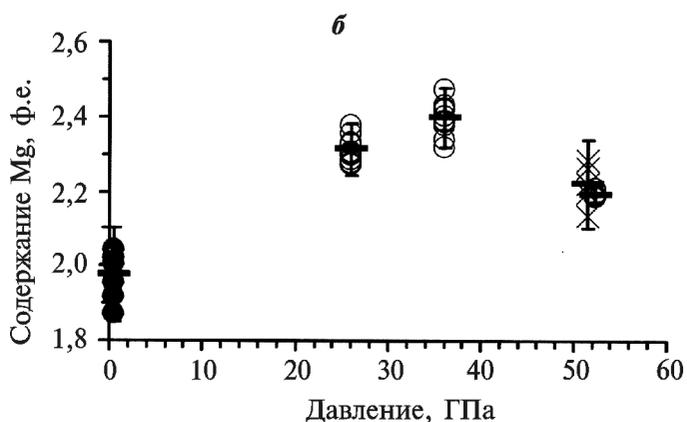
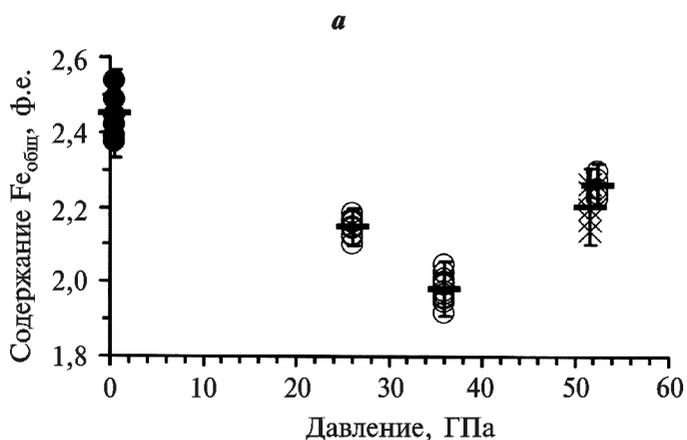


Рис. 4. Изменение содержания железа (а) и магния (б) в амфиболах исходных (залитые кружки) и подвергнутых ударно-волновому нагружению (незалитые кружки для трещиноватых амфиболов и крестики для аморфизованных) амфибол-плагиоклазовых сланцев в зависимости от величины ударной нагрузки. Вертикальными линиями с горизонтальными рисками отмечено среднее квадратичное отклонение от среднего содержания элемента, которое отмечено жирными горизонтальными линиями

После нагрузки 36 ГПа значительно уменьшается содержание железа и повышается количество магния (табл. 1, рис. 4).

После нагрузки 52 ГПа в СЭМ различимы две разновидности амфибола — сильнотрещиноватые реликты кристаллического амфибола и аморфизованный амфибол (табл. 1, рис. 4). В обеих амфиболовых фазах после нагрузки 52 ГПа наблюдается значимое увеличение содержания железа и уменьшение содержания магния по сравнению с таковыми в амфиболе при 36 ГПа.

Плагиоклаз (Pl). После нагрузки 26 ГПа плагиоклаз под оптическим микроскопом сильноизотропен. Редко наблюдаются зерна или участки зерен, сохраняющие анизотропию, — их количество не превышает 10–15 об.%. Среди них встречаются зерна, в которых одна система полисинтетических двойников изотропна, а другая интерферирует. На изображениях в отраженных электронах также видно, что большая часть плагиоклаза аморфизована, лишь интерферирующие под оптическим микроскопом области сохранили кристаллическую структуру. Аморфизованный плагиоклаз имеет в СЭМ более светлый цвет и содержит значительно меньше трещин, чем реликты кристаллического плагиоклаза, которые в отраженных электронах выделяются темно-серым цветом и разбиты грубыми открытыми трещинами (рис. 5). По данным РФА количество кристаллического плагиоклаза при 26 ГПа составляет 12% от исходного содержания плагиоклаза в образце до эксперимента. Таким образом, основная часть плагиоклаза уже при этом давлении подверглась аморфизации. Размер ОКР сохранившегося в кристаллическом состоянии плагиоклаза, как и в исходном образце, превышает 100 нм.

