

УДК 539.4

## МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПОД ДЕЙСТВИЕМ УДАРНЫХ ВОЛН

© 2020 г. И. П. Щербаков<sup>1</sup>, В. И. Веттегрень<sup>1,2,\*</sup>, Р. И. Мамалимов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

\*E-mail: victor.vettegren@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 21.02.2019 г.

После доработки 20.04.2020 г.

Принята к публикации 23.04.2020 г.

С временным разрешением 2 нс изучены механизм и динамика разрушения образцов кварца, гранитов, габбро-диабазы и кальцита в поле ударных волн. Найдено, что под влиянием таких волн с поверхности минералов вылетают струи положительно заряженных ионов. Методами инфракрасной, рамановской и фотолуминесцентной спектроскопии исследовано строение поверхностного слоя вышеупомянутых пород после воздействия ударными волнами. Установлено, что в поверхностных слоях кварца и гранитов образуются диаплектические стекла, а кальцита — высокобарическая фаза — кальцит III.

*Ключевые слова:* ударные волны, механизм и динамика разрушения, кварц, граниты, кальцит.

**DOI:** 10.31857/S0002333720050099

### ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени сделаны многочисленные попытки изучить механизм разрушения и деформации горных пород под действием ударных волн [Адушкин, Спивак, 1993; Быкова и др., 1987; Канель и др., 2007; Фортов, 2007; Adushkin, Soloviev 1996; Galvez, 2011; Kanel et al., 2004; O’Keefe, Thiel, 1991]. Основная трудность, с которой столкнулись авторы этих работ, заключается в том, что скорость ударных волн больше скорости роста трещин [Морозов, Савенков, 2013; Регель и др., 1974; Петров и др., 1983], поэтому за время действия ударной волны трещины не успевают образоваться и вырасти. Ранее отсутствовала экспериментальная техника, позволяющая выяснить, каков же механизм разрушения во время действия ударной волны. О нем судили, в основном, по результатам исследования поверхностей разрушения после воздействия ударных волн.

Несколько лет назад нами были построены установки, позволяющие исследовать механизм разрушения с временным разрешением 2 нс. Это открыло возможность экспериментально изучить динамику разрушения горных пород непосредственно во время действия ударной волны. Большинство работ, в которых описаны результаты исследований разрушения в поле ударной волны, было опубликовано в журналах “Физика твердого тела” и “Журнал технической физики”, мало востребованных геофизиками. Поэтому ниже дан краткий обзор работ, выполненных нами в по-

следние годы, в которых изучен механизм и динамика разрушения кварца, гранитов, габбро-диабазы и мрамора.

Прежде чем перейти к их изложению, отметим, что исследования механизма разрушения других твердых тел (металлов, кристаллов, полимеров и композитов) с временным разрешением 2 нс до последнего времени не проводились. Поэтому вопрос о том, в какой мере изложенные ниже результаты могут быть справедливыми для других твердых тел, остается открытым.

Статья состоит из трех разделов. В первом исследован механизм разрушения, во втором — динамика этого процесса в поле ударной волны, а в третьем — изменение строения поверхностей горных пород под влиянием потоков ионов и электронов, выделяющихся под влиянием ударных волн.

### ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ

Образцы были изготовлены из кристаллов кварца, гранитов (аляскита и плагиогранита), габбро-диабазы и кальцита. Каждый из них представлял собой параллелепипед с размерами  $4 \times 2.7 \times 6$  см (рис. 1), в котором был прорезан паз глубиной 1.3 см и шириной  $\sim 2-3$  мм. В нем располагались медные электроды, расстояние между которыми 3 мм. Паз закрывался другим параллелепипедом, имеющим размеры  $4 \times 1.3 \times 6$  см. Образцы помещали внутрь медной камеры, которая являлась частью установки.

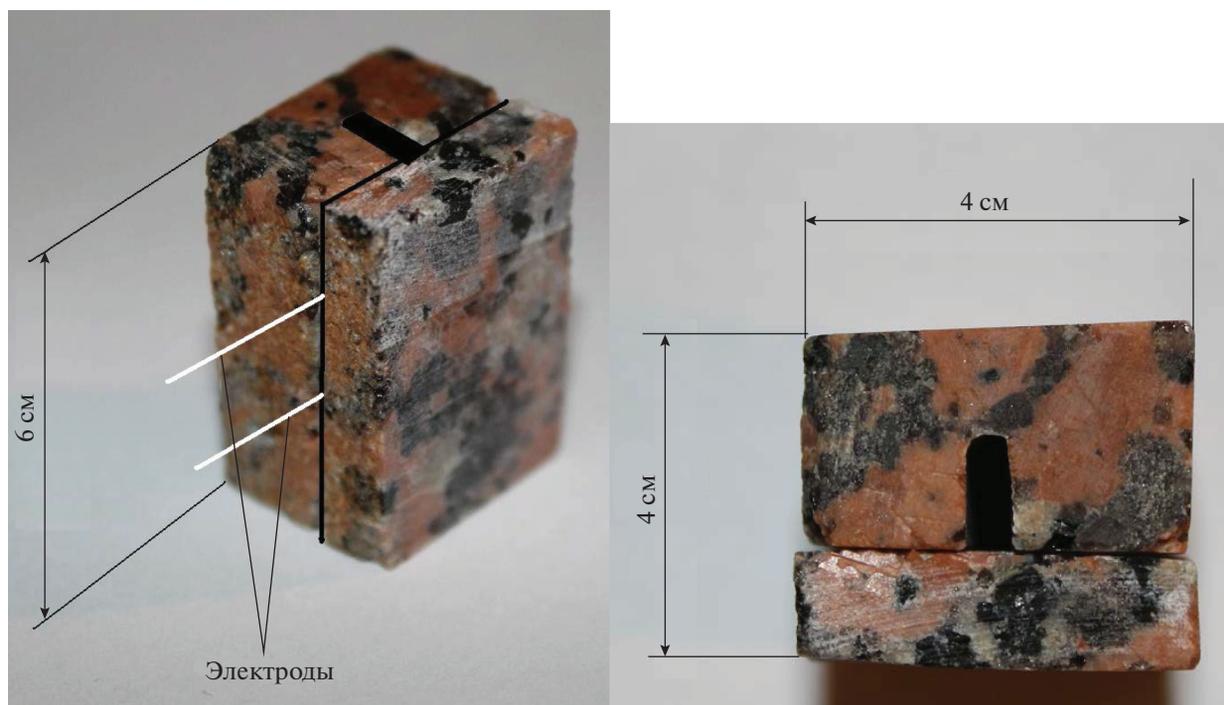


Рис. 1. Вид образца из аляскита.

