

УДК 523.681; 539.89

И.В. Белятинская<sup>1</sup>, **В.И. Фельдман<sup>2</sup>**, В.В. Милявский<sup>3</sup>, Т.И. Бородина<sup>4</sup>, А.А. Беляков<sup>5</sup>**ТРАНСФОРМАЦИИ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ  
ПРИ СТУПЕНЧАТОМ УДАРНО-ВОЛНОВОМ СЖАТИИ  
КВАРЦ-ПОЛЕВОШПАТ-БИОТИТ-ГРАНАТОВОГО СЛАНЦА  
(Южный Урал)<sup>6</sup>**

Исследованы закономерности ударно-метаморфических трансформаций породообразующих минералов (гранат, биотит, плагиоклаз и калиевый полевой шпат) в кварц-полевошпат-биотит-гранатовом сланце (Южный Урал), подвергнутых ударно-волновому сжатию с использованием ампул сохранения плоской геометрии. Максимальные значения ударного давления достигались в течение нескольких циркуляций волн в образце (ступенчатое ударно-волновое сжатие) и составляли 26, 36 и 52 ГПа. Сопоставление возникающих при ступенчатом ударно-волновом сжатии преобразований с диаплектовыми изменениями изучаемых минералов в природе и экспериментах со сферической сходящейся ударной волной для этих минералов показало значимые различия преобразования меланократовых (гранат, биотит) минералов при разных способах нагружения.

*Ключевые слова:* импактиты, ударный метаморфизм, диаплектовые изменения, минералы.

In this work the patterns of shock-metamorphic transformations of rock-forming minerals (garnet, biotite, plagioclase, and potash feldspar) in quartz-feldspar-biotite-garnet schist (Southern Ural) compressed with shock waves with use of recovery assemblies of planar geometry. The maximal shock pressures were attained upon a few circulations of the waves in the sample (stepwise shock compression) and were equal 26, 36 and 52 GPa. Comparison of transformations appeared under stepwise shock compression with those of diaplect changes of the studied minerals in the field and as a result of experiments with convergent spherical shockwaves for these minerals revealed essential differences between transformations of melanocratic (garnet, biotite) minerals under different ways of compression.

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

**Введение.** В статье продолжается описание серии экспериментов по ступенчатому ударно-волновому нагружению кристаллических пород. Ранее нами были изучены ударно-метаморфические преобразования породообразующих минералов (амфибол, плагиоклаз, клинопироксен и скаполит) полосчатого амфиболита с Южного Урала [Белятинская и др., 2010]. По результатам предыдущих экспериментов выявлены значительные различия в характере и степени преобразований породообразующих минералов, что, очевидно, связано не только с их структурой и химическим составом, но и со структурно-текстурными особенностями породы. Наша работа расширяет спектр породообразующих минералов, претерпевающих ударно-метаморфические преобразования при ступенчатом ударно-волновом сжатии, добавляя к

уже изученным минералам гранат, биотит и калиевый полевой шпат.

Подробности постановки экспериментов содержатся в работе [Белятинская и др., 2010]. 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. Изучали минералы пород, испытавших ударно-волновое нагружение, методами оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), микрозондового и рентгенофазового анализа [Белятинская и др., 2010].

**Исходный образец.** Образец для исследований отобран на Южном Урале в карьере Радостный, находящемся на северо-западе поля развития тараташского метаморфического комплекса, который

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

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра петрологии, доцент, докт. геол.-минер. н.

<sup>3</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, отдел ударно-волновых воздействий, зав. отделом, канд. физ.-мат. н., *e-mail:* vlvm@ihed.ras.ru

<sup>4</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, лаборатория ударных волн в конденсированных средах, ст. науч. с., канд. физ.-мат. н., *e-mail:* borodina@ihed.ras.ru

<sup>5</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра кристаллографии, учебный мастер, *e-mail:* belyakovaleks@gmail.com

<sup>6</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-05-00211).

Таблица 1

Состав гранатов из исходного кварц-полевошпат-биотит-гранатового сланца (ish) и образцов, подвергнутых ступенчатому ударно-волновому сжатию до различных давлений

Со- став	$P_{уд}$ , ГПа															
	0				26				36				52			
	анализ															
	R14aish-252	R14aish-255	среднее значение	стандартное отклонение	R14a26-218	R14a26-224	среднее значение	стандартное отклонение	R14a36-088	R14a36-090	среднее значение	стандартное отклонение	R14a52-108	R14a52-113	среднее значение	стандартное отклонение
SiO <sub>2</sub>	38,38	37,59	37,95	0,28	38,16	37,87	38,00	0,28	38,33	38,12	38,09	0,26	37,54	37,94	37,90	0,25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,52	21,54	21,48	0,13	21,40	21,81	21,48	0,31	21,61	21,06	21,44	0,25	21,24	21,01	21,21	0,25
FeO*	30,17	29,91	29,96	0,20	29,40	29,68	29,75	0,48	30,00	30,05	29,87	0,21	29,58	30,42	29,96	0,30
MnO	1,49	1,58	1,56	0,09	1,39	1,34	1,41	0,10	1,69	1,77	1,57	0,16	1,41	1,45	1,40	0,07
MgO	6,34	6,20	6,23	0,08	6,19	6,34	6,22	0,12	6,23	6,19	6,13	0,14	6,40	6,52	6,43	0,10
CaO	2,76	2,64	2,81	0,11	3,07	3,16	2,97	0,16	3,03	3,10	3,04	0,12	2,79	2,82	2,77	0,13
Сумма	100,66	99,47	99,99	0,51	99,61	100,20	99,82	0,81	100,90	100,30	100,13	0,62	98,95	100,16	99,68	0,44
Рассчитано на 12 атомов кислорода																
Si	2,99	2,97	2,98	0,01	3,00	2,97	2,99	0,02	2,98	2,99	2,99	0,01	2,98	2,98	2,98	0,02
Al	1,98	2,01	1,99	0,01	1,98	2,01	1,99	0,02	1,98	1,95	1,98	0,02	1,99	1,94	1,97	0,02
Fe*	1,97	1,98	1,97	0,01	1,93	1,94	1,96	0,03	1,95	1,97	1,96	0,02	1,96	2,00	1,97	0,02
Mn	0,10	0,11	0,10	0,01	0,09	0,09	0,09	0,01	0,11	0,12	0,10	0,01	0,09	0,10	0,09	0,00
Mg	0,74	0,73	0,73	0,01	0,73	0,74	0,73	0,01	0,72	0,72	0,72	0,01	0,76	0,76	0,75	0,01
Ca	0,23	0,22	0,24	0,01	0,26	0,27	0,25	0,01	0,25	0,26	0,26	0,01	0,24	0,24	0,23	0,01
$X_{Mg}^{**}$	0,27	0,26	0,26	0,00	0,27	0,27	0,26	0,00	0,26	0,26	0,26	0,00	0,27	0,27	0,27	0,00
Alm <sup>***</sup>	0,65	0,65	0,64	0,00	0,64	0,64	0,64	0,00	0,64	0,63	0,64	0,01	0,64	0,64	0,64	0,01
Sps <sup>***</sup>	0,03	0,04	0,03	0,00	0,03	0,03	0,03	0,00	0,04	0,04	0,03	0,00	0,03	0,03	0,03	0,00
Prp <sup>***</sup>	0,25	0,24	0,24	0,00	0,24	0,25	0,24	0,00	0,24	0,24	0,24	0,00	0,25	0,25	0,25	0,00
Grs <sup>***</sup>	0,06	0,06	0,06	0,00	0,08	0,08	0,07	0,01	0,07	0,05	0,07	0,01	0,06	0,04	0,05	0,01
Adr <sup>***</sup>	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02	0,04	0,02	0,01

\* Общее железо; \*\*  $X_{Mg} = Mg/(Mg+Fe+Mn)$ ; \*\*\* Alm — альмандин ( $Fe_{2,92}^{2+}Al_2[SiO_4]_3$ ), Sps — спессартин ( $Mn_3Al_2[SiO_4]_3$ ), Prp — пироп ( $Mg_3Al_2[SiO_4]_3$ ), Grs — гроссуляр ( $Ca_3Al_2[SiO_4]_3$ ), Adr — андрадит ( $Ca_3Fe_2^{3+}[SiO_4]_3$ ).