Плагиоклаз из образца, испытывавшего нагрузку 36 ГПа, практически полностью изотропен в оптиче-

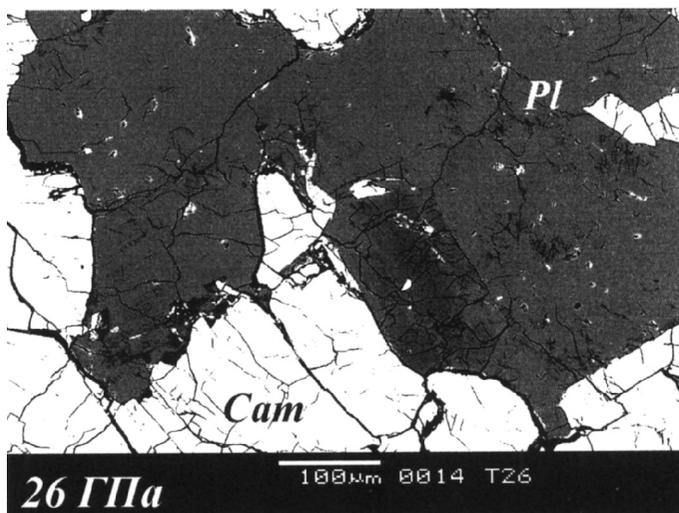


Рис. 5. Аморфизация плагиоклаза из испытывавшего нагрузку 26 ГПа амфибол-плагиоклазового сланца. На изображениях в отраженных электронах реликты кристаллического плагиоклаза имеют более темный цвет и сильнее трещиноваты, чем аморфизованный плагиоклаз

ском микроскопе. Очень редко наблюдаются зерна, содержащие небольшие интерферирующие блоки, которые в отраженных электронах отличаются от аморфизованного плагиоклаза так же, как и после нагрузки 26 ГПа. По данным РФА лишь 6% плагиоклаза осталось в кристаллическом состоянии после нагрузки 36 ГПа. Кроме того, уменьшается ОКР плагиоклаза со 100 нм в исходном образце до 15 нм в образце, испытывавшем нагрузку 36 ГПа.

После нагрузки 52 ГПа весь плагиоклаз полностью аморфизован: в оптическом микроскопе все зерна этого минерала изотропны, по данным РФА кристаллический плагиоклаз в образце, испытывавшем нагрузку 52 ГПа, не фиксируется.

После нагрузки 26 ГПа состав плагиоклазовых фаз (аморфизованный плагиоклаз — анализ 193 в табл. 3, кристаллический плагиоклаз — анализ 195 в табл. 3) значительно не изменяется по сравнению с составом исходного плагиоклаза. После нагрузки 36 ГПа снижается содержание натрия в аморфизованном плагиоклазе (анализ 085 в табл. 3), в то время как значимые изменения состава реликтов кристаллического плагиоклаза (анализ 086 в табл. 3) не происходят (рис. 6). После нагрузки 52 ГПа дальнейшее изменение состава аморфизованного плагиоклаза (анализы 096 и 099 в табл. 3) не происходит.

Отметим, что в аморфизованных плагиоклазах при увеличении ударной нагрузки происходит уменьшение суммы катионов (от 1,00–0,96 ф.е. после нагрузки 26 ГПа, 0,77–0,86 ф.е. после нагрузки 36 ГПа и до 0,72–0,86 ф.е. после нагрузки 52 ГПа вместо 1,0 ф.е. у исходного плагиоклаза). В аморфизованных участках плагиоклаза начиная с нагрузки 36 ГПа происходит также изменение суммы Al+Si: в исходном плагиоклазе сумма стехиометрична и составляет $4,00 \pm 0,01$, а в аморфизованных плагиоклазовых фазах она увеличивается до $4,05 \pm 0,01$ после нагрузки