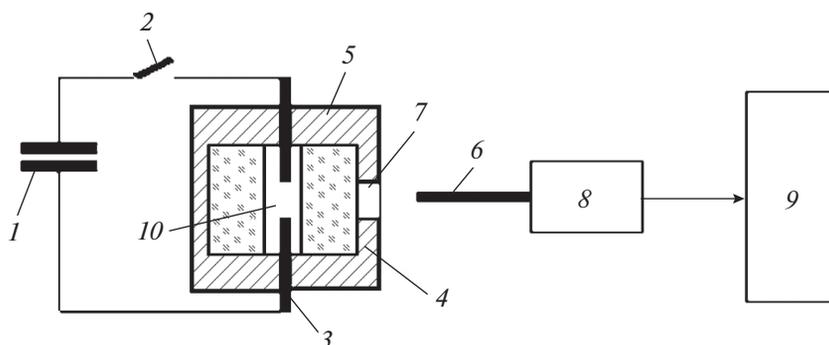


Рис. 2. Блок-схема установки для исследования спектров излучения образцов горных пород, возникающих при разрушении: 1 – конденсатор, 2 – электронная схема запуска, 3 – электроды, между которыми происходит электрический пробой, 4 – образец, 5 – медная камера, 6 – кварцевый световод, 7 – окно в камере для вывода светового излучения, 8 – спектрометр AvaSpec-ULS3648, 9 – компьютер.

### МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УДАРНЫХ ВОЛН

Блок-схема установки для исследования механизма разрушения показана на рис. 2. Конденсатор (1) емкостью 40 мкФ был заряжен до 2 кВ, что соответствует запасенной энергии 80 Дж. С помощью электронной схемы запуска (2) он разряжался через воздушный промежуток между электродами (3). Мощность разряда составляла 8 МВт.

При разряде в образце возникала ударная волна, которая, добежав до поверхности образца, вызвала вылет струи плазмы (рис. 3). Длина струи со-

ставляла несколько десятков см. Излучение плазмы попадало на вход кварцевого световода (6), расположенного на расстоянии  $\approx 1$  м от образца. Второй конец световода располагался перед входным окном спектрометра (8). Сигнал с выхода спектрометра подавался на вход компьютера (9).

Спектры плазмы, вылетевшей из исследуемых образцов, приведены на рис. 4. Они состоят из нескольких десятков наложенных друг на друга узких полос. Для интерпретации спектров использовали таблицы спектральных линий [Зайдель, 1952]. Оказалось, что наибольшее число полос соответствует излучению положительно заря-

женных ионов и атомов элементов, из которых состоят кристаллические решетки минералов, входящих в состав исследованных пород [Веттегрень и др., 2014а; 2014б; 2014в; 2016а; Щербаков и др., 2017а, 2017б]. Так, спектры плазмы, вылетевшей из кварца, соответствовали излучению атомов и положительно заряженных ионов кремния, заряд которых изменялся от 1 до 4, атомов и положительно заряженных ионов кислорода, заряд которых изменялся от 1 до 3 [Веттегрень и др., 2014а]. Из гранитов вылетали положительно заряженные ионы и атомы Si, O, K, Ca, Al и Na, входящие в состав кристаллических решеток кварца и полевых шпатов [Веттегрень и др., 2014а; 2014б; 2014в; 2016а]. Из кальцита вылетали положительно заряженные ионы и атомы Ca, C и O [Щербаков и др., 2017б].

Какова же причина различного заряда ионов? За время существования плазмы ионы сталкиваются с электронами и друг с другом [Семиохин, 1988]. Это и приводит к уменьшению заряда ионов вплоть до нуля, т.е., появлению атомов.

В спектрах плазмы гранитов наблюдали также спектры положительно заряженных ионов примесей – Fe и Mn, а также ионов Cu, вылетевших из стенок медной камеры, и ионов азота, образовавшихся при бомбардировке молекул азота воздуха потоками плазмы.

После разрушения в камере оставались фрагменты образцов с размерами от нескольких мкм до нескольких мм. Их вес составлял ~20% от веса исходного образца.

Известно, что люминесценция возникает при разломе, трении и ударе бойком по поверхности горных пород [Силинь, Трухин, 1985; Веттегрень и др., 2008; 2011; 2012а; 2012б; 2013; 2016; Chapman, Walton, 1983; Kawaguchi, 1998]. Оказалось, что спектры люминесценции, возникающие при таких воздействиях, отличаются от спектров плазмы, вызванной ударной волной. Для примера, на рис. 5а, 5б показаны спектры люминесценции гранита (алаяскита) и кальцита при трении. Они состоят из нескольких, наложенных друг на друга полос [Turro, 1991]. Так максимум 1.39 эВ в спектре гранита возникает при переходе электронов из зоны проводимости в пустые ловушки, которые образуются при разрывах Si–O–Si и Si–O–Al связей в полевоом шпате [Huntley et al., 1985; 2007; Baril et al., 2003]. Максимум ~1.93 эВ возникает при релаксации электронного возбуждения радикалов  $\equiv\text{Si}-\text{O}^-$ , образующихся при разрывах Si–O–Si связей в полевоом шпате и кварце [Gotze, 2012]. Максимум 1.6 эВ возникает при релаксации электронного возбуждения в ионах  $\text{Fe}^{3+}$  [Gotze, 2012], замещающих ионы  $\text{Si}^{4+}$  в кристаллических ячейках полевых шпатов. Максимум 1.8 эВ, приписан излучению радикалов  $\text{CO}^-$  [Веттегрень и др.,



Рис. 3. Фотография плазмы, вылетевшей из кварца под влиянием ударной волны.

2013], образующихся при разрывах C–O связей в кальците.

Эти данные показывают, что механизм разрушения при трении и ударе отличается от механизма разрушения при воздействии ударных волн.

Чтобы выяснить причины этого различия, мы измерили скорость ударной волны в граните [Веттегрень и др., 2014а]. С этой целью емкость конденсатора и вторичная обмотка трансформатора были подобраны таким образом, чтобы за время измерения разряд не приводил к разрушению образца. Как показали предварительные измерения, энергия разряда, удовлетворяющая такому условию, составляет ~0.2 Дж, а мощность – 0.2 МВт. Образец гранита представлял собой параллелепипед с размерами ребер  $5 \times 5 \times 50$  мм, в одном из концов которого прорезан паз глубиной и шириной ~2 мм. В нем располагались медные электроды, расстояние между которыми – 3 мм. Затем был произведен разряд, который вызвал появление ударной волны. Ее скорость оценили по времени пробега волны до другого конца, на котором был установлен датчик из пьезокерамики ЦТС-19. Она оказалась равной  $\approx 5$  км/с. Более точное значение скорости – 4.8 км/с получено в [Веттегрень и др., 2014], что равно скорости продольной упругой волны в граните [Schon, 2011].