обнажается в Центрально-Уральском поднятии и представляет собой фрагмент древнего зеленокаменного пояса. Исходная порода — кварц-полевошпат-биотит-гранатовый сланец (рис. 1). Структура гетеробластовая порфириобластовая, структура основной массы лепидо-гранобластовая.

Главные породообразующие минералы исходного сланца — в основном меланократовые минералы (об.%) — гранат (40–45) и биотит (20–25). Второстепенные минералы (об.%) — кварц (5–10), калиевый полевой шпат и плагиоклаз (суммарно 10–15), рудный минерал (не более 5).

**Гранат (Grt<sup>7</sup>).** Гранат, содержание которого в исходной породе достигает 40–45 об.%, образует в целом субидиоморфные изометричные порфириобласты (рис. 1), в поперечнике достигающие 3–4 мм. Под оптическим микроскопом гранат имеет розовый цвет. Порфириобласты граната разбиты редкими, беспоря-

дочно ориентированными, грубыми и неровными трещинами. Крупные порфириобласты граната имеют ситовидную структуру: в их центральных зонах наблюдаются округлые включения кварца изометричной и слегка удлиненной формы. В более мелких зернах граната кварцевых включений на порядок меньше или они отсутствуют, это позволяет предположить, что мелкие зерна являются сечениями краевых зон крупных кристаллов.

По химическому составу гранат относится к группе пиральспитов существенно альмандиновых (табл. 1). Порфириобласты граната имеют слабовыраженную зональность: центральные зоны граната характеризуются более магниезильным составом ( $Fe_{1,92}^{2+}Mg_{0,73}Mn_{0,09}Ca_{0,26}Al_{1,96}^{IV}Fe_{0,04}^{3+}Si_{2,99}Al_{0,01}^{VI}O_{12}$ ,  $X_{Mg} = 0,26$ ), чем краевые ( $Fe_{2,07}^{2+}Mg_{0,56}Mn_{0,11}Ca_{0,26}Al_{1,96}^{IV}Fe_{0,04}^{3+}Si_{2,99}Al_{0,01}^{VI}O_{12}$ ,  $X_{Mg} = 0,21$ ).

<sup>7</sup> Условные обозначения в тексте и на рисунках соответствуют общепринятой международной символике для минералов [Kretz, 1983]: Grt — гранат, Bt — биотит, Pl — плагиоклаз, Kfs — калиевый полевой шпат. Арабские цифры в надстрочном индексе химического элемента обозначают его валентность, римские цифры — его координацию в структуре минерала.

Ядра зерен (как это видно на наиболее крупных зернах — сечениях, прошедших через центр кристалла) составляют более 90 об.% всего граната, поэтому при сравнении состава исходного граната с составом преобразованного при ступенчатом ударно-волновом сжатии использованы составы этих зон. По данным РФА, параметр кубической решетки граната  $a = 1,154$  нм. Размер области когерентного рассеяния (ОКР) выше 100 нм.

**Биотит (Bt).** Биотит, содержание которого в исходной породе достигает 40–45 об.%, образует крупные субидiomорфные таблитчатые, слегка удлиненные зерна (размер до 0,4×1,0 мм) (рис. 1). Иногда встречаются скопления очень мелких ксеноморфных зерен. Распределение крупных зерен незакономерное. Скопления мелких зерен приурочены к интерстициям между зернами граната. Под оптическим микроскопом биотит интенсивно окрашен и сильно плеохроирует: цвет минерала меняется от светло-желтого до темно-коричневого. При скрещенных николях минерал имеет высокие (до зеленой четвертого порядка) интерференционные окраски. В крупных зернах биотита наблюдается хорошо выраженная весьма совершенная спайность в одном направлении, в мелких зернах трещины спайности не видны.

Биотит, слагающий исходный сланец, — антитфлогопит (табл. 2). В крупных зернах биотита выявлено некоторое снижение магнезиальности: отношение  $MgO/(MgO+FeO)$  в среднем составляет от 0,55 до 0,51 при движении от центра к краю зерна. Ядра зерен составляют более 98 об.% всего биотита, поэтому при сравнении исходного состава с составом преобразованного при ступенчатом ударно-волновом сжатии биотита использованы составы этих зон. По данным РФА, моноклинная решетка биотита имеет параметры  $a = 0,530$  нм,  $b = 0,921$  нм,  $c = 1,016$  нм,  $\beta = 99,05^\circ$ . Размер ОКР выше 100 нм.

**Плагиоклаз (Pl) и калиевый полевой шпат (Kfs).** Плагиоклаз и калиевый полевой шпат, суммарное содержание которых в исходной породе не превышает 10–15 об.%, чаще всего образуют агрегаты мелких (до 0,5–1,0 мм в поперечнике) гранобластовых зерен

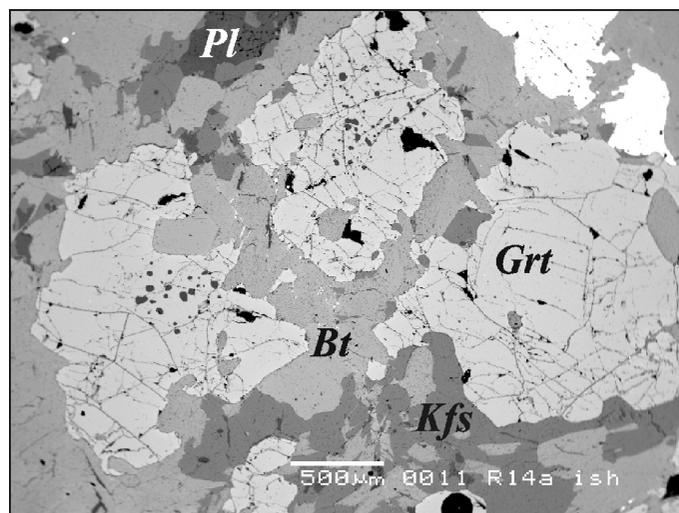


Рис. 1. Структурные особенности исходного кварц-полевошпат-биотит-гранатового сланца. Здесь и далее изображения шлифов в отраженных электронах

(рис. 1). По плагиоклазу в некоторых местах развивается соссюрит.

Учитывая небольшие размеры зерен плагиоклаза и калиевого полевого шпата, анализ химического состава проводили в их центральных зонах. Исходный плагиоклаз — андезин ( $An_{36-38}$ ). Химический состав калиевого полевого шпата представлен в табл. 3. По данным РФА, обе фазы хорошо кристаллизованы и имеют размеры ОКР выше 100 нм. Однако параметры кристаллических решеток плагиоклаза и полевого шпата не определялись из-за малого числа линий, присутствующих в спектре.

**Результаты эксперимента.** В образцах кварц-полевошпат-биотит-гранатового сланца после нагружения до 26, 36 и 52 ГПа детально изучены преобразования в гранате, биотите, плагиоклазе и калиевом полево шпате.

**Гранат (Grt).** В гранате ступенчатое ударно-волновое нагружение приводит прежде всего к механическим преобразованиям, которые заключаются в развитии трещиноватости. По сравнению с гранатом из исходной породы (рис. 2, а) трещиноватость

Таблица 2

Состав биотита и продуктов его изменения из исходного кварц-полевошпат-биотит-гранатового сланца (ish) и образцов, подвергнутых ступенчатому ударно-волновому сжатию до различных давлений

Состав	$P_{уд}$ , ГПа											
	0				26				36			
	анализ											
	R14aish-279	R14aish-281	среднее значение	стандартное отклонение	R14a26-285	R14a26-293	среднее значение	стандартное отклонение	R14a36-038	R14a36-039	среднее значение	стандартное отклонение
SiO <sub>2</sub>	34,85	34,95	34,93	0,10	34,82	34,74	34,76	0,20	34,53	34,78	34,65	0,56
TiO <sub>2</sub>	3,94	3,46	3,75	0,22	3,83	3,97	3,89	0,22	2,94	3,79	3,95	0,33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,98	17,11	17,19	0,28	16,76	16,93	16,89	0,16	16,67	17,00	16,63	0,30
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26	0,00	0,04	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
FeO*	17,38	16,85	17,08	0,22	17,60	19,07	18,32	0,85	19,03	18,94	19,94	1,80

Окончание табл. 2

Состав	$P_{уд}$ , ГПа											
	0				26				36			
	анализ											
	R14aish-279	R14aish-281	среднее значение	стандартное отклонение	R14a26-285	R14a26-293	среднее значение	стандартное отклонение	R14a36-038	R14a36-039	среднее значение	стандартное отклонение
MgO	11,84	12,14	12,03	0,13	11,91	10,96	11,40	0,44	11,50	11,67	11,24	0,77
CaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,09
Na <sub>2</sub> O	0,26	0,34	0,20	0,15	0,24	0,20	0,22	0,11	0,00	0,23	0,12	0,11
K <sub>2</sub> O	9,73	9,60	9,72	0,15	9,70	9,51	9,53	0,21	9,69	9,77	9,91	0,20
Сумма	95,19	95,40	95,28	0,45	95,26	96,05	95,22	0,55	94,50	96,39	96,85	0,76
Рассчитано на 22 атома кислорода												
Si	5,31	5,33	5,32	0,02	5,31	5,30	5,31	0,01	5,34	5,28	5,27	0,05
Al	3,05	3,08	3,08	0,04	3,01	3,05	3,04	0,03	3,04	3,04	2,98	0,04
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Ti	0,45	0,40	0,43	0,03	0,44	0,46	0,45	0,03	0,34	0,43	0,45	0,04
Fe*	2,22	2,15	2,17	0,03	2,24	2,43	2,34	0,11	2,46	2,40	2,54	0,24
Mg	2,69	2,76	2,73	0,03	2,71	2,49	2,60	0,10	2,65	2,64	2,55	0,16
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
Na	0,08	0,10	0,06	0,04	0,07	0,06	0,06	0,03	0,00	0,07	0,03	0,03
K	1,89	1,87	1,89	0,02	1,89	1,85	1,86	0,03	1,91	1,89	1,92	0,02
$X_{Mg}^{**}$	0,55	0,56	0,56	0,01	0,55	0,51	0,53	0,02	0,52	0,52	0,50	0,04
Кислород	22,00	22,00	22,00	0,00	22,00	22,00	22,00	0,00	22,00	22,00	22,00	0,00
Состав	$P_{уд}$ , ГПа											
	52***											
	анализ											
	R14a52-068***	R14a52-080***	среднее значение	стандартное отклонение	R14a52-056	R14a52-075	среднее значение	стандартное отклонение	R14a52-067	R14a52-070	среднее значение	стандартное отклонение
SiO <sub>2</sub>	35,31	36,60	35,51	0,56	36,08	42,51	39,92	5,38	35,99	41,79	36,85	3,31
TiO <sub>2</sub>	3,42	4,01	3,60	0,22	3,36	3,23	2,86	1,08	3,56	3,19	3,39	0,55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,94	17,45	17,04	0,30	17,78	16,91	17,35	1,40	17,29	18,13	17,64	0,95
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	0,15	0,35	0,27	0,00	0,16	0,29
FeO*	19,00	20,43	18,71	0,93	20,52	17,88	19,29	4,02	20,02	16,89	19,98	2,18
MgO	11,60	12,09	11,92	0,22	13,09	9,20	9,44	2,46	12,01	9,40	11,47	1,66
CaO	0,19	0,24	0,07	0,11	0,24	1,54	0,93	1,06	0,00	1,88	0,59	0,87
Na <sub>2</sub> O	0,24	0,00	0,17	0,13	0,00	1,41	0,70	0,89	0,00	1,01	0,53	0,61
K <sub>2</sub> O	9,96	7,70	9,56	0,92	8,42	4,90	6,67	2,40	9,29	6,48	7,44	3,00
Сумма	96,76	98,68	96,73	1,02	99,59	97,82	97,61	1,31	98,43	99,50	98,30	1,23
Рассчитано на 22 атома кислорода												
Si	5,33	5,36	5,34	0,01	5,26	6,04	5,79	0,55	5,32	5,90	5,40	0,38
Al	3,02	3,01	3,02	0,03	3,05	2,83	2,98	0,26	3,01	3,01	3,05	0,19
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,02	0,04	0,03	0,00	0,02	0,03
Ti	0,39	0,44	0,41	0,02	0,37	0,34	0,31	0,12	0,40	0,34	0,37	0,06
Fe*	2,40	2,50	2,35	0,09	2,50	2,12	2,36	0,56	2,48	1,99	2,45	0,29
Mg	2,61	2,64	2,67	0,05	2,84	1,95	2,06	0,56	2,65	1,98	2,51	0,40
Ca	0,03	0,04	0,01	0,02	0,04	0,24	0,14	0,16	0,00	0,28	0,09	0,14
Na	0,07	0,00	0,05	0,04	0,00	0,39	0,19	0,23	0,00	0,28	0,15	0,17
K	1,92	1,44	1,84	0,20	1,57	0,89	1,25	0,48	1,75	1,17	1,40	0,58
$X_{Mg}^{**}$	0,52	0,51	0,53	0,01	0,53	0,48	0,46	0,07	0,52	0,50	0,50	0,04
Кислород	22,00	22,00	22,00	0,00	22,00	22,00	22,00	0,00	22,00	22,00	22,00	0,00

\* Общее железо; \*\*  $X_{Mg} = Mg/(Mg+Fe)$ ; \*\*\* анализы 068 и 080 принадлежат биотиту, 056 и 075 — однородному стеклу, 067 и 070 — стеклу с рингвидитом (подробности см. в тексте).

Таблица 3

**Состав калиевых полевых шпатов из исходного кварц-полевошпат-биотит-гранатового сланца (ish) и образцов, подвергнутых ступенчатому ударно-волновому сжатию до различных давлений**

Состав	$P_{уд}$ , ГПа															
	0				26				36				52			
	анализ															
	R14aish-243	R14aish-246	среднее значение	стандартное отклонение	R14a26-228	R14a26-233	среднее значение	стандартное отклонение	R14a36-013	R14a36-014	среднее значение	стандартное отклонение	R14a52-021	R14a52-023	среднее значение	стандартное отклонение
SiO <sub>2</sub>	64,21	63,84	63,66	0,49	63,99	63,58	64,23	0,52	64,13	64,16	64,14	0,02	65,91	62,30	63,98	1,25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,68	19,05	18,81	0,15	19,26	18,63	18,97	0,21	19,04	18,79	18,92	0,17	18,76	18,68	18,72	0,14
FeO*	0,00	0,00	0,07	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	0,17	0,24	0,36	0,37	0,26	0,21
CaO	0,19	0,00	0,06	0,10	0,00	0,00	0,04	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	0,00	0,15	0,19
Na <sub>2</sub> O	1,06	1,03	1,00	0,25	0,97	1,11	1,05	0,21	1,13	1,05	1,09	0,06	1,40	1,34	1,44	0,23
K <sub>2</sub> O	15,03	14,78	14,96	0,37	15,09	13,91	14,50	0,45	14,88	14,67	14,78	0,14	12,25	13,28	13,49	0,78
BaO	1,45	1,55	1,57	0,17	1,16	1,43	1,30	0,17	1,71	1,61	1,66	0,07	0,58	2,01	1,11	0,64
Сумма	100,62	100,24	100,13	0,70	100,47	98,66	100,08	0,64	100,88	100,62	100,75	0,18	99,46	97,99	99,16	0,68
Рассчитано на 8 атомов кислорода																
Si	2,97	2,96	2,96	0,01	2,96	2,98	2,97	0,01	2,96	2,97	2,97	0,01	3,01	2,96	2,98	0,02
Al	1,02	1,04	1,03	0,01	1,05	1,03	1,03	0,01	1,04	1,03	1,03	0,01	1,01	1,05	1,03	0,01
Fe*	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Ba	0,03	0,03	0,03	0,00	0,02	0,03	0,02	0,00	0,03	0,03	0,03	0,00	0,01	0,04	0,02	0,01
Ca	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01
Na	0,10	0,09	0,09	0,02	0,09	0,10	0,09	0,02	0,10	0,09	0,10	0,00	0,12	0,12	0,13	0,02
K	0,89	0,88	0,89	0,02	0,89	0,83	0,86	0,03	0,88	0,87	0,87	0,01	0,71	0,80	0,80	0,05
$\Sigma_{Ba+Ca+Na+K}$	1,02	1,00	1,01	0,01	1,00	0,96	0,98	0,03	1,01	0,99	1,00	0,01	0,86	0,97	0,96	0,06
$\Sigma_{Si+Al}$	3,99	4,00	4,00	0,01	4,01	4,01	4,01	0,01	4,00	4,00	4,00	0,00	4,03	4,00	4,00	0,01

\* Общее железо.

минерала сильно увеличивается уже при нагрузке до 26 ГПа (рис. 2, б). На фоне протяженных грубых трещин, характерных для исходного граната, после нагрузки 26 ГПа гранат покрывается сетью более тонких коротких трещин, большинство которых простирается прямолинейно или слабо изгибается (рис. 2, б). При нагрузке 36 ГПа сеть трещин в гранате становится еще гуще, причем многие трещины уже не прямолинейные, а извивающиеся, часто меняющие направление (рис. 3, а). При нагрузке 52 ГПа гранат также сильно трещиноват. Характер трещиноватости схож с наблюдаемым при нагрузке 36 ГПа. Помимо развитой сети трещин в гранате при нагрузке 52 ГПа наблюдаются следы подплавления краев его зерен (рис. 3, б). Границы зерен граната местами становятся размытыми и округлыми. Ширина зон подплавления не превышает 1 мкм, в связи с этим их количественный микрондовый анализ невозможен.

По данным РФА, при всех изучаемых нагрузках количество кристаллического граната идентично исходному. Параметры кристаллической решетки граната с увеличением ударно-волновой нагрузки также не изменяются по сравнению с исходными. Размер ОКР граната при нагрузках 26 и 36 ГПа не отличается от

исходного (превышает 100 нм). При нагрузке 52 ГПа размер ОКР граната снижается до 45 нм.

Значимые изменения химического состава кристаллического граната не выявлены ни при одной из изученных ударных нагрузок (табл. 1; рис. 4), однако очевидно увеличение дисперсии химического состава граната с ростом ударной нагрузки (рис. 4). Кроме того, сравнение изменения средних значений содержания элементов с ростом ударной нагрузки выявляет тренд выноса алюминия, нарастающий с увеличением ударной нагрузки.

**Биотит (Bt).** При ступенчатом ударно-волновом нагружении в биотите также наблюдаются механические преобразования, которые в силу пластичности слоистого минерала заключаются не столько в трещиноватости, сколько в образовании полос смятия. Эти преобразования отмечаются уже при нагрузке 26 ГПа (рис. 5) — полосы смятия в биотите часто параллельны или субпараллельны. При нагрузке 36 ГПа наряду со смятием и трещиноватостью наблюдается начало плавления биотита по границам зерен, однако ширина области подплавления не превышает 1–2 мкм. При нагрузке 52 ГПа наблюдается максимальная степень плавления биотита: зоны плавления

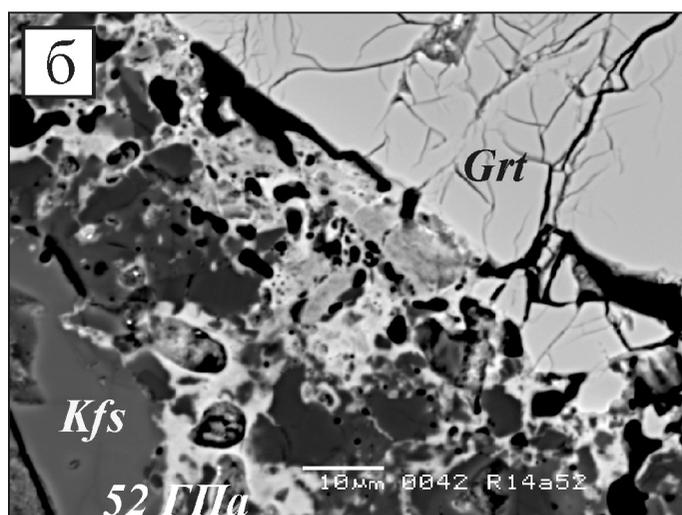
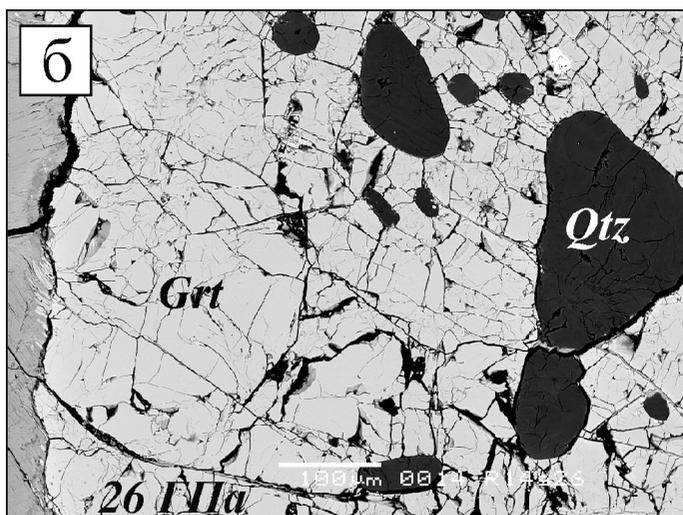
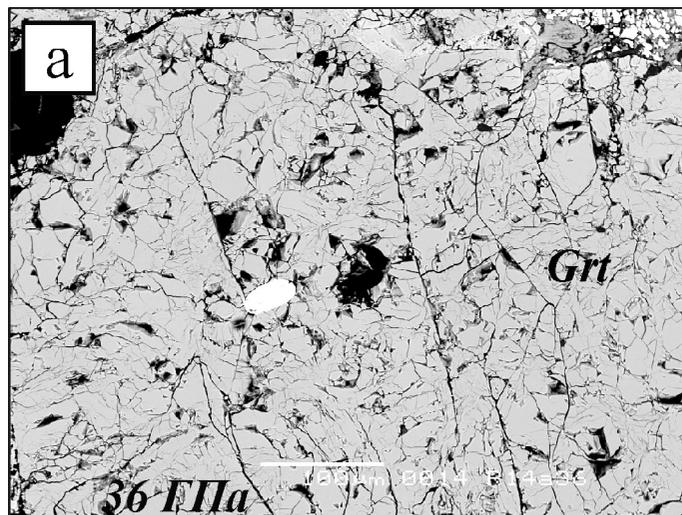
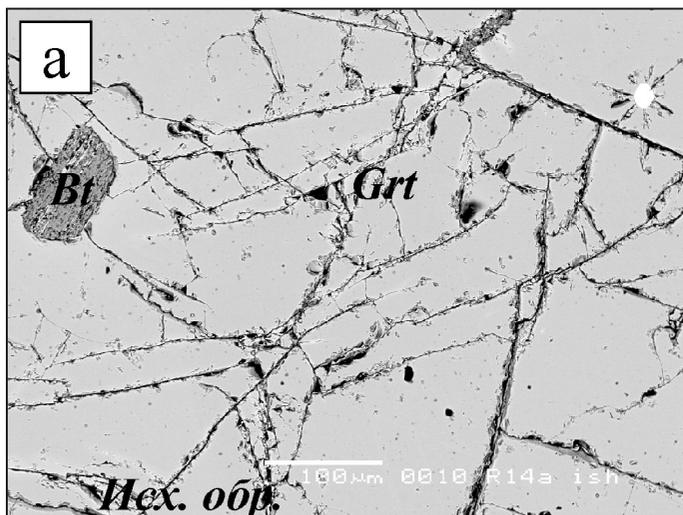


Рис. 2. Трещиноватость граната в исходном (а) и испытывшем ударную нагрузку 26 ГПа (б) кварц-полевошпат-биотит-гранатовом сланце

Рис. 3. Трещиноватость граната в испытывшем ударную нагрузку 36 ГПа (а) и 52 ГПа (б) кварц-полевошпат-биотит-гранатовом сланце

становятся намного шире (рис. 6, а). Их мощность иногда достигает 20–40 мкм (рис. 6, б). При этой нагрузке крупные зерна если и плавятся, то только по краям, в то время как мелкие чешуйки могут быть расплавлены полностью. Полностью расплавленные зерна биотита могут сохранять свои границы и форму, но иногда они теряют первоначальные очертания, их границы становятся нечеткими, размытыми. На фотографиях, выполненных в СЭМ, на участках плавления зерен биотита часто наблюдается большое количество пустот (пузырей), которые возникают при его «вскипании», т.е. при уходе из биотитового расплава флюидной фазы (рис. 6).

Выделяются два типа стекла, образующегося по биотиту, — однородное (однофазное) и с микровключениями ярко-белой фазы на изображениях в отраженных электронах (рис. 6, б). Однородное стекло чаще встречается на краях зерен и иногда заполняет тончайшие трещины (мощность 1–2 мкм) в расположенном рядом кварце (рис. 6, б). Стекло с микровключениями новообразованных фаз часто

образует мощные (до 40 мкм) каймы вокруг крупных зерен биотита (рис. 6, б) и иногда целиком замещает его мелкие зерна. На детальной фотографии (рис. 6, в) отчетливо видны новообразованные ярко-белые фазы и апобиотитовый остаток, заполняющий интерстиции между ними. Размеры обеих фаз не превышают 1–1,5 мкм. Основываясь на ярком цвете новообразований, а также по аналогии с результатами, полученными в других экспериментах со ступенчатым ударно-волновым сжатием породы и нагружением ее сферическими сходящимися ударными волнами, где из аналогичного расплава кристаллизовался рингвидит, идентифицированный химически и методом СКР [Козлов и др., 2003; Kozlov et al., 2002, 2003; Фельдман и др., 2006а, б; Сазонова и др., 2006], можно предположить, что в данном случае мы также имеем дело с глиноземистым рингвидитом.

По данным РФА, после эксперимента по ударно-волновому нагружению с нагрузкой 26 ГПа содержание кристаллического биотита в образце составляет 68% от его количества в исходной пробе. В образце,

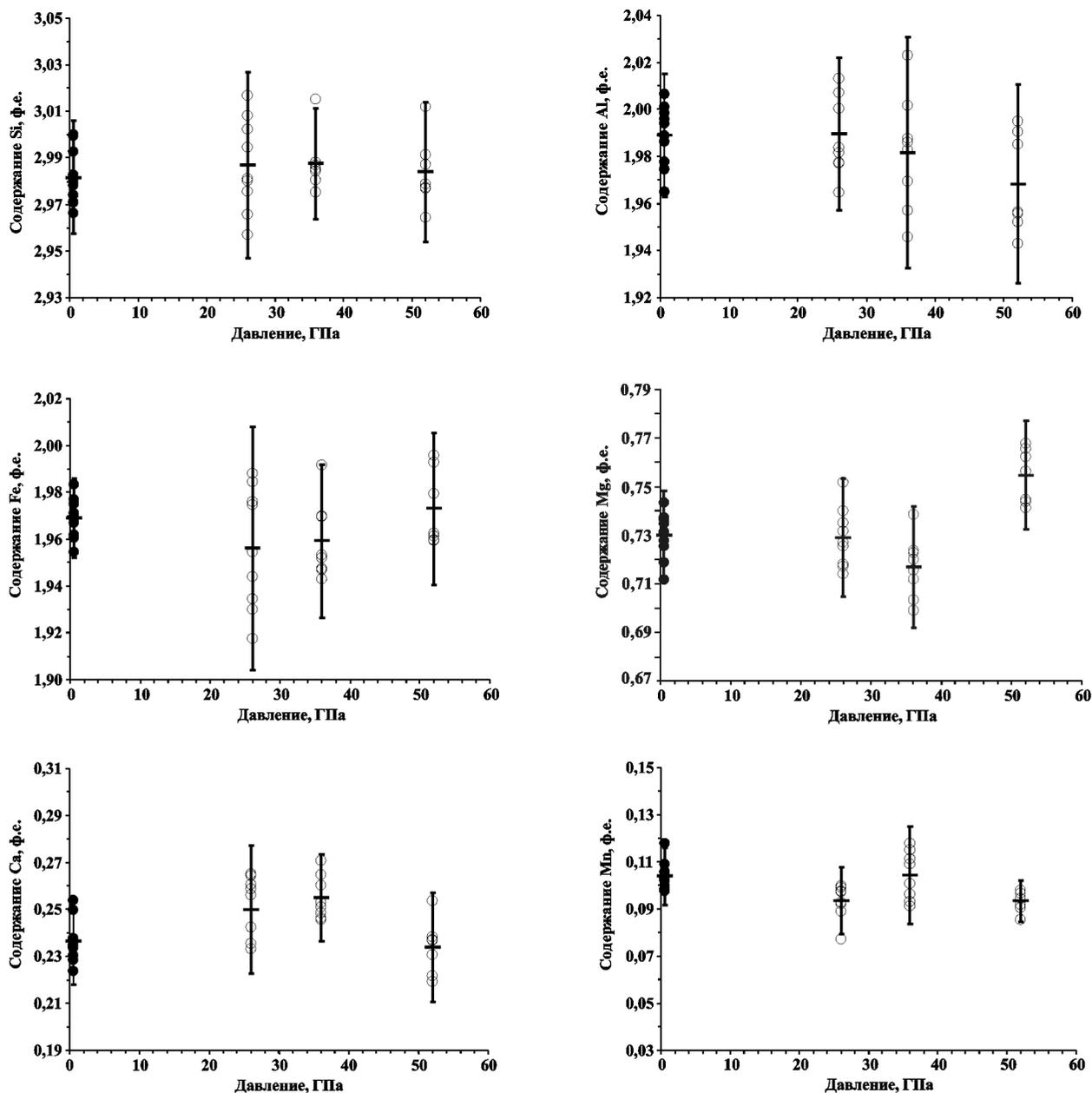


Рис. 4. Изменение содержания породообразующих элементов в гранатах исходных (черные кружки) и подвергнутых ударно-волновому нагружению (белые кружки) кварц-полевошпат-биотит-гранатовых сланцев в зависимости от величины ударной нагрузки. Вертикальными линиями с горизонтальными рисками отмечены значения среднеквадратичного отклонения от среднего содержания элемента, которое показано горизонтальными линиями

подвергшемся ударно-волновому нагружению 36 ГПа, содержание биотита составляет 52% от исходного количества. После ударно-волнового нагружения 52 ГПа оно снижается до 45% от исходного уровня. Размер ОКР и параметры кристаллических решеток биотита не отличаются от исходных значений ни при одной величине приложенной ударной нагрузки.

Значимые химические преобразования отмечены только при плавлении биотитов при нагрузке 52 ГПа (табл. 2; рис. 7). Биотит, сохранивший кристалличность при всех изученных величинах ударной нагрузки, в том числе при 52 ГПа (табл. 2, анализы R14a52-068 и R14a52-080; рис. 7), химически значимо не отличается от исходного. Однородное стекло (табл. 2,

анализы R14a52-056 и R14a52-075), возникающее при плавлении биотита, по сравнению с исходным биотитом нередко обогащено кремнием, натрием и кальцием, обеднено калием, магнием и титаном (рис. 7). Анализ по площади стекла с новообразованными фазами (табл. 2, анализы R14a52-067 и R14a52-070) показывает, что по сравнению с исходным биотитом смесь этих фаз обогащена кальцием и натрием, обеднена калием и магнием (рис. 7).

**Плагиоклаз (Pl) и калиевый полевой шпат (Kfs).** Плагиоклаз и калиевый полевой шпат при изученных значениях ударной нагрузки претерпевают как механические, так и химические преобразования. Механические трансформации заключаются в аморфизации

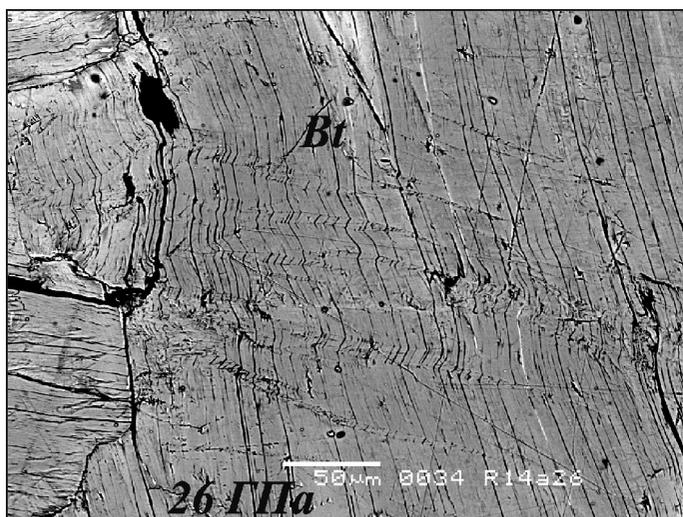


Рис. 5. Механические преобразования биотита (полосы смятия) в испытывавшем ударную нагрузку 26 ГПа кварц-полевошпат-биотит-гранатовом сланце

этих минералов. По данным РФА, после нагрузки 26 ГПа содержание кристаллического плагиоклаза в образце составляет 11 об.% от его количества в исходной пробе, а содержание калиевого полевого шпата — 6 об.%. Размеры ОКР этих кристаллических фаз превышают 100 нм. После нагрузки 36 ГПа в образце не зафиксирован кристаллический плагиоклаз, а содержание кристаллического калиевого полевого шпата составляет 5 об.% от его исходного количества. Кроме того, зафиксировано снижение размера ОКР калиевого полевого шпата до 40 нм, т.е. при этой нагрузке происходит диспергирование минерала. После нагрузки 52 ГПа в образце не фиксируется ни кристаллический плагиоклаз, ни кристаллический калиевый полевой шпат. На фотографиях, выполненных в СЭМ, аморфизованный плагиоклаз при всех изученных значениях ударной нагрузки, как и в ранее изучавшихся образцах [Белятинская и др., 2010], отличается более светло-серым оттенком и меньшим содержанием трещин, сильно развитых в сохранившем частичную кристалличность при нагрузке 26 и 36 ГПа плагиоклазе. Аморфизованный при различных величинах ударной нагрузки калиевый полевой шпат на фотографиях, выполненных в СЭМ, никак не отличается от кристаллического.

Химические преобразования плагиоклаза аналогичны зафиксированным ранее [Белятинская и др., 2010] и заключаются в увеличении дисперсии химического состава минерала с ростом ударной нагрузки, а также в выносе натрия и кальция из аморфизованного плагиоклаза после воздействия нагрузки в 36 и 52 ГПа. При нагрузке 36 и 52 ГПа в аморфизованных плагиоклазах фиксируется привнос калия. С ростом ударной нагрузки наблюдается отмеченное ранее [Белятинская и др., 2010] для аморфизованных плагиоклазов уменьшение суммы катионов вплоть до 0,88–0,91 формульной единицы (ф.е.) после нагрузки 52 ГПа вместо 1,0 ф.е. у ис-

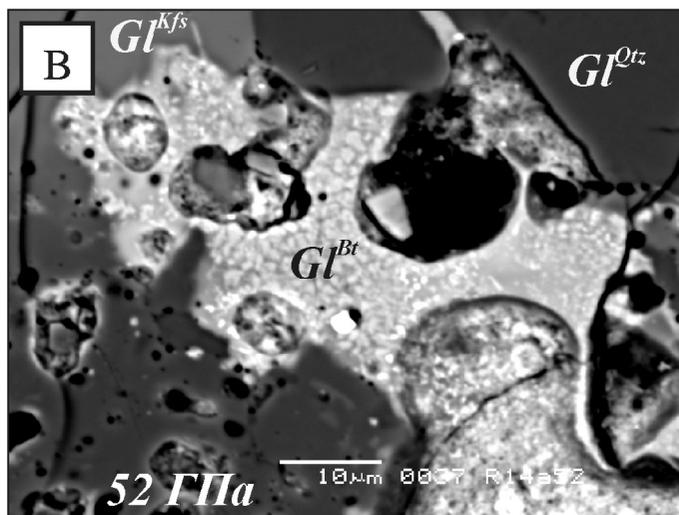
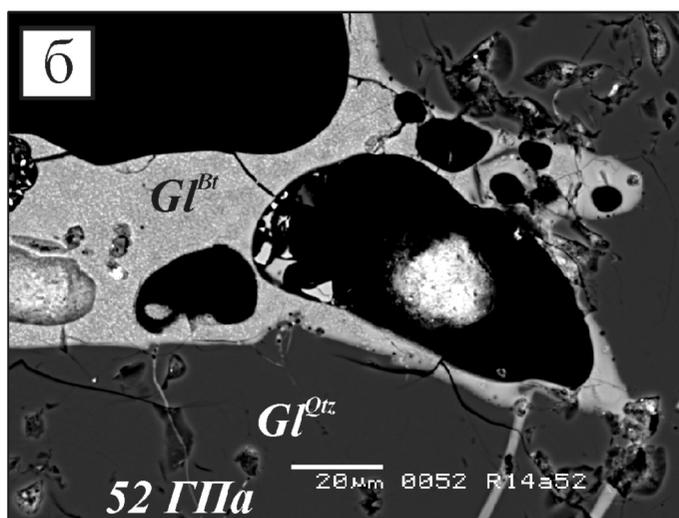
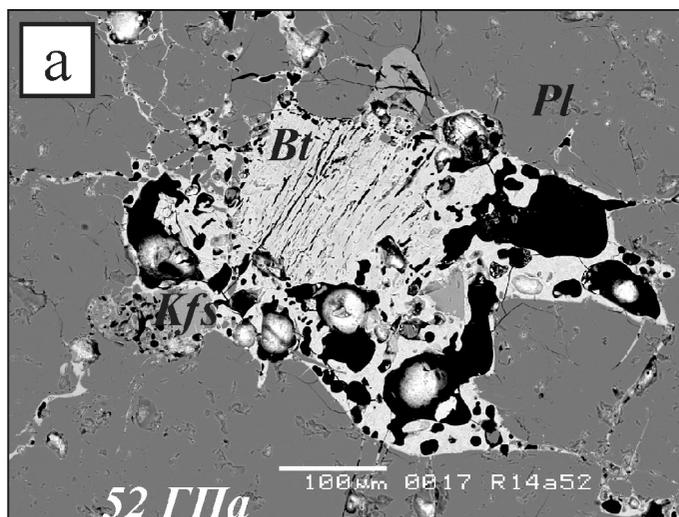


Рис. 6. Плавление биотита в испытывавшем ударную нагрузку 52 ГПа кварц-полевошпат-биотит-гранатовом сланце: а — общий вид; б — два типа стекол (однородное стекло и стекло с ярко-белыми в СЭМ микровключениями), образованных по биотиту при ударной нагрузке 52 ГПа; в — детальное изображение стекла с новообразованными микровключениями

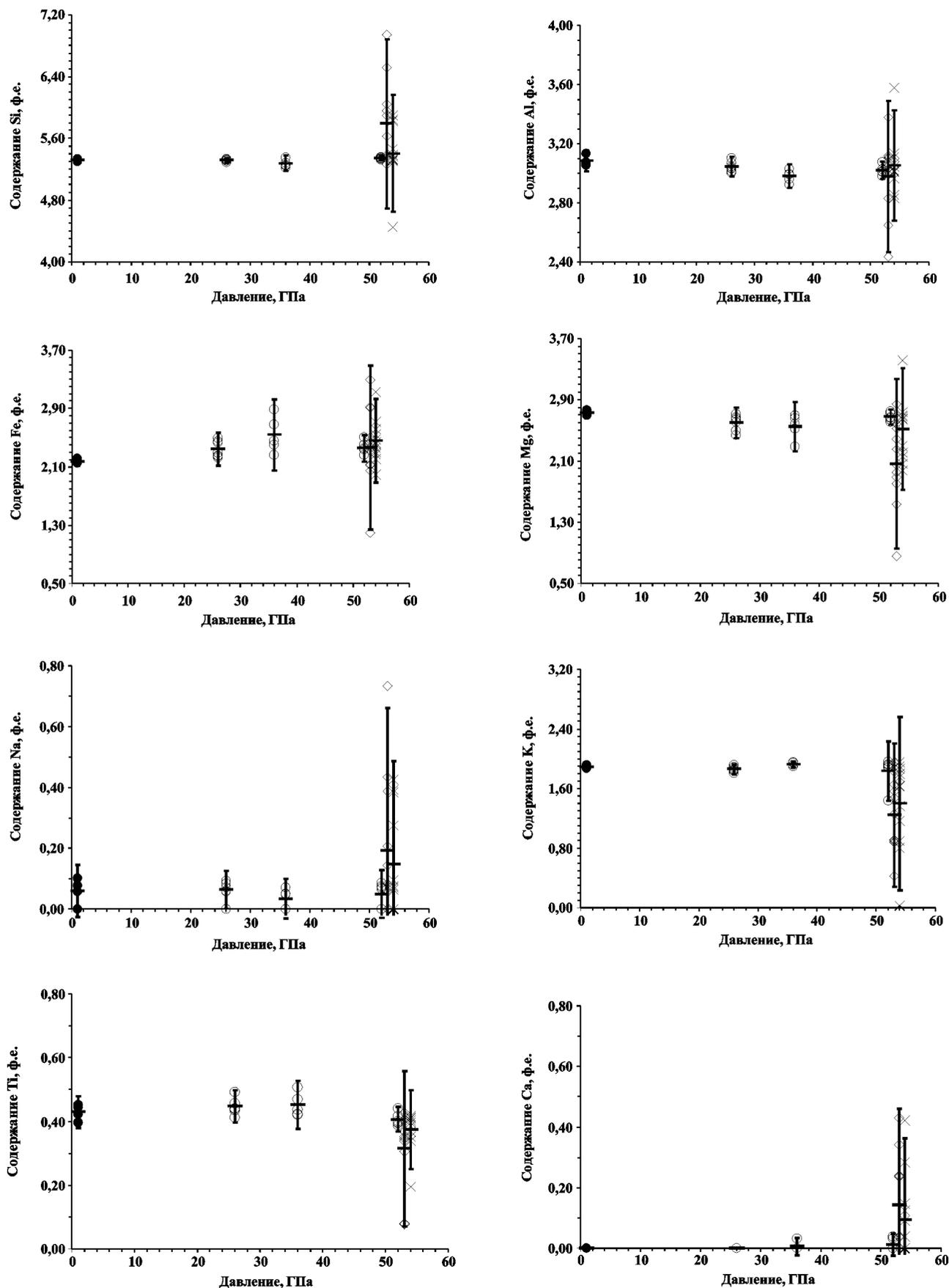


Рис. 7. Изменение содержания породообразующих элементов в биотитах исходных (черные кружки) и подвергнутых ударно-волновому нагружению (белые кружки — трещиноватые биотиты; для стекол по биотиту: белые ромбики — однородное стекло, крестики — стекло, содержащее микровключения ярко-белой новообразованной фазы) кварц-полевошпат-биотит-гранатовых сланцев в зависимости от величины ударной нагрузки. Остальные условные обозначения см. на рис. 4

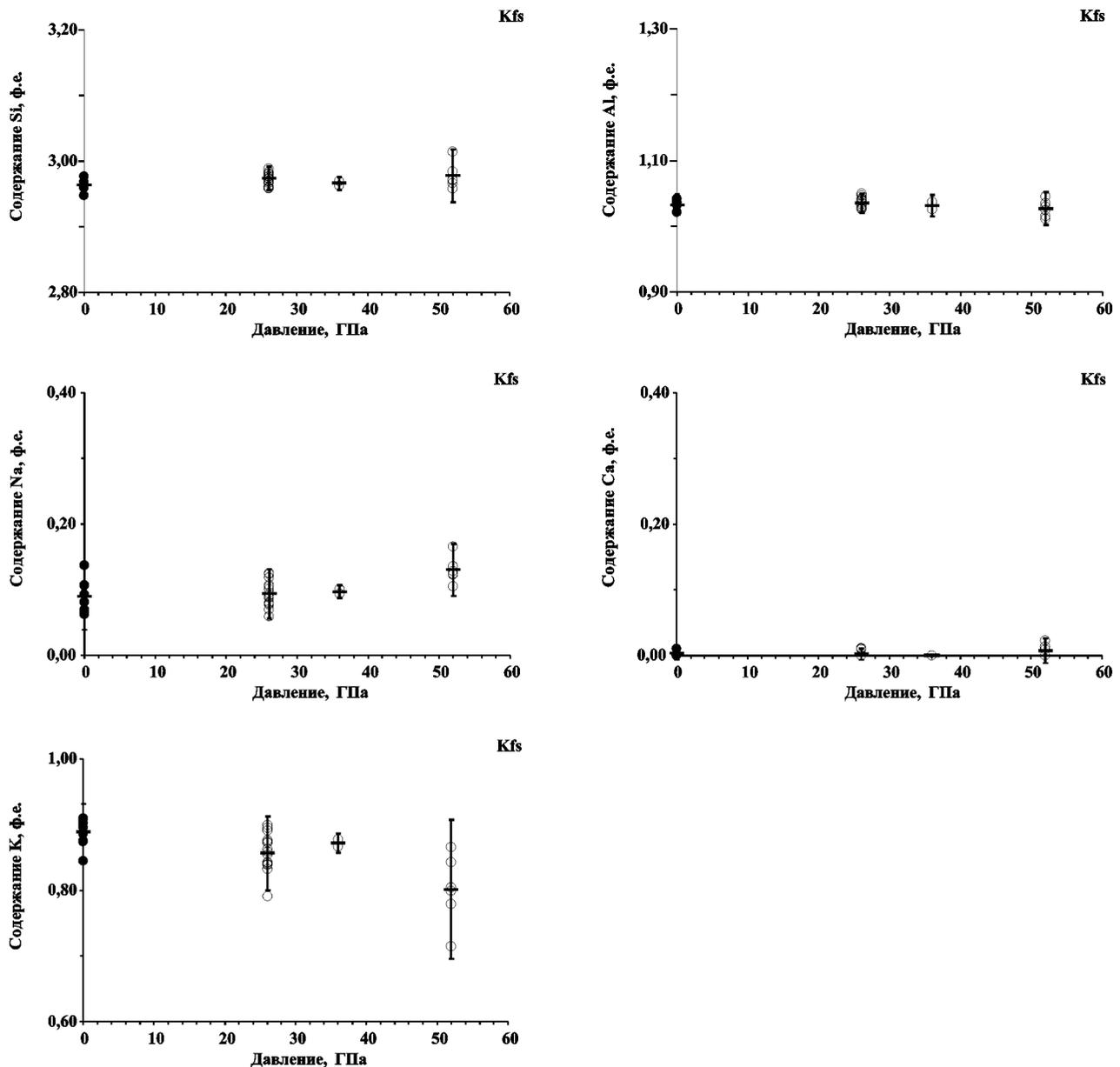


Рис. 8. Изменение содержания порообразующих элементов в калиевых полевых шпатах исходных (черные кружки) и подвергнутых ударно-волновому нагружению (белые кружки) кварц-полевошпат-биотит-гранатовых сланцев в зависимости от величины ударной нагрузки. Остальные условные обозначения см. на рис. 4

ходного плагиоклаза. Кроме того, при нагрузке 36 и 52 ГПа в аморфизованных плагиоклазах, аналогично данным, полученным ранее [Белятинская и др., 2010], происходит увеличение суммы Al+Si до  $4,07 \pm 0,03$  ф.е., тогда как в исходном плагиоклазе сумма стехиометрична и составляет  $4,00 \pm 0,01$  ф.е. Эти факты свидетельствуют о разрушении кремнекислородных тетраэдров плагиоклаза, т.е. о начале плавления минерала. Сохранивший кристалличность при ударной нагрузке 26 ГПа плагиоклаз значимых химических преобразований не проявляет.

Для калиевого полевого шпата фиксируется вынос калия при увеличении ударной нагрузки (табл. 3; рис. 8). Содержание остальных элементов значимо не меняется ни при одной примененной ударной нагрузке, хотя увеличение дисперсии химического

состава минерала с ростом ударной нагрузки очевидно (табл. 3; рис. 8). Уменьшение суммы катионов при 52 ГПа до 0,86 ф.е. вместо 1,0 ф.е. у исходного калиевого полевого шпата (табл. 3) характерно для этого минерала при ступенчатом ударно-волновом сжатии, как и для плагиоклаза. В то же время ни при одной изученной величине ударной нагрузки не происходит изменение суммы Al+Si в калиевых полевых шпатах (табл. 3).

**Обсуждение результатов.** К ударно-волновому нагружению среди изученных минералов наиболее чувствителен плагиоклаз, в котором ярче всего проявлены как механические, так и химические преобразования. Кристаллическая составляющая плагиоклаза исчезает уже после воздействия нагрузки, равной 36 ГПа. Химические преобразования минерала заключаются в

значимом выносе натрия и кальция и привносе калия, что фиксируется в аморфизованных плагиоклазах при нагрузке в 36 и 52 ГПа. При этих же величинах ударной нагрузки фиксируется и начало плавления плагиоклаза. Калиевый полевой шпат, как и плагиоклаз, подвергается интенсивной аморфизации. Кристаллический калиевый полевой шпат исчезает при нагрузке 52 ГПа. Его химические преобразования заключаются в выносе калия, наиболее интенсивном при 52 ГПа. Биотит подвергается лишь частичной аморфизации даже при 52 ГПа. Наблюдается также плавление биотита с образованием стекла двух типов — однородного и содержащего новообразованные фазы (предположительно глиноземистый рингвудит). Максимальная степень плавления наблюдается при 52 ГПа. Значимые химические преобразования фиксируются только для стекол по биотиту при нагрузке 52 ГПа и заключаются в том, что по сравнению с исходным биотитом однородное стекло обогащено кремнием, натрием и кальцием, обеднено калием, магнием и титаном; стекло с новообразованными фазами также обогащено кальцием и натрием, обеднено калием и магнием. Химические преобразования биотита, сохранившего свою кристалличность при различных величинах ударной нагрузки, заключаются лишь в увеличении дисперсии химического состава с ростом ударной нагрузки. Кристаллическая решетка граната обладает высокой степенью устойчивости в изученном диапазоне нагрузки. Аморфизация граната при исследованных нагрузках не зафиксирована.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белятинская И.В., Фельдман В.И., Милявский В.В. и др. Ударно-метаморфические преобразования породообразующих минералов полосчатого амфиболита Южного Урала // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2010. № 5. С. 27–37.

Козлов Е.А., Сазонова Л.В., Фельдман В.И. и др. Образование рингвудита при ударно-волновом нагружении двуслюдяно-кварцевого сланца: экспериментальные данные // Докл. РАН. 2003. Т. 390, № 4. С. 571–573.

Козлов Е.А., Сазонова Л.В., Белятинская И.В. Химические особенности трансформации граната в ударных волнах (по результатам экспериментов) // Вестн. Отделения наук о Земле РАН. 2004. № 1 (22). С. 37.

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

Сазонова Л.В., Фельдман В.И., Козлов Е.А. и др. Особенности образования глиноземистого рингвудита при ударно-волновом нагружении (экспериментальные данные) // Там же. 2006. № 2. С. 161–166.

Фельдман В.И., Сазонова Л.В., Козлов Е.А., Жугин Ю.Н. Особенности трансформации некоторых минералов в ударных волнах — сравнение природных и экспериментальных данных // Препринт ВНИИТФ № 199. Изд-во РФЯЦ—ВНИИТФ. Снежинск, 2002. 25 с.

Химические преобразования граната заключаются только в увеличении дисперсии химического состава граната с ростом ударной нагрузки.

**Заключение.** Сравнение результатов преобразования граната и биотита при ступенчатом ударно-волновом сжатии с диаплектовыми изменениями перечисленных минералов в природе и в экспериментах со сферической сходящейся ударной волной [Сазонова и др., 1997; Козлов и др., 2004; Фельдман и др., 2002, 2006а, б, 2007] показало: во всех трех случаях механические деформации минералов происходят при практически одинаковых величинах ударной нагрузки; образование ударно-термических агрегатов при плоской геометрии нагружения не зафиксировано даже при 52 ГПа (в сферических ударных волнах замещение биотита и граната агрегатом новообразованных минералов фиксируется начиная с 21–22 ГПа для биотита и 30–35 ГПа для граната [Фельдман и др., 2006а, б, 2007]).

Среди причин перечисленных расхождений могут быть: 1) разная температура нагрева сжимаемого образца при одинаковых ударных напряжениях; 2) различия в структурно-текстурных характеристиках пород, использованных теми или иными исследователями; 3) разное количество одних и тех же минералов в образцах; 4) колебания состава использованных минералов; 5) разная длительность нагружения при плоской и сферической геометрии эксперимента при одинаковой величине итоговых ударных напряжений.

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

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

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

Kozlov E.A., Sazonova L.V., Fel'dman V.I. et al. Formation of ringwoodite in high-explosive experiments on muscovite-biotite-quartz slates // Bayerisches Forschungsinstitut für Experiment. Geochem. und Geophysik Univers. Bayreuth. Ann. Rep. 2002. Jahresbericht. S. 100–101.

Kozlov E.A., Sazonova L.V., Fel'dman V.I. Crystallochemical structure of rock-forming minerals and peculiarities, sequence and completeness of physicochemical transformations in weak and strong shock waves // Fifth Intern. Symp. High Dynamic Pressures, June 23–27, Saint-Malo, France. Proceed. 2003. Vol. 1. P. 389–397.

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

Поступила в редакцию  
25.05.2011