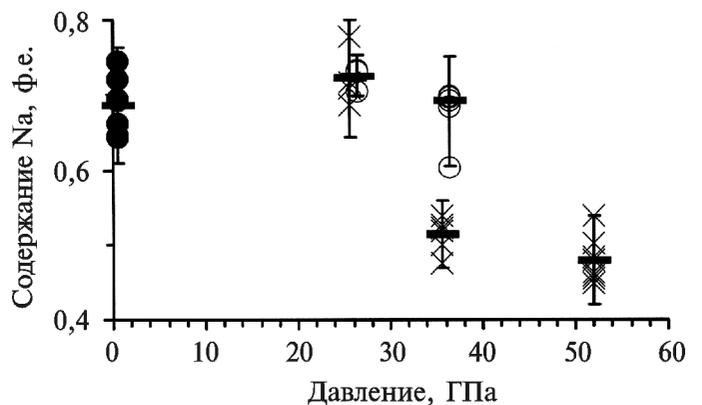


Рис. 6. Изменение содержания натрия в плагиоклазах исходных (залитые кружки) и подвергнутых ударно-волновому нагружению (незалитые кружки для реликтов кристаллических плагиоклазов и крестики для аморфизованных) амфибол-плагиоклазовых сланцев в зависимости от величины ударной нагрузки натрия. Вертикальными линиями с горизонтальными рисками отмечено среднеквадратичное отклонение от среднего содержания элемента, которое показано жирными горизонтальными линиями

36 ГПа и $4,06 \pm 0,02$ после нагрузки 52 ГПа. Эти факты свидетельствуют о начале плавления минерала.

Клинопироксен-скаполитовый сланец. В образцах этой породы после нагружения до 26, 36 и 52 ГПа детально изучены преобразования в клинопироксене и скаполите.

Клинопироксен (Срх). После нагрузки 26 ГПа клинопироксен под оптическим микроскопом частично затемнен, цвет местами становится темно-зеленым, редко почти черным. Количество затемненных участков составляет 30–40 об.%. В отраженных электронах видно, что после нагрузки 26 ГПа в клинопироксене появляется трещиноватость. При этом наряду с грубыми трещинами появляются тонкие, часто кристаллографически ориентированные трещины (рис. 7, а). По данным РФА количество кристаллического клинопироксена после нагрузки 26 ГПа не изменяется по сравнению с исходным клинопироксеном. При этом давлении диспергирование клинопироксена не происходит, как и в исходной породе, ОКР этого минерала превышает 100 нм. Параметры кристалли-

ческой решетки минерала не отличаются от исходных значений.

После нагрузки 36 ГПа пироксен становится сильнозамутненным и приобретает темную изумрудно-зеленую окраску, часто становится даже зелено-черным. Количество темных участков составляет 60–70 об.%. В отраженных электронах видно, что после нагрузки 36 ГПа клинопироксен сильно трещиноват, характер трещиноватости сходен с наблюдаемым после нагрузки 26 ГПа. По данным РФА содержание кристаллического клинопироксена в сохраненном материале примерно в 1,3 раза ниже, чем в исходной породе. Нагрузка 36 ГПа вызывает диспергирование кристаллического клинопироксена — ОКР минерала снижается до 26 нм. Параметры кристаллической решетки минерала не отличаются от исходных значений.

После нагрузки 52 ГПа под оптическим микроскопом клинопироксен прозрачен, но имеет значительно более светлый (зеленовато-желтый) цвет по сравнению с клинопироксеном из исходного сланца. В отраженных электронах видно, что клинопироксен трещиноват, но характер трещиноватости отличается от наблюдаемой в клинопироксене при других нагрузках (рис. 7, б). По-прежнему наблюдаются длинные грубые трещины, часто секущие зерно целиком, однако количество коротких кристаллографически ориентированных трещин становится значительно больше, они уже не такие тонкие, как после нагрузки 36 ГПа. Кроме того, в образце, испытывавшем нагрузку 52 ГПа, клинопироксен обнаруживает пластинчатое строение: весь объем минерала сложен чередованием ультратонких пластинок светло-серого и иногда даже белого и темно-серого материала (рис. 7, б). Размеры пластинок настолько малы, что анализы выполнялись по площади — анализировались небольшие наиболее равномерно окрашенные площадки из светлых и из темных участков. По данным РФА после нагрузки 52 ГПа количество кристаллического клинопироксена в сохраненном материале примерно в 1,3 раза ниже, чем в исходной породе. ОКР клинопироксена составляет 26 нм. Параметры кристаллической решетки минерала не отличаются от исходных значений.