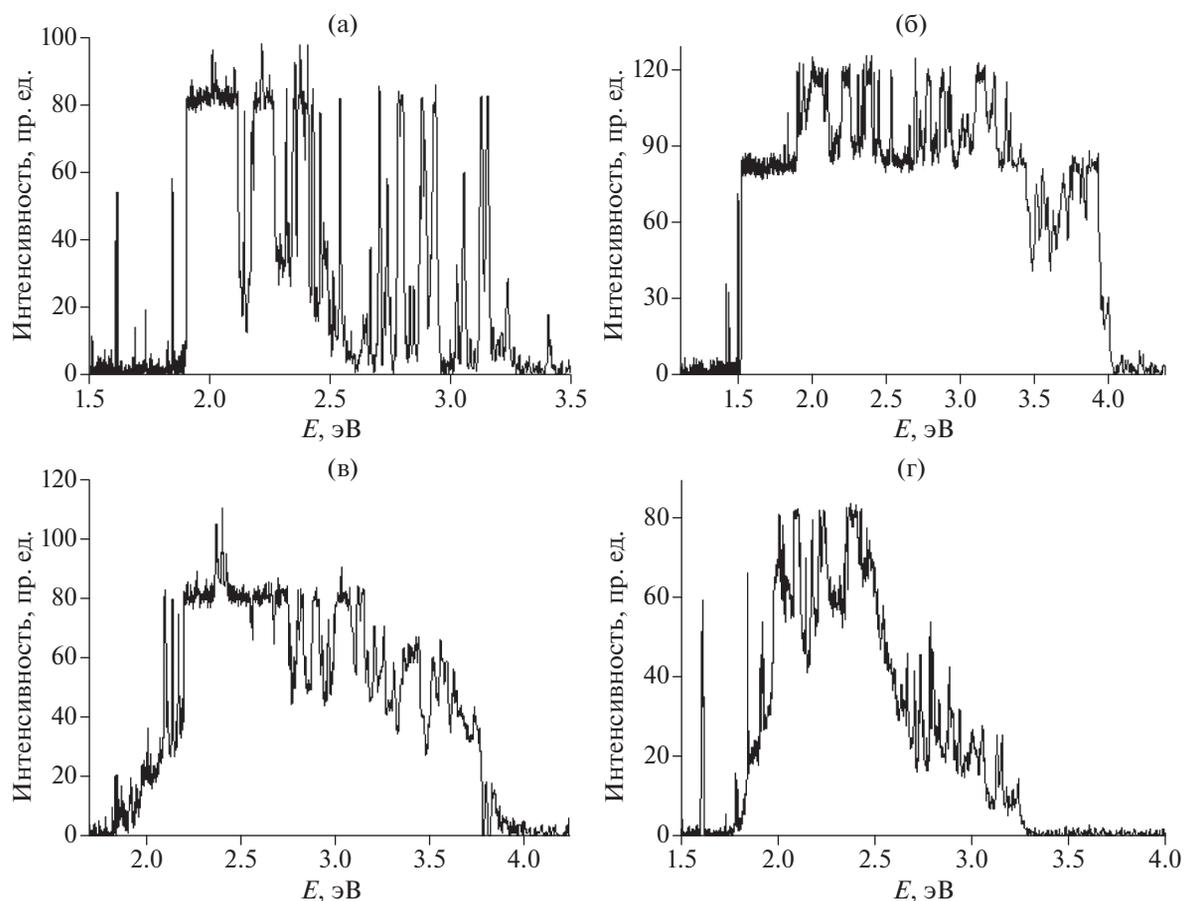


Рис. 4. Спектры излучения плазмы, вылетевшей из кристалла кварца (а), кальцита (б), аляскита (в), плагиогранита (г).

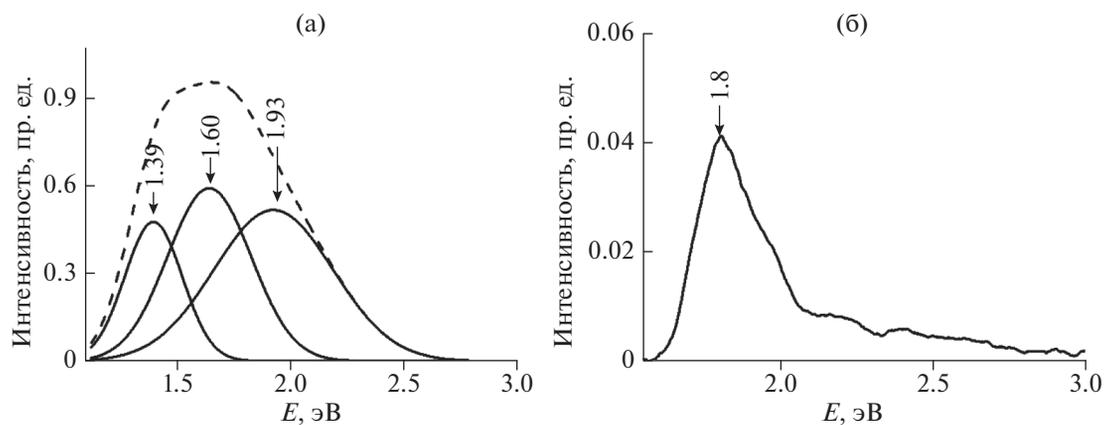
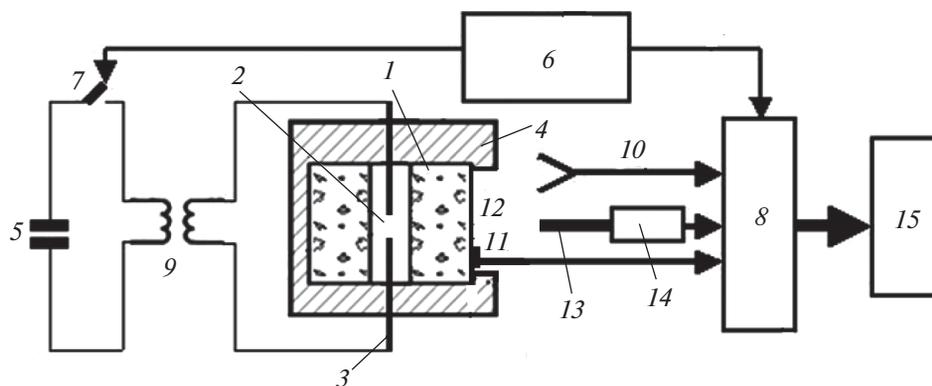


Рис. 5. Спектры излучения аляскита (а) и кальцита (б) при трении.

Как было показано ранее, микротрещины образуются и растут при прорыве стопоров, возникающих в местах пересечения плоскостей скольжения дислокаций [Владимиров, 1984; Cottrell, 1964], поэтому скорость роста трещин не превышает скорости упругой волны. Возможное объяс-

нение различия в механизмах разрушения заключается в том, что за время действия упругой волны трещины просто не успевают вырасти.

В работах [Закревский и др., 1999; 2000] был предложен механизм разрушения щелочногаллоидных кристаллов, не связанный с трещинами.



**Рис. 6.** Блок-схема установки для исследования динамики разрушения горных пород: 1 – исследуемый образец; 2 – паз; 3 – электроды; 4 – камера; 5 – конденсатор; 6 – синхронизирующий генератор; 7 – электронный ключ; 8 – аналогово-цифровой преобразователь; 9 – высоковольтный трансформатор; 10 – радиоантенна; 11 – датчик из пьезокерамики; 12 – окно; 13 – кварцевый световод; 14 – фотоэлектронный умножитель; 15 – компьютер.

Авторы предположили, что при сильных искажениях кристаллической решетки возможно пересечение основной – связывающей и возбужденной – не связывающей молекулярных орбиталей в кристаллах. Это может приводить к распаду межатомных связей на положительно заряженные ионы. Отметим, что плазма, вылетевшая из минералов, тоже в основном состоит из положительно заряженных ионов. Это позволило предположить [Веттегрень и др., 2014г], что ударная волна, отражаясь от поверхности породы, искажает кристаллические решетки минералов настолько, что межатомные связи в них “распадаются”, что и приводит к вылету положительно заряженных ионов.

### ДИНАМИКА И МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СЛАБЫХ УДАРНЫХ ВОЛН

Здесь мы рассмотрим динамику разрушения горных пород под действием слабых ударных волн образующихся при разряде в воздухе, энергия которого  $\approx 0.2$  Дж, т.е. в  $\sim 400$  раз меньше, чем в опытах, результаты которых описаны в предыдущем разделе.

Блок-схема установки показана на рис. 6. Для исследования временной зависимости люминесценции перед образцом (12) устанавливали один из концов кварцевого световода (13). Вторым концом световода располагали перед поверхностью фотокатода фотоэлектронного умножителя ФЭУ (14). Разряд приводил к колебаниям пластинки гранита, которые, вследствие пьезоэффекта, вызывали появление электромагнитной эмиссии. Ее регистрировали радиоантенной (10). Для измерения деформации поверхности образца на ней располагали датчик из пьезокерамики ЦТС-19 (11) размером  $4 \times 4 \times 1$  мм. Напряжения на радиоан-

тенне, пьезокерамике и выходе фотоэлектронного умножителя подавали на аналогово-цифровой преобразователь АЦП (8) и через каждые 2 нс записывали в память компьютера (15) для дальнейшего анализа и обработки.

Сначала происходила ионизация воздуха и пробой воздушного промежутка между электродами (рис. 7). Затем загорался разряд, который вызвал скачки напряжения на линии между ФЭУ и АЦП. Они вызваны перезарядкой конденсаторов, входящих в электрическую цепь. Амплитуда скачков достигает максимального значения через каждые 0.1–0.2 мкс, затем уменьшается и стремится к нулю через 1.4 мкс после возникновения разряда.

Когда ударная волна достигала поверхности образца, появлялись первые сигналы люминесценции (рис. 8). Они имели одинаковый вид, показанный на рис. 9. Одновременно напряжение на пьезоэлементе, установленном на поверхности образца, начинало расти и достигало максимального значения, а затем уменьшалось и начинало осциллировать вокруг среднего значения. Осцилляции вызваны многочисленными отражениями ударной волны от противоположных граней образца. Их амплитуда монотонно уменьшается и через несколько сотен мкс становится незаметной (рис. 10).

Каков же механизм возникновения люминесценции под действием “слабых” ударных волн? Известно, что деформация кристаллов осуществляется путем движения дислокаций, которые двигаются в плоскостях скольжения. Если такие плоскости пересекаются, то дислокации “наталкиваются” друг на друга, что приводит к возникновению стопоров, препятствующих их движению [Владимиров, 1984; Cottrell, 1964]. В работах [Закревский и др., 1999; 2000] было показано, что в областях пересечения плоскостей скольжения



Рис. 7. Скачки напряжения в измерительном приборе, вызванные горением электрической дуги.

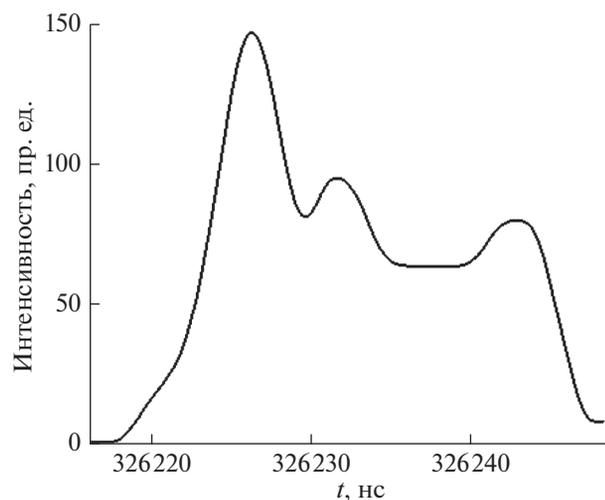


Рис. 9. Временная зависимость интенсивности произвольно выбранного сигнала люминесценции гранита.

дислокаций, искажения кристаллической решетки минералов настолько велики, что становится возможным распад межатомных связей. Ударная волна может выносить такие области на поверхность породы, и на ней должны наблюдаться дефекты в виде протяженных “канавок”. Оказалось, что, действительно, после воздействия ударной волны на поверхностях гранитов и габбро-диабазы наблюдаются протяженные “канавки” (рис. 11).

Временная зависимость интенсивности сигналов люминесценции (рис. 12) определяется скоростью двух процессов. Первый – рост интенсивности при образовании и росте “канавки”. Второй – уменьшение сигнала от ФЭУ после ее образования. Скорость такого уменьшения определяется величинами паразитной емкости и со-

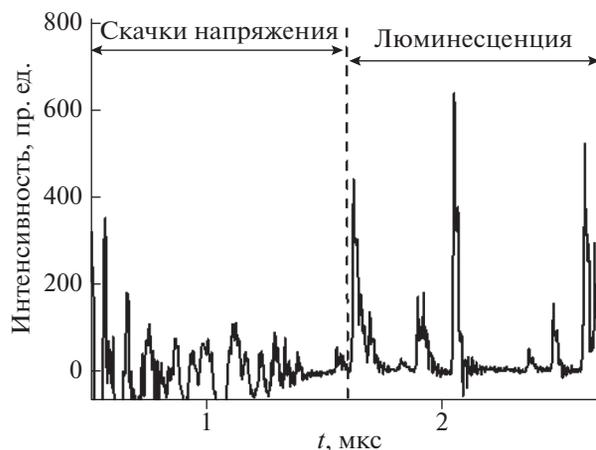


Рис. 8. Фрагмент временной зависимости напряжения на входе АЦП, иллюстрирующий появление сигналов люминесценции. Слева – осцилляции, вызванные горением дуги, справа – первые сигналы с выхода ФЭУ после попадания на его поверхность фотонов от положительно заряженных ионов.

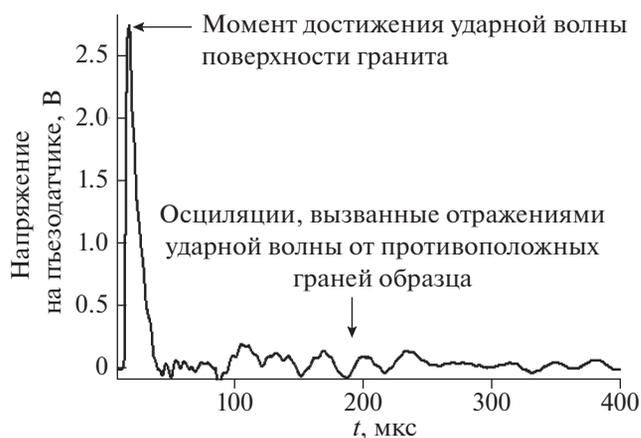


Рис. 10. Временная зависимость напряжения  $U$  на пьезодатчике, установленном на поверхности гранита.

противления нагрузки в нашей установке. Будем полагать, что максимальная скорость роста интенсивности струй ионов задана скоростью ударной волны. Как отмечалось, в гранитах она составляет  $\approx 5$  км/с. Тогда, по времени  $\Delta t$  достижения максимального значения интенсивности  $I_m$  струй (см. рис. 12), можно оценить длину дефектов. Оказалось, что для всех исследованных гранитов она варьирует от  $\sim 5$  до 30 мкм.

На рис. 13 в полулогарифмических координатах приведены распределения интенсивности  $I$  струй ионов, которая пропорциональна длине “канавок”  $L$  от их числа  $N$ . Они описываются выражением  $-\ln I = \ln I_0 - bN$  [Щербаков и др., 2018б] или:

$$I = I_0 \exp(-bN).$$

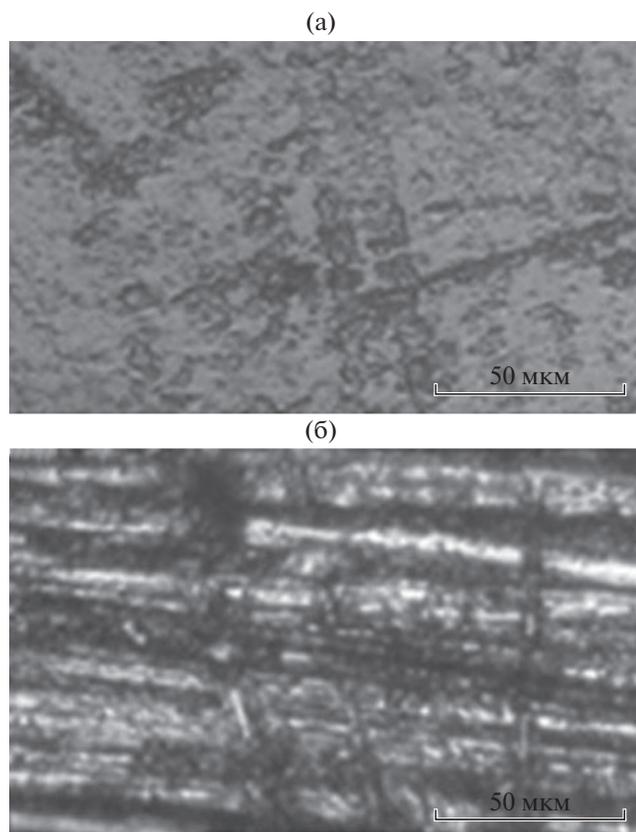


Рис. 11. Фотографии поверхности аляскиита до (а) и после (б) воздействия ударной волны.

Здесь  $I_0$  – максимальная интенсивность струи ионов. Это означает, что распределение длин канавок описывается выражением:

$$L = L_0 \exp(-bN),$$

где  $L_0$  – максимальная длина “канавки”,  $ab$  – опытная постоянная.

### ИЗМЕНЕНИЕ СТРОЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПОД ДЕЙСТВИЕМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Как уже отмечалось, после разрушения горных пород под действием интенсивной ударной волны около 20% образца распалось на фрагменты от нескольких мкм до нескольких мм.

Фрагменты гранита представляли собой кристаллы кварца, санидина и плагиоклаза с размерами – несколько десятков мкм. Мы исследовали строение поверхности этих фрагментов методами рамановской, инфракрасной (ИК) и фотолюминесцентной (ФЛ) спектроскопии [Веттегрень и др., 2015; 2016в; Щербаков и др., 2018б]. Диаметр луча лазера ~30 мкм, что позволило получить рамановские спектры каждого минерала в отдельности [Веттегрень и др., 2016]. ИК спектры отражения

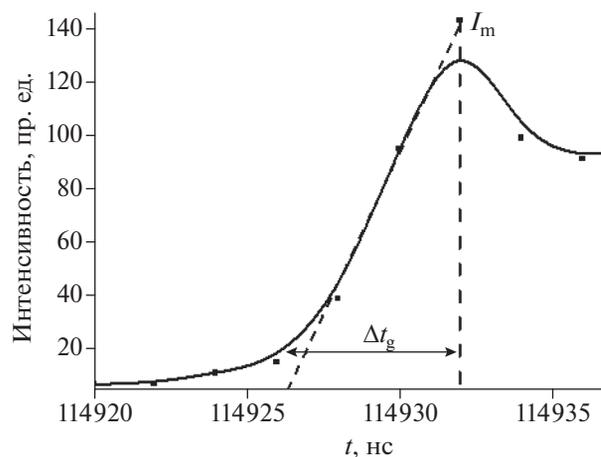


Рис. 12. Фрагмент временной зависимости интенсивности сигнала люминесценции.

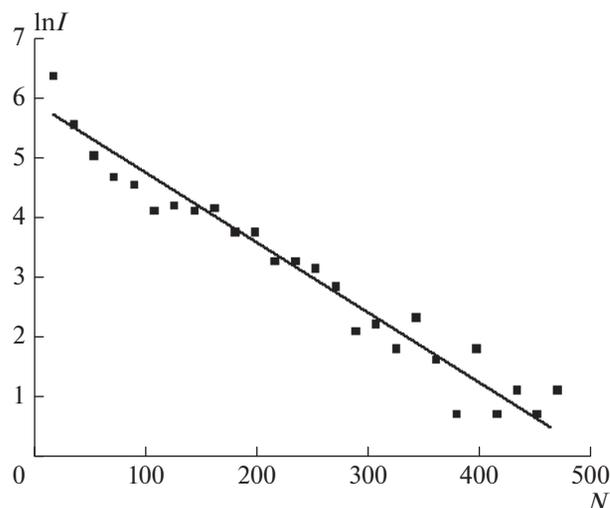


Рис. 13. Распределение интенсивности сигналов люминесценции габбро-диабазы.

образцов записывали на Фурье – спектрометре IR-21 “Prestige”. Для записи спектров использовали приставку SRM-8000A. Угол падения луча на образец составлял 10°. Полученные спектры отражения пересчитывали в спектры затухания (мнимой части диэлектрической функции)  $\epsilon''(\nu)$ , где  $\nu$  – частота. С этой целью использовали метод, предложенный в работе [Kuzmenko, 2005].

Рамановские спектры записывали на спектрометре Ramalog-5. Их возбуждали аргоновым лазером  $Ar^{2+}$  16508 (Spectra Physics), линия 514.5 нм. На поверхность образца, установленного на предметном столике, направлялся луч лазера, сфокусированный в пятно диаметром  $\approx 30$  мкм. Рассеянный в обратном направлении луч света при помощи зеркала и фокусирующей оптиче-

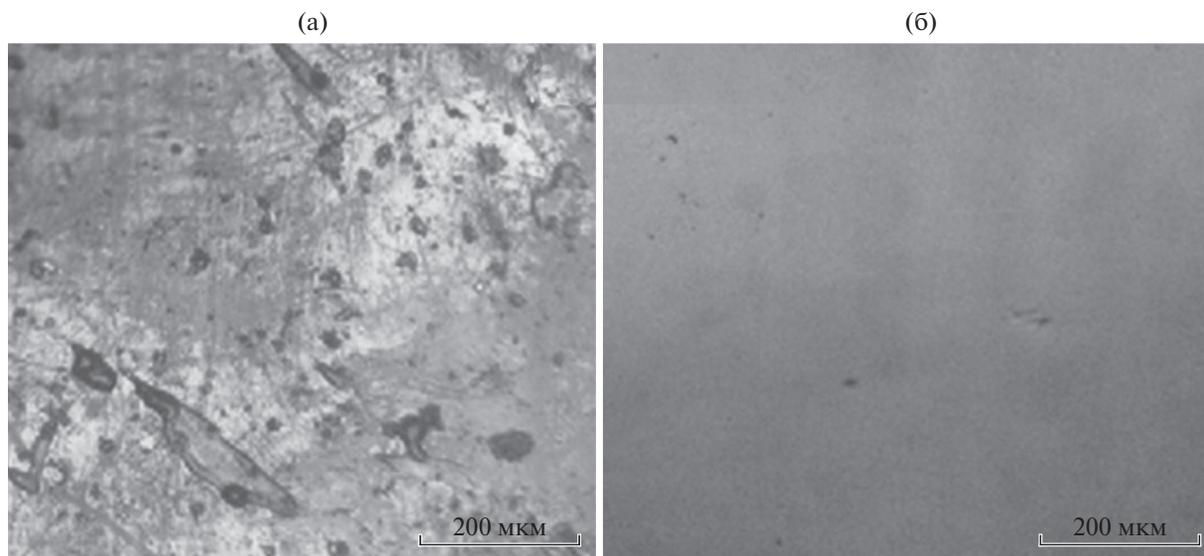


Рис. 14. Фотографии поверхностей образца со стороны электрического разряда (а) и с обратной стороны (б).

ской системы направлялся на входную щель монохроматора.

Спектры ФЛ регистрировали под углом  $10^\circ$  к направлению луча импульсного лазера LGI-21, энергия линии излучения — 3.68 эВ. Размер исследуемой площади на поверхности образца определялся размерами пятна луча лазера, сфокусированного на поверхность образца, и равнялся 2 мм. Регистрация спектра осуществлялась оптоволоконным спектрометром AvaSpec-ULSi2048L-USB2 OEM. Измеренную интенсивность полос нормировали на интенсивность луча лазера отраженного от поверхности.

При отражении от поглощающего объекта амплитуда колебаний электрического вектора излучения затухает экспоненциально от поверхности вглубь образца. Глубина  $h$ , на которой она уменьшается в  $e \approx 2.7$  раз ( $e$  — основание натуральных логарифмов), а интенсивность излучения — в  $e^2 \approx 8$  раз, соответствует эффективной толщине поверхностного слоя, о которой несут информацию спектры отражения и фотолюминесценции. Ее вычисляли по формуле [Born, Wolf, 1964]:

$$h \approx 1/4 \pi v k,$$

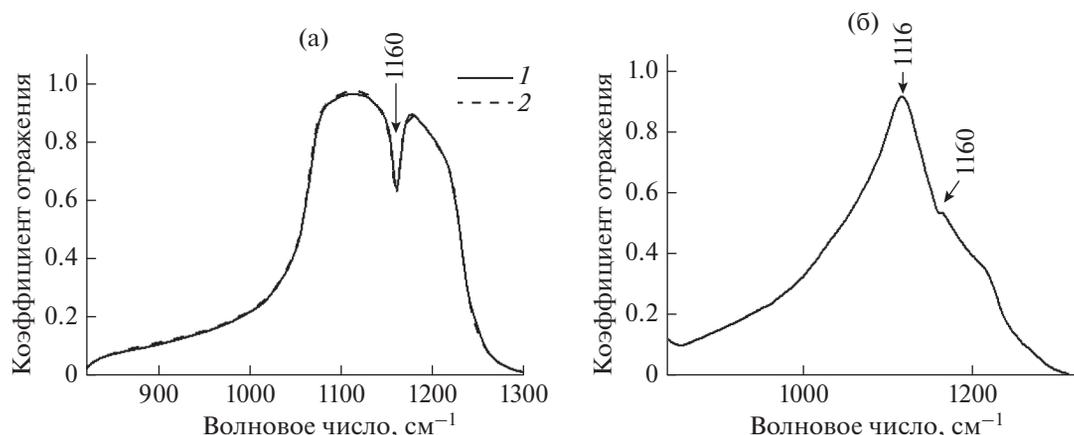
где  $k$  — показатель поглощения.

Для рамановских спектров гранитов [Веттегрень и др., 2016]  $h \sim 0.2$  мкм [Веттегрень и др., 2016в]. Для инфракрасных спектров кальцита, величина  $h$  зависит от частоты и заключена в пределах от 0.1 до 2 мкм [Щербаков и др., 2018б]. Для кварца  $h \approx 0.15$  мкм, [Веттегрень и др., 2015].

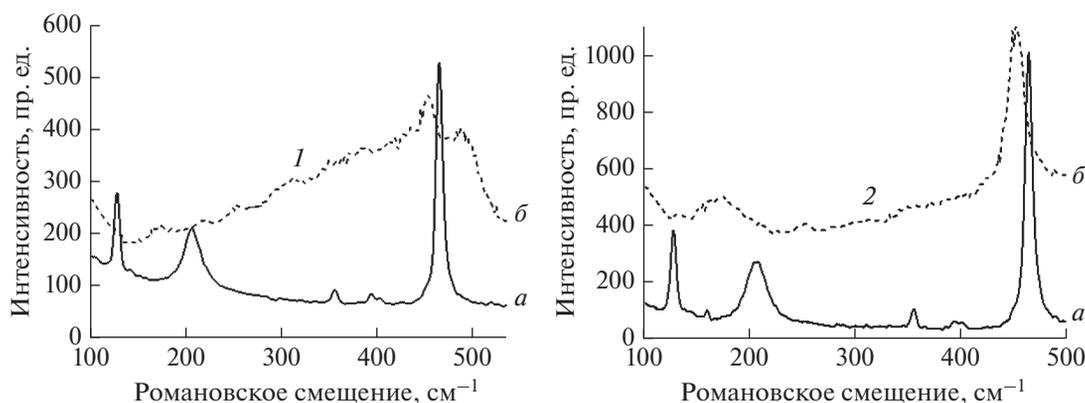
### Изменение строения поверхности кварца

На рис. 14а, 14б показаны фотографии двух поверхностей осколка кварца. Одна, неровная, покрыта множеством вмятин и “воронков” с поперечными размерами от нескольких мкм до  $\sim 100$  мкм, которые образовались при бомбардировке поверхности образца, после его откола, более мелкими частицами кварца и ионами плазмы. Она располагалась со стороны, с которой произошел разряд. Вторая, гладкая, с противоположной стороны, — носила следы распила алмазной пилой.

Спектры отражения от этих поверхностей приведены на рис. 15а, 15б. Видно, что спектр, полученный от поверхности образца со стороны, обратной электрическому разряду, практически полностью совпал со спектром монокристалла кварца. Это показывает, что поверхностные слои образца с этой стороны состоят из кварца, кристаллическая решетка которого практически не изменилась. Иное строение имеет поверхностный слой толщиной  $h = 0.15$  мкм со стороны электрического разряда. Так в спектре отражения ИК излучения от этой стороны (рис. 15б) наблюдается максимум  $1116 \text{ см}^{-1}$ . На его высокочастотном крыле существует слабо выраженный излом, частота которого совпадает с частотой минимума в спектре монокристалла кварца —  $1160 \text{ см}^{-1}$ . Эти особенности спектра показывают [Schneider, 1978], что поверхностный слой кварца представляет собой диалектическое стекло, т.е. кварц с чрезвычайно сильно искаженной кристаллической решеткой.



**Рис. 15.** Спектры отражения ИК излучения от поверхности образца до (1) и после (2) воздействия волны со стороны обратной к месту электрического разряда (а) и спектр отражения ИК излучения от поверхности кристалла кварца после воздействия волны со стороны электрического разряда (б).



**Рис. 16.** Рамановские спектры санидина в аляските (1, кривая а), плагиоклаза в плагиограните (1, кривая б) и порошков этих минералов шпатов (2), образовавшихся после воздействия ударной волны.

**Изменение строения поверхности гранита**

На рис. 16 показаны рамановские спектры макрокристаллов санидинов в аляските и плагиоклазов в плагиограните до воздействия ударной волны и порошков санидина и плагиоклаза с размерами несколько десятков мкм, образовавшихся после разрушения аляскита и плагиогранита под действием ударных волн. Согласно работе [Mc-Millan, Wolf., 1992; Neumann, Hörz, 1990] наблюдаемые изменения в спектрах показывают, что на поверхности указанных минералов образуются диаплектические стекла.

**Изменение строения поверхности кальцита**

На рис. 17 показаны фотографии поверхности кальцита до и после воздействия ударной волны. До воздействия волны на ней наблюдались зерна кальцита, средний размер которых ~40 мкм. По-

сле воздействия волны размер зерен уменьшился до нескольких мкм.

На рис. 18 показан спектр затухания ИК излучения в поверхностном слое кальцита толщиной  $h \approx 1$  мкм до (1) и после (2) воздействия ударной волны в областях  $1250-1530 \text{ см}^{-1}$  (а) и  $1425-1670 \text{ см}^{-1}$  (б). До воздействия ударной волны в спектрах наблюдаются два максимума –  $1395.5$  и  $1550 \text{ см}^{-1}$ . Первый –  $1395.5 \text{ см}^{-1}$  соответствует поперечным, а второй –  $1550 \text{ см}^{-1}$  продольным колебаниям кристаллической решетки кальцита [Gunasekaran et al., 2006; Catalli, Williams, 2005; Lou et al., 2007; Williams et al., 1992].

После воздействия ударной волны максимумы обеих полос смещаются в сторону высоких частот: для поперечных колебаний – на  $\sim 20 \text{ см}^{-1}$ , а для продольных – на  $\sim 30 \text{ см}^{-1}$ . Одновременно, полоса, соответствующая поперечным колебани-

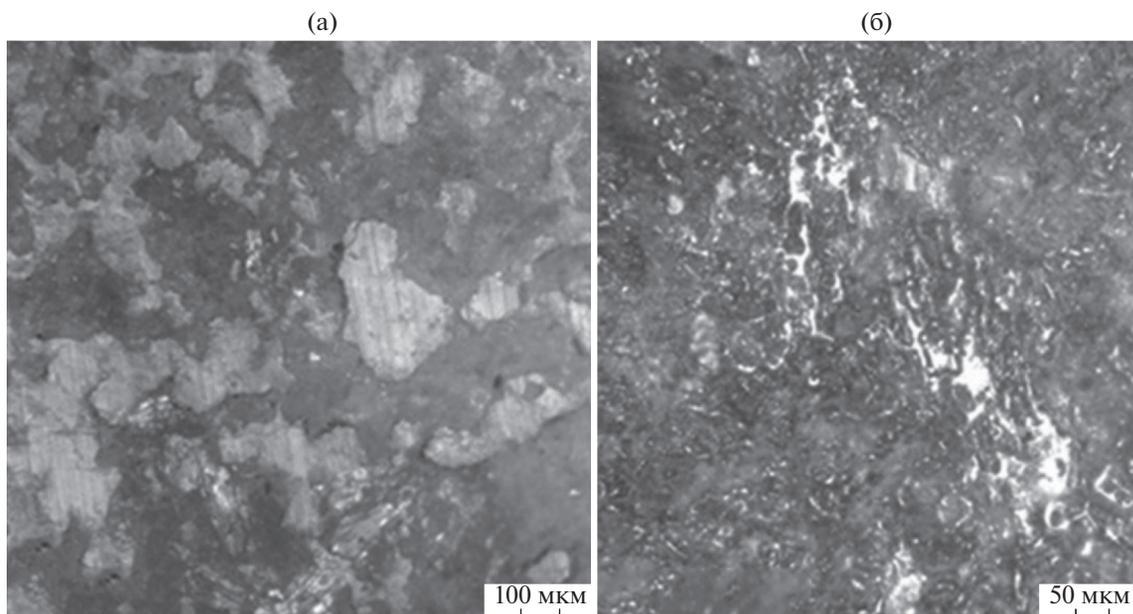


Рис. 17. Фотографии поверхности кальцита до (а) и после (б) воздействия ударной волны.

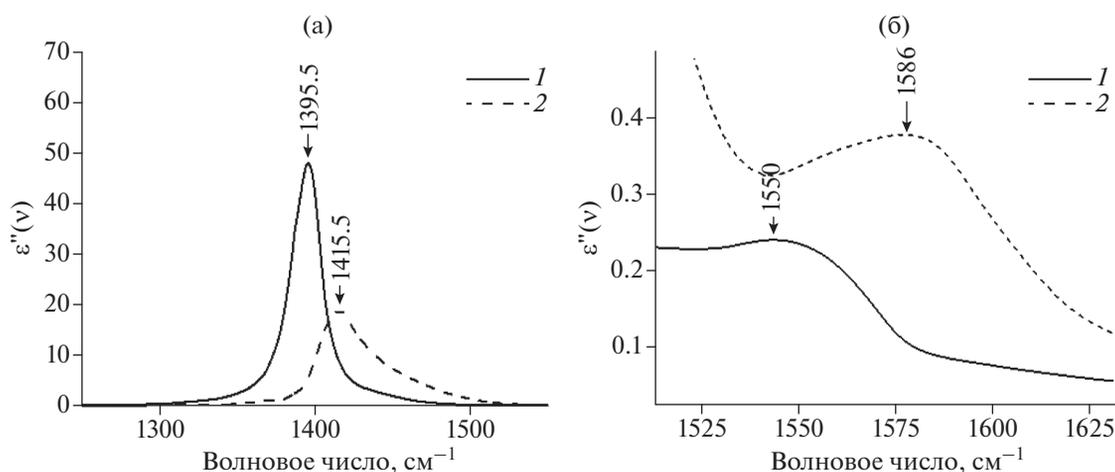


Рис. 18. Спектры затухания ИК излучения кальцита до (1) и после (2) воздействия ударной волны в областях 1250–1530  $\text{cm}^{-1}$  (а) и 1425–1670  $\text{cm}^{-1}$  (б).

ям кристаллической решетки кальцита, становится несимметричной.

Смещение максимума полосы вызвано деформацией кристаллической решетки кальцита. Величина смещения  $\Delta\nu$  связана с эффективной величиной гидростатического давления  $P_{ef}$ , вызывающим эту деформацию, выражением [Madelung, 1972]:

$$\Delta\nu = \nu_p - \nu_0 = \alpha P_{ef},$$

где:  $\nu_p$  и  $\nu_0$  – частоты колебаний кристаллической решетки под давлением и без него,  $\alpha = d\nu/dP_{ef}$ .

Для поперечных колебаний  $\alpha = 1.5 \text{ cm}^{-1}/\text{ГПа}$  [Williams et al., 1992]. Тогда, наблюдаемое смеще-

ние – 20  $\text{cm}^{-1}$  максимума полосы, соответствующей таким колебаниям, может быть пересчитано в эффективное давление  $P_{ef} = 20/1.5 \approx 13 \text{ ГПа}$ . Известно [Catalli, Williams, 2005; Merrill, Bassett, 1975; Merlini et al., 2014], что при таком давлении кальцит I трансформируется в высокобарическую фазу – кальцит III.

Полученные данные показывают, что под влиянием потоков ионов и электронов в поверхностных слоях кварца и гранитов образуются диаплектические стекла, а кальцита – высокобарическая фаза – кальцит III.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование методов люминесценции с временным разрешением 2 нс показало, что во время действия ударных волн с поверхности минералов вылетают струи положительно заряженных ионов. Ударные волны мощностью до 8 МВт в наших условиях приводили к разложению на ионы ~80% объема пород. Воздействие относительно слабых, около 0.2 МВт, ударных волн приводило к вылету струй ионов из наиболее искаженных мест кристаллических решеток — стопоров, препятствующих движению дислокаций.

Исследование методами инфракрасной и рамановской спектроскопии показало, что воздействие потоков ионов и электронов на поверхности кварца и гранитов приводит к образованию на них диаплектических стекол, а на поверхности кальцита — к образованию высокобарической фазы — кальцита III.

Полученные результаты показывают, что механизм разрушения горных пород под действием ударных волн имеет иную природу, чем разрушение при трении или расколе. Одновременно, они открывают возможность построения нового механизма разрушения, основанного не на образовании и росте трещин, а на законах испарения ионов и электронов с поверхности горных пород. Из них также следует, что поверхностный слой пород, подвергнутых воздействию пучков ионов и электронов, инициированных ударными волнами, имеет иное строение, чем их объем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Спивак А.А. Геомеханика крупномасштабных взрывов. М.: Недра. 1993. 319 с.
- Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г. Эволюция микроскопических трещин и пор в нагруженных твердых телах // Физика твердого тела. 2005. Т. 47. Вып. 5. С. 801–807.
- Быкова В.В., Стаховский И.Р., Федорова Т.С., Хрусталев Ю.А., Дерягин Б.В., Топоров Ю.П. Электронная эмиссия при разрушении горных пород // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1987. № 8. С. 87–90.
- Веттегрень В.И., Башкарев А.Я., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П. Фрактोलюминесценция кристаллического кварца при ударе // Физика твердого тела. 2008. Т. 50. Вып. 1. С. 29–31.
- Веттегрень В.И., Куксенко В.С., Щербаков И.П. Кинетика эмиссии света, звука и радиоволн из монокристалла кварца после удара по его поверхности // Журн. технической физики. 2011. Т. 81. Вып. 4. С. 148–151.
- Веттегрень В.И., Куксенко В.С., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П. Динамика фрактोलюминесценции, электромагнитной и акустической эмиссии при ударе по поверхности гранита // Физика Земли. 2012а. № 5. С. 58–63.
- Веттегрень В.И., Куксенко В.С., Щербаков И.П. Динамика микротрещин и временные зависимости деформации поверхности гетерогенного тела (гранита) при ударе // Физика твердого тела. 2012б. Т. 54. Вып. 7. С. 1342–1346.
- