

Е. В. Белогуб, Б. В. Литвинов, Е. А. Козлов, Ю. И. Жугин

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД ПОД ДЕЙСТВИЕМ СФЕРИЧЕСКИ СХОДЯЩЕЙСЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

E. V. Belogub, B. V. Litvinov, E. A. Kozlov, Yu. I. Zhugin

TRANSFORMATION OF ROCKS UNDER THE ACTION OF THE SPHERICAL CONVERGING SHOCK WAVE.

Results about the influence of the spherical converging shock wave on samples of serpentinite, sulphide ore, graphic granite, graphitic quartzite have been described. Pressures during experiments were close to the pressure in the mantle. The results of shock and shock-thermal actions in the safe samples have been investigated with the help of the optical methods, electron microscopy, X-ray analysis and IR-spectroscopy.

The shock action is the formation of planar elements in quartz, mechanical twins in albite, high-pressure phases (coesite), gradient of composition in a zone of melt quartz-feldspathic glasses. The shock-thermal action is crystallization of silicate, sulphide melts of high-temperature, stoichiometrically «refined» minerals and decay of aquiferous minerals.

Введение

После завершения исследования поведения в сферических ударных и изэнтропических волнах ряда конструкционных материалов [7], в РФЯЦ-ВНИИТФ (г. Снежинск) в 1990—1998 г. проведены [2, 5, 6, 16, 17] эксперименты по изучению действия ударных волн на различные горные породы с использованием оригинальной установки [7]. Сущность эксперимента состоит в воздействии на герметически заваренный в металлический гермочехол образец горной породы сферически сходящейся ударной волны. В разных слоях по радиусу обжатых и сохраненных образцов реализуется широкий диапазон давлений, температур, плотностей энергии. Во внешних слоях шаров из различных горных пород давления во фронте сходящейся ударной волны составляли 20—30 ГПа, а на радиусе $R = 1$ мм достигали 250—300 ГПа. Для проведения всесторонних исследований уникальных образцов всеми доступными в России методами отобраны пробы или разрезанные по меридиональной плоскости фрагменты обжатых шаров вместе с образцами-свидетелями, не претерпевшими ударно-волнового нагружения были переданы РФЯЦ-ВНИИТФ в ГЕОХИ им. В. И. Вернадского РАН (Москва), МГУ им М. В. Ломоносова, ВСЕГЕИ им. А. П. Карпинского (С.-Петербург), НИИФ СПбГУ, ОИГГиМ (Новосибирск), ИЗК СО РАН (Иркутск), ИМин УрО РАН (Миасс).

Материалом для экспериментов, результаты которых изучались в Институте минералогии (ИМин УрО РАН), служили: серпентинит, письменный гранит, графитистый кварцит, колчеданная руда. Такой выбор был обусловлен широкой распространенностью этих пород и руд, важной ролью некоторых из них в строении коры и мантии Земли.

Из природных процессов данные эксперименты наиболее приближены к импактным. Специфическими чертами природных [3, 4, 9, 10, 12, 13, 21, 22] и техногенных [14, 15, 20] импактитов являются: 1) механическое разрушение пород и формирование импактных брекчий, нередко сцементированных импактными стеклами; 2) образование в минералах специфических планарных элементов — трещиноватости и зон деформации; 3) появление диаплектовых стекол; 4) формирование ударных расплавов — как правило, гомогенизированных стекол со следами течения; 5) высокобарических фаз; 6) появление псевдоморфоз ассоциаций высокобарических минералов и стекла по минералам, составляющим исходную породу. Все эти особенности в той или иной мере проявляются в поставленных опытах.

Целью данной работы является определение местоположения по радиусу обжатых образцов

зон ударного метаморфизма для реализованных режимов взрывного нагружения шаров из указанных материалов.

Методика эксперимента

В ходе подготовки эксперимента образцы из горных пород диаметром d с начальной плотностью ρ_{00} (табл. 1) заваривались в вакууме 10^{-6} мм рт. ст. в металлические гермочехлы. Нагружение загерметизированных шаров осуществлялось сферически сходящимися ударными волнами, формировавшимися при детонации слоев взрывчатого вещества (ВВ) различной мощности и толщины. Иницирование ВВ осуществлялось на $R_{ВВ} = 40$ мм в точках, равномерно распределенных по наружной поверхности.

Таблица 1

Условия постановки взрывных экспериментов

№ п/п	Изучаемый материал	Начальный диаметр шара d , мм	Начальная плотность, ρ_{00} , г/см ³	Материал гермочехлов	Режим ¹⁾ взрывного нагружения	Тип ²⁾ сдерживающего разлет ПВ корпуса
1	Серпентинит (Урал, Шаброво)	48.38	2.71	12X18H10T	1	1
2	– “ –	48.51	2.71	– “ –	2	2
3	Колчеданная руда (Урал, м-е Молодежное)	47.76	4.36	12X18H10T	1	1
4	Письменный гранит (Урал, Ильменский заповедник)	47.74	2.570	12X18H10T	2	2
5	– “ –	49.21	2.590	– “ –	3	1
6	Графитистый кварцит (Урал, Максютковский комплекс)	49.10	2.506	12X18H10T	2	1

Примечание: ¹⁾ Нумерация режимов нагружения — в порядке возрастания интенсивностей воздействия на изучаемую горную породу: 1 — взрывчатый состав (ВС) на основе ТЭНа, 2 — ВС на основе гексогена, 3 — ВС на основе октогена. ²⁾ Тип корпуса, сдерживающего разлет продуктов взрыва: 1 — однослойный, 2 — составной.

Согласно расчетным оценкам, давление на поверхности шара в разных опытах достигало 20—30 ГПа. Давления, температуры и плотности энергии, достигавшиеся во фронте сходящейся ударной волны на глубоких радиусах были достаточными для полного плавления, а в ряде случаев, диссоциации вещества [5, 6].

Изучение обжатых и сохранных геологических материалов проведено с использованием оптической поляризационной и растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, а также ИК-спектроскопии. Использовались следующие приборы и оборудование:

- оптические поляризационные микроскопы (ПОЛАМ Р-113, увеличение до 600 при съемке на просвет; REINHARD, увеличение до 1024 при съемке на отражение в иммерсионных препаратах);
- растровый электронный микроскоп РЭММА-2М;
- рентгеновский дифрактометр ДРОН-2.0;
- ИК-спектрометр UR-2.0

Разрезка обжатых шаров производилась алмазной пилой по меридиональной плоскости и далее на образцы для проведения исследований.

Основные результаты

1. Серпентинит

Два образца серпентинита, нагруженного с различной интенсивностью в РФЯЦ-ВНИИТФ (табл. 1) изучались в ИМин УрО РАН (образец 1), ИЗК СО РАН (образцы 1 и 2) и ГЕОХИ РАН (образец 2). Результаты этих сравнительных исследований материала обжатых шаров подробно описаны в [5]. Основными продуктами ударного метаморфизма и сопряженного термического

воздействия при реализованных условиях нагружения указанного образца явилось преобразование исходного карбонатизированного серпентинита в форстерит, энстатит, периклаз, кварц и стекло основного–ультраосновного состава в зоне радиусом от 3 до 4 мм при $0.075 \leq r / R_{\text{ВВ}} \leq 0.10$. Центральная зона представляла собой полость диаметром 6 мм. В везикулах стекла отмечены кристаллы энстатита, состав которого приближен к стехиометрическому. Примесями и летучими компонентами обогащено стекло. Вокруг стекла на более высоких радиусах располагается зона макроскопически осветленного серпентинита [5]. В данном случае преобладали процессы ударно-термического разложения серпентинита и карбоната с последующей кристаллизацией из расплава и газовой фазы оливина, пироксена, периклаза, а также преобразования серпентинита, связанные с перераспределением летучих компонентов.

2. Колчеданная руда

Колчеданная руда состава халькопирит+пирит+кварц с незначительными примесями барита и блеклой руды была изучена в Институте минералогии и Институте геологии и геохимии УрО РАН [2]. Порода была подвергнута относительно низкоинтенсивному режиму взрывного нагружения (табл. 1). Давление на поверхности образца оценивается как 20 ГПа. В результате проведенного взрывного эксперимента центральная зона образца диаметром около 5 мм оказалась заполненной мелкопористым сульфидным материалом, состоящим из почковидных выделений сульфидов, интерстиции между которыми частично заполнены кварцевым стеклом. Размеры сульфидных «капель» 5–70 мкм, причем они крупнее в центре и мельче — на периферии зоны преобразований. Сульфидная масса состоит, в основном, из пирита и халькопирита в различных количественных соотношениях, изредка наблюдаются борнит и пирротин. Почки сульфидов имеют заливчатые очертания, размер мономинеральных выделений — менее 5 мкм. В основном почки зональны, в одних центральная часть сложена пиритом, а края халькопиритом, в других — наоборот. В некоторых из них существенная роль принадлежит пирротину (рис. 1).

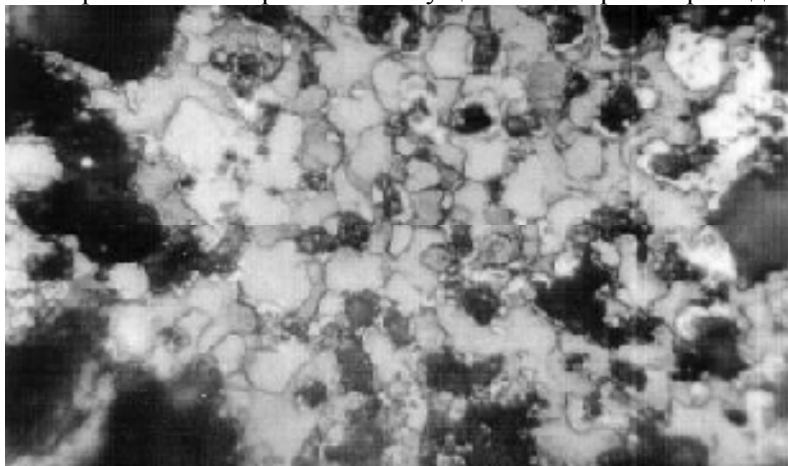


Рис 1. Колчеданная руда. Выделения пирротина, халькопирита, борнита и пирита в центральной зоне. Увеличение $\times 1200$, иммерсия

Он обнаружен в ассоциации с борнитом, пиритом и халькопиритом, а также — с пиритом и халькопиритом. Центральная камера окаймлена зоной менее 1 мм, в которой пирит и халькопирит издроблены и частично расплавлены на границах зерен (рис. 2).



Рис 2. Колчеданная руда. Граница между зоной плавления и зоной дробления. Заметны «тени» от крупных зерен пирита и нерасплавившиеся зерна кварца. Увеличение $\times 150$

Здесь же иногда наблюдается затекание пиритового расплава в трещины в кварце, что в целом вполне соответствует известным температурам плавления [1] и

может быть расценено также как свидетельство течения сульфидного расплава вслед за фронтом отраженной расходящейся ударной волны. На расстоянии 12 мм от центра (при $r/R_{\text{ВВ}} = 0.30$) образовалась концентрично расположенная над центральной камерой трещина переменной по полярному углу мощности. Более высоко расположенные по радиусу слои вещества при $0.30 < r/R_{\text{ВВ}} \leq 0.60$, за исключением повышения трещиноватости, не претерпели существенных изменений.

Обжатый и сохраненный образец колчеданной руды содержит яркие свидетельства высокотемпературных воздействий, связанных с ударно-волновой обработкой. Образовавшиеся в результате импульсного нагружения шара минералы отличаются от исходных. Появление пирротина указывает на высокотемпературные условия кристаллизации расплава [1].

3. Письменный гранит

Третьим объектом для взрывных экспериментов послужил письменный гранит. Два образца были подвергнуты импульсным воздействиям различной интенсивности (табл. 1). Каждый из обжатых шаров был разрезан по меридиональной плоскости. Одна из половинок исследовалась в ИМин УрО РАН, другая — в МГУ [16]. Анализ образцов-свидетелей, не претерпевших ударно-волнового нагружения, показал, что исходная порода — типичный графический пегматит состава: кварц ?35 %, микроклин ?60%, альбит ?5—10 % (1) до 15 % (2). Микроклин образует относительно крупные выделения розового цвета, в шлифе видно их отчетливое двойникование. Кварц — молочно-белый, сероватый, в шлифе имеет волнистое угасание. Альбит — белый непрозрачный, мелкозернистый. Альбитизация проявлена в линейных зонах, вблизи кварцевых ихтиоглиптов и в массе микроклина. Акцессорные минералы представлены единичными изометричными зернами граната размером 0.1—0.05 мм и редкими лейстами биотита длиной до 10 мм (1) и выделениями мусковита (2).

При нагружении первого образца использовался взрывчатый состав на основе гексогена, второго — более мощный на основе октогена (табл. 1).

В процессе нагружения образцы приобрели радиально-симметричную зональность. Глубоко расположенные по радиусу слои превратились в гомогенные бесцветные стекла. Эти слои окружает кайма ярко-розового неоднородного стекла. Высоко расположенные по радиусу слои представлены микротрещиноватым письменным гранитом неизменной структуры. При внимательном рассмотрении можно выделить возникновение ряда дополнительных по радиусу зон превращений.

В образце № 1 выявлены следующие зоны (от края к центру, в скобках — положение по радиусу, мм):

1 (24—13): слабо измененный при $0.30 < r/R_{\text{ВВ}} \leq 0.60$ письменный гранит, несколько осветленный по сравнению с исходным материалом за счет микротрещиноватости. Положение кварцевых ихтиоглиптов не нарушено. В шлифе — структура и минеральный состав сохранены, в кварце очень редко наблюдается волнистое угасание.

2 (13—10): зона ненарушенной ориентировки кварцевых ихтиоглиптов при $0.25 < r/R_{\text{ВВ}} \leq 0.30$. Окраска полевого шпата несколько усилена, альбитовые зерна выделяются отчетливо. Граница с предыдущей зоной — нерезкая, протяженность по радиусу $\Delta r \leq 0.2$ мм. Микроскопически — кварц разбит на блоки.

3 (10—8): зона серого цвета, соответствующая началу резкого возрастания давлений и температур на фронте сферически сходящейся ударной волны при $r/R_{\text{ВВ}} = 0.20 \dots 0.25$. Кварцевые ихтиоглипты белого цвета частично сохранены, прослеживаются от зоны слабых изменений при $0.25 < r/R_{\text{ВВ}} \leq 0.60$. Протяженность зоны по радиусу составляет 0.5—3 мм при относительно резкой границе на $r/R_{\text{ВВ}} = 0.20$ с предыдущей зоной. Микроскопически в этой зоне — структура и минеральный состав исходного материала сохранены, наблюдается изотропизация некоторых зерен калиевого полевого шпата по направлению от границы зерна. В редких зернах кварца появляется грубая планарная отдельность.

4 (8—4.5): розовое прозрачное стекло при $0.11 \leq r/R_{\text{ВВ}} \leq 0.20$, в верхней части образца при $r/R_{\text{ВВ}} \leq 0.20$ сохранены реликты ихтиоглиптов кварца. Размер зерен достигает 1 мм. Микроскопически это изотропное стекло с мелкими (десятые—сотые доли мм) реликтами полевого шпата, чаще — альбита. Диагностика некоторых двупреломляющих участков затруднительна: это

округлые выделения с показателем преломления большим, чем стекла, полисинтетически сдвойникованные. Толщина отдельных двойниковых индивидов относится к их длине как 1:15—20, они незначительно искривлены (рис. 3). Вещество определено как альбит, отмечается тонкое расщепление полисинтетических двойников. Обнаружено два зерна бурого слабопросвечивающего граната с участками аномального двупреломления. Зона идентифицируется как диаплектовая.

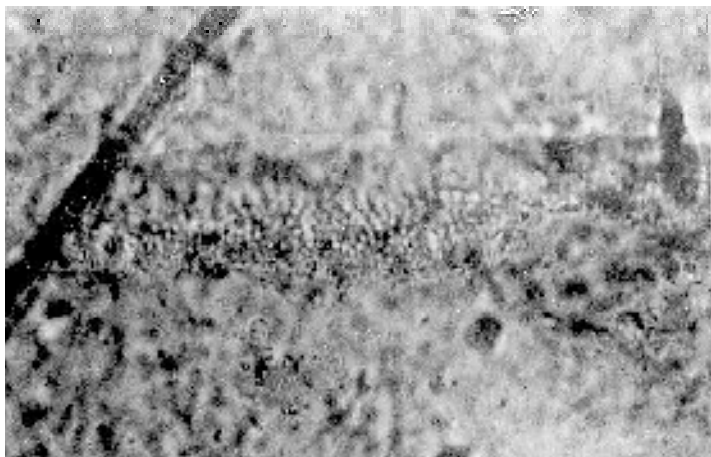


Рис 3. Письменный гранит. Расплавные включения в стекле из центральной зоны образца 1, распределенные на криволинейной поверхности, косо расположенной по отношению к плоскости шлифа. Николи параллельны.
Увеличение $\times 600$

при $n/R_{\text{вв}} \leq 0.11$ стекло изотропное с варьирующим показателем преломления, свидетельствующим о неоднородности его состава. Границы между «гранулами» стекла трассируются мельчайшими включениями размером менее микрона—первые микроны с показателем преломления, незначительно меньшим, чем стекла. Форма включений — округлая, каплевидная, сферическая. Они располагаются по криволинейным поверхностям и практически отсутствуют внутри зерен стекла (рис. 4).



Рис 4. Письменный гранит. Полисинтетические расщепленные двойники в реликте зерна альбита. Зона диаплектовых изменений, образец 1.
Николи скрещены. Увеличение $\times 250$

Вероятно, включения расплавные. Зона представляет собой расплавное неполовностью гомогенизированное стекло.

В образце № 2, прошедшем взрывное нагружение большей интенсивности, выделяются следующие зоны:

1 (24—14): слабые изменения, структура исходного материала сохранена,

кварц и микроклин осветлены в результате микротрещиноватости. Микроскопически — у кварца отсутствует волнистое угасание, все минералы трещиноваты.

2 (14—10): область розового цвета, вещество плотное на спиле, но легко раскрашивающееся, кварцевые ихтиоглипты прослеживаются не вполне отчетливо. Границы с соседними зонами нечеткие. В шлифе структура и состав исходной породы сохранены, в кварце появляются участки с грубой планарной отдельностью по $\{0001\}$.

3 (10—8.75): зона серого цвета, соответствующая началу резкого нарастания давлений и температур на фронте сферически сходящейся ударной волны при $n/R_{\text{вв}} \leq 0.25$. Материал — плотный, но легко раскрашивается на мелкие угловатые кусочки, негомогенный, участками можно проследить кварцевые ихтиоглипты. В иммерсии осколки имеют показатели преломления, соответствующие кварцу, микроклину и альбиту. Мощность зоны не превышает 1 мм. В шлифе наблюдается повышенная трещиноватость. В кварце широко проявляется планарная трещиноватость по различным кристаллографическим направлениям, в полевых шпатах проявлена

сетчатая, пятнистая изотропизация.

4 (8.75—6.75): прозрачное розовое стекло, неомогенное — отдельные «гранулы» розоватые, некоторые — белые, их размеры не превышают 0.3 мм. В иммерсионном препарате зерна имеют неодинаковые показатели преломления, меньшие, чем у исходных минералов, двупреломляющие участки редки. Встречаются включения магнетита. Мощность зоны около 2 мм, границы с соседними — нечеткие. В шлифе наблюдаются реликтовые двупреломляющие участки кварца с планарными деформациями. Зона представлена диаплектовым стеклом.

5 (6.75—2.25): прозрачное бесцветное «гранулированное» стекло, обломки угловатые. Размеры «гранул» достигают 0.3 мм. Отмечены включения магнетита. Расплавное частично гомогенизированное стекло.

6 (2.25—0): гомогенное прозрачное бесцветное стекло центральной части. Разбито трещинами на несколько фрагментов, имеются мелкие (до 0.03 мм) включения магнетита амебовидной формы. Граница с предыдущей зоной неотчетливая. Микроскопически стекло изотропно, практически не содержит включений. Расплавное гомогенизированное стекло.

Химический состав стекла по зонам образца 2 был определен микрозондированием (табл. 2).

Оказалось, что стекло из центральной зоны при $0 \leq r \leq 2.25$ образца 2, по сравнению с последующими, обогащено кремнеземом и обеднено глиноземом и щелочами (табл. 2). Содержание K_2O и Na_2O в центральной области почти в два раза меньше, чем в зоне, более высоко расположенной по радиусу. Учитывая, что по объему центральная зона при $0 \leq r \leq 2.25$ составляет немногим более 1 % от расположенной над ней при $2.25 \leq r \leq 6.75$, вынесенные из центра алюминий и щелочные металлы не могли оказать существенное влияние на состав этой зоны.

Таблица 2

Химический состав стекла и отдельных минералов по зонам

	ПГ-1	ПГ-1б	ПГ-1а	ПГ-2	ПГ-2а	ПГ-2'а
Na_2O	2.98	3.01	2.17	4.64	4.06	3.83
Al_2O_3	12.54	12.70	18.01	17.70	17.97	17.92
SiO_2	76.69	75.80	64.79	64.71	65.49	64.13
K_2O	6.71	7.44	13.93	12.11	11.43	13.20
CaO	0.25	0.21	0.28	0.23	0.29	0.14
FeO	0.12	0.07	0.08	0.01	0.06	0.09

Продолжение таблицы 2

	ПГ-3	ПГ-3б	ПГ-4	ПГ-5	ПГ-6	ППГ-Ми
Na_2O	3.71	6.43	2.48	3.47	2.34	3.39
Al_2O_3	17.87	18.80	17.83	18.08	17.87	18.07
SiO_2	64.68	67.13	63.46	63.84	64.56	64.30
K_2O	12.90	6.82	15.24	13.61	14.40	13.05
CaO	0.13	0.15	0.25	0.26	0.16	0.34
FeO	0.04	0.01	0.04	0.10	0.02	0.20

Примечания: ПГ-1 — гомогенное прозрачное бесцветное стекло из центральной части; ПГ-1а — то же, на границе с зоной 2; ПГ-1б — то же, из центра с включением магнетита; ПГ-2 — гомогенное прозрачное стекло из зоны 2, обломки угловатые; ПГ-2а — зерно из этой же зоны, на границе с зоной 1; ПГ-2'а — то же, на границе с зоной 3; ПГ-3 — розовое прозрачное гранулированное стекло, зона 3; ПГ-3б — то же, с включением магнетита; ПГ-4 — фрагмент растресканного, частично гомогенизированного полевого шпата из зоны пропарки; ПГ-5, ПГ-6 — микроклин из краевой зоны; ППГ-Ми — диаплектовое стекло по микроклину (образец № 1). Анализ выполнен В. А. Котляровым, РЭММА-2М, ИМин УрО РАН.

При пересчете весовых процентов на атомные количества оказалось, что в центре сумма щелочей ($Na+K$) несколько меньше количества алюминия, а соотношение между кремнием и алюминием превышает 3, в то время как в зоне при $6.25 \leq r \leq 8.75$ сумма щелочей превышает количество алюминия, а отношение Si/Al менее 3.

Была предпринята попытка изучить минералы и стекла из различных зон методом рентгеновской дифрактометрии. Оказалось, что порода из периферических зон при $0.25 \leq r/R_{\text{вв}} \leq 0.60$ практически

неотличима этим методом от исходной. Зерна частично диаплектизированного микроклина дают дифрактограмму, аналогичную микроклину из неизменных зон, но меньшей интенсивности. При переходе к стеклам плавления ($\tau/R_{\text{ВВ}} \leq 0.20$) появляется гало, а на наличие «реликтов» структур исходных минералов указывают сохраняющиеся наиболее интенсивные рефлексы кварца ($d/n = 3.34$ □) и полевого шпата ($d/n = 3.18\text{—}3.20, 4.02$ □). Эти данные хорошо согласуются с полученными в [16] и на природных кварцевых и полевошпатовых стеклах [12, 13].

Стекла из различных зон (зоны 1, 2 и 3) были изучены методом ИК-спектроскопии В. Н. Быковым в Институте минералогии (рис. 5). В инфракрасных спектрах стекол доминирует полоса с максимумом в области $1070\text{—}1100$ см^{-1} , обусловленная антисимметричными валентными колебаниями мостиков Si-O-Si(Al).

Максимум этой полосы смещается в область более низких частот при переходе от стекла зоны 6 (1100 см^{-1}) к стеклу зоны 5 и достигает значения 1070 см^{-1} в стекле зоны 4. Это может быть связано либо с деполимеризацией алюмосиликатной сетки стекла либо с увеличением отношения Al/Si в алюмосиликатной сетке стекла. Однако, отсутствие полосы в области 950 см^{-1} , связанной с валентными колебаниями немостиковых связей Si-O⁻ свидетельствует о сохранении высокой степени полимеризации в стеклах всех зон. В ИК спектрах всех стекол наблюдается также полоса с максимумом в области 800 см^{-1} , связанная с колебаниями тетраэдров AlO_4 , которые накладываются на симметричные валентные колебания связей Si-O-Si(Al) и полоса в области $460\text{—}475$ см^{-1} , отнесенная к деформационным колебаниям

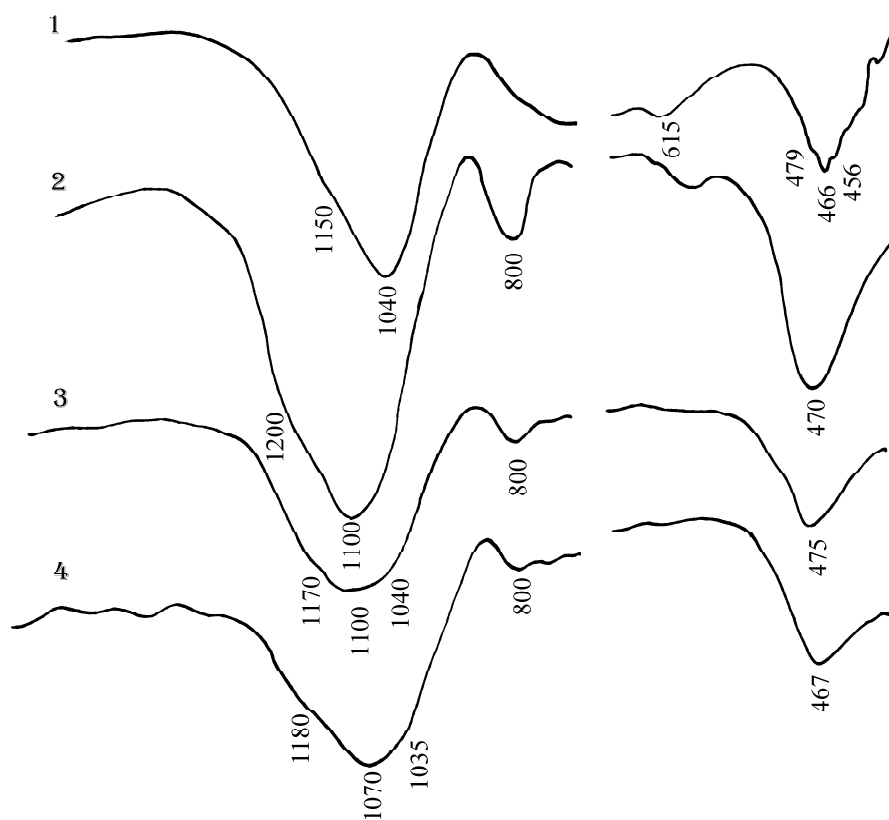


Рис 5. Инфракрасные спектры стекол из разных зон.

1 — диаплектовое стекло по микроклину, образец 1; 2 — стекло из зоны 6, образец 2; 3 — стекло из зоны 5, образец 2; 4 — стекло из зоны 4, образец 2.

сложных алюмосиликатных анионов [8, 19, 23]. Кроме этих полос, всегда присутствующих в ИК-спектрах алюмосиликатных стекол, в изученных наблюдается полоса в области 585 см^{-1} (явно выраженная в стекле из зоны 6 и более слабая в стекле из зоны 5). Известно [8, 19], что полоса в

этой области связана с колебаниями алюминия в октаэдрической координации. Существование октаэдрического алюминия в центральной зоне, в которой стекло было подвергнуто максимальным давлениям подтверждает предположение [18] о возможности перехода алюминия в магматических расплавах из тетраэдрической в октаэдрическую координацию при повышенных давлениях. В связи с этим высокая частота антисимметричных колебаний мостиков (1100 см^{-1}) в стекле центральной зоны может быть объяснена тем, что переход алюминия из тетраэдрической в октаэдрическую координацию приводит к превращению алюмосиликатной сетки стекла в преимущественно силикатную.

Таким образом, письменный гранит при воздействии сферически сходящихся ударных волн различной интенсивности претерпевает сходные изменения, от величины амплитуды и длительности импульса нагрузки зависит лишь расположение по радиусу характерных зон ударного метаморфизма. Последствия импактных воздействий, зафиксированные в сохраненных образцах, можно условно разделить на собственно ударные и ударно-термические. К первым относится растрескивание зерен кварца и полевого шпата на блоки по спайности и поверхностям напряжения в зонах 1 и 2, возникновение систем планарных трещин и тонких планарных деформаций (3) в кварце и полевошпатовом шпате, по которым можно оценить давление в этой зоне на фронте ударной волны менее 32 ГПа [22]; диаплектовое преобразование кварца и полевого шпата (5), соответственно давление в этой зоне оценивается изменяющимся в диапазоне 30—50 ГПа [22]; полное расплавление отдельных минералов и гомогенизация расплава — образование расплавленного силикатного стекла и его деполимеризация (6), вероятно, имеют место при $P > 50$ ГПа. Перераспределение катионов Na, K, Ca во фронте сферически сходящейся ударной волны между зернами калиевых и натриевых полевых шпатов в области твердофазных (диаплектовых) преобразований в условиях проводимого эксперимента проанализировано в работе [16].

Необходимо отметить перераспределение ионов-хромофоров в микроклине. В зоне диаплектового стекла микроклин имеет отчетливую ярко-розовую окраску, обусловленную парамагнитными ионами железа [11]. В центральных зонах стекло бесцветное, но появляются зерна и вкрапления магнетита. Валовое содержание FeO в бесцветном стекле не отличается от такового в розовом апо-микроклиновом диаплектовом стекле. Структура последнего согласно ИК-спектрам, сохраняет черты каркасного алюмосиликата. Следовательно, именно в зоне диаплектовых изменений осуществились условия, необходимые для перераспределения ионов Fe в тетраэдрические позиции в пространстве каркаса.

4. Графитистый кварцит

В качестве четвертого образца использовался графитистый кварцит (табл. 1). Исходная порода имеет средне-мелкозернистую неравномерную структуру с директивной текстурой, обусловленной расположением графитовых чешуй и псевдоморфоз серицито-альбитового состава по призматическим зернам раннего амфибола. Близкие к мономинеральным кварцевые участки гипидиоморфнозернистые, обогащенные графитом — лепидогранобластовые, с редкими сноповидными выделениями удлиненно-призматического глаукофана. Помимо породообразующих кварца, графита, глаукофана, олигоклаза, серицита, отмечены выделения хлорита. Кварц образует близкие к изометричным зерна различного размера от 0.5 мм до $n \cdot 10^{-2}$ мм. Олигоклаз встречается в виде единичных зерен до 0.5 мм, изредка полисинтетически сдвойникован, в виде субмикроскопических выделений он входит совместно с серицитом в состав псевдоморфоз. Графит образует чешуйки, расположенные в виде струй или цепочек между зернами кварца, и оторочки вокруг псевдоморфоз и внутри них, а также в виде пыли пронизывает некоторые кварцевые зерна. Хлорит бурый, плеохроирует от зеленоватого по Np до желтоватого по Ng, удлинение прямое, погасание косое, в отдельных пачках до 10° , вблизи обособлений наблюдается ожелезнение. Глаукофан образует удлиненные, игольчатые кристаллы в сноповидных сростках, он слабо плеохроирует от голубоватого по Ng до желтоватого по Np, удлинение положительное, cNg доходит до $18\text{—}20^\circ$.

После ударно-волнового воздействия образовались следующие зоны (от края к центру, в скобках положение зон по радиусу):

1 (24—11): в исходном кварците появляются грубые механические трещины.

2 (11—8): развитие планарных элементов в кварце, до радиуса 9 мм (при $0.225 \leq r/R_{\text{ВВ}} \leq 0.60$) планарные трещины по $\{0001\}$ встречаются только в некоторых зернах кварца, их количество в

среднем 100 на мм. Согласно [22] это наиболее ранние элементы, образование которых характеризует давления 7.5 ГПа. Глаукофан в этой зоне приобретает грубую отдельность по {001}. Другие минералы не изменены. От радиуса 9 мм повышается количество планарных трещин в кварце, появляются косогазнушие, изредка — системы косоориентированных друг к другу трещин, образующих структуру паркета. По планарным элементам давление примерно можно оценить от 10 до 14 ГПа.

3 (8—7): широкое развитие тонких разноориентированных планарных деформаций и микротрещин в кварце, появление участков аморфизации, которые располагаются, в основном, в центральных частях зерен, реже — в краевых, их очертания, в какой-то степени, соответствуют кристаллографической ориентировке планарных элементов. Глаукофан здесь приобретает бурю окраску, снижается его прозрачность. В нескольких зернах кварца отмечаются округло-удлиненные выделения высокопреломляющего (примерно 1.600) минерала с низким двупреломлением. Предположительно это — коэсит. Минерал с аналогичными оптическими свойствами обнаруживается в виде заполнения трещин между округлыми выделениями диаплектового кварца вблизи псевдоморфозы по раннему амфиболу. Давления в этой области при $0.175 \leq r/R_{\text{ВВ}} \leq 0.20$ можно оценить как 14—32 ГПа.

4 (7—5.8): реликты кристаллического кварца при $0.145 \leq r/R_{\text{ВВ}} \leq 0.175$ исчезают, но структура породы в целом не изменяется. Зона идентифицируется как диаплектовая. Начало плавления (на изэнтропе, то есть в процессе снижения давления при разгрузке) определяется по исчезновению планарных элементов в кварце и правильным сферическим агрегатам хлорита, который, судя по всему, разлагается полностью и кристаллизуется вновь в виде зональных сферолитов, в которых периферия — бесцветный хлорит, центр — бурый, мутный. Сферолиты по размеру, но не по форме, соответствуют исходным выделениям хлорита и располагаются на одном радиусе. Графит в этой зоне имеет форму, соответствующую исходной.

5 (5.8—1.4): полностью изотропное расплавленное стекло при $0.035 \leq r/R_{\text{ВВ}} \leq 0.145$, от исходной структуры остается расположение и форма зерен графита (рис. 6). Изредка встречаются anomalно двупреломляющие участки с обилием довольно крупных газовой-жидких включений — в проходящем свете не заметно никаких границ между ними и окружающим стеклом.

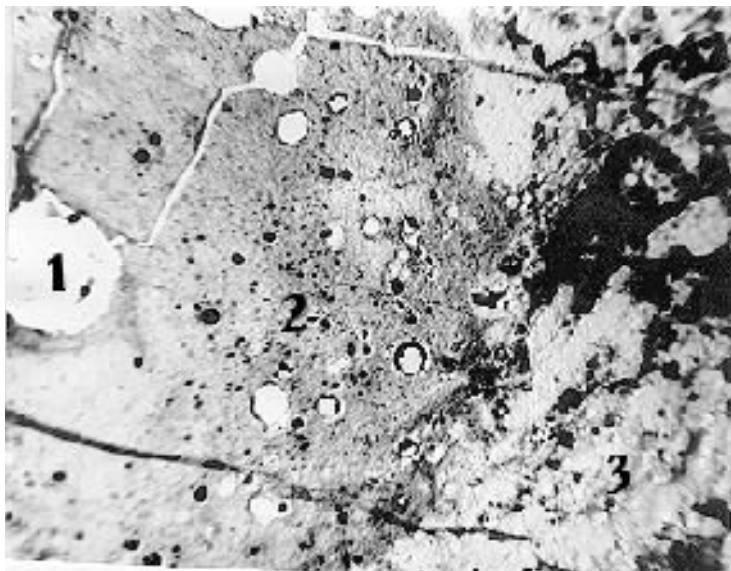


Рис 6. Центральная часть образца графитистого кварцита.

Сферическая полость (1), гомогенное расплавленное силикатное стекло со сферическими выделениями графита и полостями (2), расплавленное кварцевое стекло с реликтами первичной структуры (3). Николи параллельны. Увеличение $\times 60$

Здесь же появляются мелкие расплавленные включения сферической формы. Иногда на их стенках обнаруживается перераспределенный графит.

6 (1.4—0.3): практически гомогенное кварцевое стекло с обильной пылевидной вкрапленностью графита в виде микросфер, а также более крупных сферических везикул с кристаллами более высокопреломляющей, чем стекло, фазы на стенках, декорированных графитом. Иногда кольцевые графитовые структуры полностью заключены в кварцевом стекле. Вокруг выделений графита стекло осветляется примерно на 0.0025 мм при диаметре графитовых обособления около 0.01 мм. Стекло не везде имеет одинаковый цвет, остаются «тени» от исходно неоднородной по составу породы.

7 (0.3—0): центральная полость имеет сферическую форму, на ее стенках отмечено осаждение кристаллического материала, по всей видимости — кварца, выделившегося из газовой фазы, толщина этого слоя не превышает первых мкм, слой заметен только при максимальных увеличениях.

Выводы

1. Определено положение по радиусу характерных зон физико-химических превращений, возникших в шарах из исследованных горных пород при их нагружении сферически сходящимися ударными волнами различной интенсивности.

2. В разных областях по радиусу обжатых и сохранных образцов выявлены следующие изменения пород:

- механическое высокоскоростное деформирование и сдвиговое разрушение;
- аморфизация слагающих горную породу минералов в твердом состоянии (область диаплектовых преобразований во фронте сферически сходящейся волны);
- плавление вещества на изэнтропе, то есть в процессе снижения давления при разгрузке;
- плавление непосредственно во фронте сферически сходящейся ударной волны, сопровождающейся гомогенизацией и перераспределением вещества;
- испарение ударно-сжатого расплава при его разгрузке в центральную полость, формируемую за фронтом отраженной от центра шара сферически расходящейся ударной волны, с последующей кристаллизацией минералов из газовой фазы.

3. При изучении образцов одинаковых пород, претерпевших взрывное нагружение различной интенсивности, выявляется похожая зональность, однако, наблюдается закономерное изменение расположения по радиусу границ зон выявленных физико-химических превращений.

4. В зависимости от состава исходной породы и реализованного режима взрывного нагружения в сохранным образце преобладают свидетельства собственно ударного воздействия или последующей разгрузки и остывания образца. Так, все изученные силикатные породы с незначительным содержанием летучих компонентов (письменный гранит и кварцит) сохранили ярко выраженные черты ударного метаморфизма. Проявления ударно-волновых воздействий на серпентинит, содержащий большое количество воды и углекислоты, могли быть частично завуалированы вторичными термическими процессами, протекавшими при остывании (в течение примерно получаса) обжатых образцов после разгрузки. Вторичные термические эффекты могли проявиться и в эксперименте с относительно легкоплавкой колчеданной рудой, в связи с чем интенсивность взрывной нагрузки в этом эксперименте была сознательно снижена.

5. Более детальную диагностику составляющих исследованные горные породы минералов, их диаплектовых и расплавных стекол из выявленных в данной работе радиально расположенных зон физико-химических превращений, планируется осуществить в последующих исследованиях, в том числе с использованием дополнительных методик.

Литература

1. Бартон П. Б., Скиннер Б. Дж. Устойчивость сульфидных минералов // Геохимия гидротермальных рудных месторождений. М.: Мир, 1982. С. 238—327.

2. Белогуб Е. В., Буслав Ф. П., Козлов Е. А., Жугин Ю. Н., Литвинов Б. В. Превращения сульфидных руд под действием сферически сходящейся ударной волны // Металлогения древних и современных океанов. Миасс: ИМин УрО РАН, 1997. С. 91—98.

3. Вальтер А. А., Еременко Г. К., Квасница В. Н., Полканов Ю. А. Ударно-метаморфогенные минералы углерода. Киев: Наукова думка, 1992. 171 с.

4. Вишневикий С. А., Афанасьев В. П., Аргунов К. П., Пальчик Н. А. Импактные алмазы: их особенности, происхождение и значение // Тр. ОИ ИГГГиМ СО РАН. Новосибирск, 1997. Вып. 835. 110 с.

5. Козлов Е. А., Жугин Ю. Н., Литвинов Б. В., Козловский В. Н., Абакишин Е. В., Бадюков Д. Л., Иванова Л. А., Летников Ф. А., Анфилогов В. Н., Белогуб Е. В., Котляров В. А. Физико-химические превращения серпентинита в сферических волнах напряжений // Химическая физика. Т. 14. № 2—3. 1995. Стр. 68—96.

6. Козлов Е. А., Жугин Ю. Н., Литвинов Б. В., Козловский В. Н., Коваленко Г. В. Физико-химические превращения серпентинита в сферических волнах напряжений. // Химическая физика. 1995. Т. 14. № 1. С. 108—118.

7. Козлов Е. А., Литвинов Б. В., Тимофеева Л. Ф. // ФММ. 1996. Т. 81. Вып. 6. С. 139—157.

8. Кусабираки К., Сираиси Ю. Эмиссионная ИК-спектроскопия расплавленных систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ // Нихон киндзоку гаккаиси, 1981. Т. 45. № 9. С. 888—895.

9. Масайтис В. Л. Алмазоносные импактиты, их распространение и петрогенезис // Региональная геология и металлогения. Л.: ВСЕГЕИ, 1993. № 1. С. 121—134.
10. Масайтис В. Л., Михайлов М. В., Селивановская Т. В. Попигайский метеорный кратер. М.: Наука, 1975. 124 с.
11. Платонов А. Н., Таращан А. Н., Таран М. Н. О центрах окраски в амазонитах // Минералогический журнал. 1984. Т. 6. № 4. С. 3—16.
12. Фельдман В. И. Петрология импактитов. М.: Изд-во МГУ, 1990. 299 с.
13. Feldman V. I. The condition of shock metamorphism // Geol. Soc. Am. Special paper 293. 1994. P. 121—131.
14. James O. B. Shock and Thermal metamorphism of basalt by nuclear explosion. Nevada test site // Science, 1969. V. 166. P. 1615—1620.
15. Kozlov E. A., Volkov K. V., Zhugin Yu. N., Kovalenko G. V., Bondarchuk G. G. Structural and phase transitions of graphite in spherical shock waves: set-up of explosive experiments and calculated parameters of loading impulse // Int. workshop «Fullerenes and Atomic clusters». Book of abstracts. St.-Peterburg. 1997. P. 42, 181—183.
16. Kozlov E. A., Zhugin Yu. N., Litvinov B. V., Feldman V. I., Sazonova L. V., Medvedev A. V. Loading impulse amplitude estimation according to feldspar chemical composition changes for impacted rock // XXIX Lunar and Planetary Science Conference? March 16—20. 1998. Houston, Texas, USA, Abst. 1091, <http://cass.jsc.nasa.gov/meetings/LPSC98/>.
17. Litvinov B. V., Kozlov A. E., Korepanov Yu. M., Abakshin E. V., Kabin I. G., Simonenko V. A., Petrovtsev A. V., Kuropatenko V. F., Kovalenko G. V., Sapozhnikova G. N. On new experimental possibilities in studying polymorphic and phase transitions, solid-state chemical reactions in minerals and rocks // Metals and minerals research in spherical shock-wave recovery experiments. Snezhinsk: ONTI RFNC-VNIITF, 1996. P. 28—30.
18. Mysen B. O., Virgo D., Kushiro I. The structural role of aluminum in silicate melts — a Raman spectroscopic study at 1 atmosphere // Amer. Mineral. 1981, v. 66, p. 678—701.
19. Poe B. T., McMillan P. F., Angell C. A., Sato R. K. Al and Si coordination in SiO₂-Al₂O₃ glasses and liquids: A study by NMR and IR spectroscopy and MD simulations // Chemical Geology. 1992, V. 96, p. 333—349.
20. Shikin A. M., Prudnikov G. V., Adamchuk V. K. Electron spectroscopy for diagnostics of C₆₀ phase state and other carbon modifications // Int. workshop «Fullerenes and Atomic clusters». Book of abstracts. St.-Peterburg. 1997. P. 34.
21. Shock metamorphism of Natural materials / eds French B., Short N. Baltimore: Mono Book Corp., 1968. 641 p.
22. Stöffler D., Langenhorst F. Shock metamorphism of quartz in nature and experiment: I. Basic observation and theory // Meteoritics. 1994. V. 29. P. 155—181.
23. Taylor W. R. Application of infrared spectroscopy to studies of silicate glass structure: Examples from the melilite glasses and the systems Na₂O-SiO₂ and Na₂O-Al₂O₃-SiO₂ // Proceedings Indian Academy of Sciences, Earth and Planetary Sciences, 1990. V. 99. P. 99—117.