Участки пироксена с пластинчатым строением в прозрачном шлифе на атомном силовом микроскопе Р47—PRO полуконтактным методом в режиме «высота» изучал в ОИВТ РАН старший научный сотрудник лаборатории № 11 отдела № 1 Г.Е. Вальяно. Он установил, что эти участки имеют хорошо выраженный микрорельеф с перепадом высоты 200–300 нм. На фоне этого «складчатого» рельефа проявляются более мелкие «морщины» с перепадами высоты на 1–2 порядка меньше и чередующиеся с шагом 0,1–2 мкм. Детальное прослеживание состава светло-серых и темно-серых участков пироксена показало, что они статистически значимо не отличаются, а их различие в цвете определяется, таким образом, не составом, а нанорельефом поверхности, который в свою очередь,

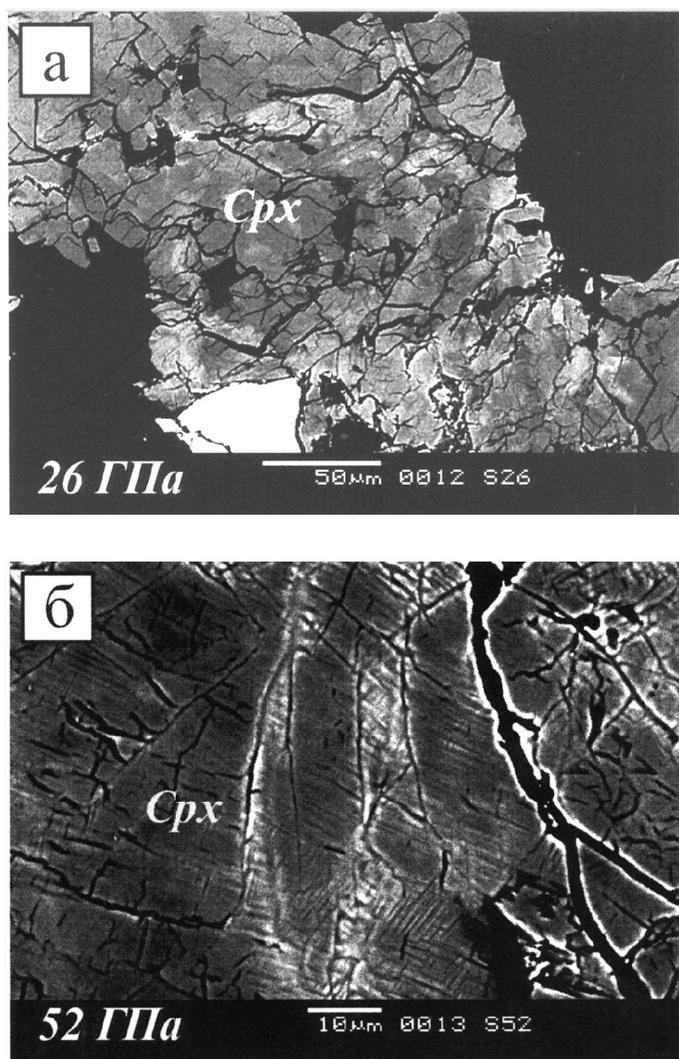


Рис. 7. Характер преобразований клинопироксена из образцов, испытавших ударную нагрузку 26 (а) и 52 (б) ГПа

вероятно, связан с повышением уровня микронеоднородности (дефектности) кристаллической решетки по мере увеличения ударных напряжений.

Значимое изменение химического состава клинопироксена, подвергнувшегося ударно-волновому воздействию, не выявлено (табл. 5). Таким образом, для этого минерала при воздействии 26, 36 и 52 ГПа характерны только механические преобразования.

Скаполит (*Scp*). Скаполит из образца, подвергнутого ударно-волновому нагружению до 26 ГПа, под оптическим микроскопом практически не отличается от скаполита из исходного образца. При одном никеле минерал выглядит так же, как и в исходном образце; при скрещенных николях видно, что сила двулучепреломления скаполита не уменьшается, но интерференционная окраска в зернах распределена не равномерно, как в исходном образце, а в виде мелких пятен. По данным РФА после нагрузки 26 ГПа количество кристаллического скаполита уменьшается в 4,6 раза по сравнению с исходной породой. Размер ОКР скаполита, сохранившегося в кристаллическом состоянии, не превышает 15 нм. Параметры кристаллической решетки скаполита не отличаются от исходных значений. Отметим, что в дифракционном спектре отсутствуют гало, характерные для аморфных фаз.

После нагрузки 36 ГПа под оптическим микроскопом скаполит становится немного замутненным при одном никеле. При скрещенных николях видно, что интерференционная окраска скаполита снижается до серой первого порядка. По данным РФА в образце после ударно-волнового нагружения до 36 ГПа количество кристаллического скаполита, его ОКР и параметры кристаллической решетки не изменяются.

После нагрузки 52 ГПа под оптическим микроскопом скаполит при одном никеле немного замутнен, как и при 36 ГПа. При скрещенных николях минерал становится изотропным. По данным РФА ударно-волновое нагружение до 52 ГПа приводит к исчезновению кристаллического скаполита.

На изображениях в отраженных электронах после всех изученных нагрузок скаполит не отличается от исходного ни окраской, ни структурой, значимые изменения химического состава ни при одной из изученных нагрузок не зафиксированы.

Обсуждение результатов. Сопоставление изменений в изученных минералах (амфибол, плагиоклаз, клинопироксен, скаполит) показывает, что все они подвергаются механическим изменениям — дроблению, изотропизации, часто появлению пластинчатого строения (у амфибола и клинопироксена). Наиболее интенсивно при увеличении ударных напряжений изменяется плагиоклаз — уже после нагрузки 26 ГПа сохраняется лишь 12% его кристаллических реликтов, остальной объем аморфизуется. Несколько бо́льшая нагрузка требуется для скаполита, кристаллические реликты которого после нагрузки 26 ГПа составляют 22%. Амфибол и клинопироксен еще устойчивее — после нагрузки 26 ГПа сохраняется до 88%

кристаллического амфибола и весь кристаллический клинопироксен. Даже при 52 ГПа (когда каркасные плагиоклаз и скаполит уже полностью аморфизованы) сохраняется около 58% ленточного амфибола и до 77% цепочечного клинопироксена. Описанная последовательность изменений в минералах при нагружении пород плоской ударной волной соответствует установленному ранее [Козлов и др., 2002] ряду ударно-термического разложения минералов под воздействием сферической сходящейся ударной волны: каркасные → слоистые → ленточные → цепочечные силикаты и алюмосиликаты → островные силикаты.

В этой же последовательности наблюдается изменение химического состава изученных минералов. Однако здесь общая картина устанавливается менее отчетливо. Причина этого — различия в координационных числах одних и тех же химических элементов в разных минералах [Козлов и др., 2002].

При сопоставлении полученных результатов с диаплектовыми преобразованиями перечисленных минералов в природе и экспериментах со сферической сходящейся ударной волной, которые выполнялись для данной породы ранее [Feldman et al., 2001], выявлены значимые различия в трансформациях. При ступенчатом ударно-волновом сжатии даже при 52 ГПа не зафиксировано образование полиминеральных ударно-термических агрегатов ни по амфиболу, ни по клинопироксену. В сферических ударных волнах замещение амфибола агрегатом новообразованных андезина, амфибола и рудного минерала фиксируется уже при 40 ГПа, а клинопироксен в интервале 40–60 ГПа превращается в агрегат плагиоклаза, амфибола, клинопироксена и магнетита. Для скаполита в этом же интервале давления в сферических ударных волнах зафиксирован привнос Si, Fe, K и вынос Al и Na. Появление пластинчатого строения отмечалось ранее у клинопироксена при сферической геометрии нагружения [Сазонова и др., 1997], а для оливина — в природных условиях (в метеоритах [Chen et al., 1995]), в этих случаях пластинчатое строение было интерпретировано как результат распада высокоплотной фазы.

Заключение. При изучении ударно-метаморфических преобразований породообразующих минералов (амфибол, плагиоклаз, клинопироксен и скаполит) для каждого из них выявлены механические изменения. Наиболее сильно механические трансформации проявляются в каркасных плагиоклазе и скаполите. Наряду с механическими преобразованиями в плагиоклазе наблюдается изменение химического состава — при 36 и 52 ГПа из плагиоклаза интенсивно выносятся Na. Очевидно, что эксперименты с одним образцом не позволяют сделать выводы по поставленной проблеме в целом, это требует накопления данных по более широкому кругу минералов и пород. В настоящее время в работе находятся образцы пород совершенно иного состава (сложенных кварцем,

биотитом, гранатом, плагиоклазом, калиевым полевым шпатом и т.д.). После изучения результатов этих экспериментов авторы рассчитывают получить материалы для обсуждения причин возникновения различий между диаплектовыми преобразованиями

минералов при разных способах ударно-волнового нагружения образцов.

Авторы статьи выражают благодарность О.Г. Сафонову и В.О. Япаскурту за ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Жук А.З., Бородин Т.И., Милявский В.В., Фортков В.Е. Ударно-волновой синтез карбина из графита // Докл. РАН. 2000. Т. 370, № 3. С. 328–331.

Козлов Е.А., Сазонова Л.В., Фельдман В.И. и др. Некоторые факторы, контролирующие преобразования минералов в горных породах при ударно-волновом нагружении // Фазовые превращения при высоких давлениях: Тез. докл. Черногоровка, 2002. С. 13.

Милявский В.В., Сазонова Л.В., Белятинская И.В. и др. Ударный метаморфизм плагиоклаза и амфибола при ступенчатом ударно-волновом сжатии полиминеральных горных пород // ФТВД. 2007. Т. 17, № 1. С. 126–136.

Николаевский В.Н. Гидродинамический анализ ударных адиабат гетерогенных смесей вещества // Журн. прикладной механики и теор. физики. 1969. № 3. С. 82–88.

Сазонова Л.В., Козлов Е.А., Жугин Ю.Н. Ударный метаморфизм плагиоклаз-гранат-пироксеновой горной породы в сферических волнах напряжения // Геохимия. 1997. Т. 357, № 3. С. 395–398.

Сазонова Л.В., Милявский В.В., Бородин Т.И. и др. Ударный метаморфизм плагиоклаза и амфибола (экспериментальные данные) // Физика Земли. 2007. № 8. С. 90–96.

Фельдман В.И., Сазонова Л.В., Козлов Е.А. Ударный метаморфизм некоторых породообразующих минералов (экспериментальные и природные данные) // Петрология. 2006. Т. 14, № 6. С. 576–603.

Фельдман В.И., Сазонова Л.В., Козлов Е.А. Высокобарические полиморфные модификации некоторых минералов в импактиках: геологические наблюдения и экспериментальные данные // Там же. 2007. Т. 15, № 3. С. 241–256.

Фельдман В.И., Сазонова Л.В., Милявский В.В. и др. Ударный метаморфизм некоторых породообразующих минералов // Физика Земли. 2006. № 6. С. 32–36.

Feldman V.I., Kozlov E.A., Zhugin Yu.N. Shock metamorphism of amphibolite minerals. Experimental data. Impact markers in the stratigraphic record. Abstr. Book 6th ESF — Impact workshop. Granada (Spain). 2001. P. 29–30.

Kretz R. Symbols for rock-forming minerals // Amer. Mineralogist. 1983. Vol. 68. P. 277–279.

Leake B. E., Woolley A.R., Arps C.E.S. et al. Nomenclature of Amphiboles: report of the subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, commission on new minerals and mineral names // Canad. Mineralogist. 1997. Vol. 35. P. 219–246.

Morimoto N., Fabries J., Ferguson A.K. et al. Nomenclature of pyroxenes // Amer. Mineralogist. 1988. Vol. 73. P. 1123–1133.

Ogilvie P., Reimold W.U., Deutsch A. Experimental investigation of shock effects in a metapelitic granulite — new results, Raman spectroscopy and mineral chemistry // Lunar and Planet. Sc. 2007. Vol. 38.

Поступила в редакцию
25.02.2009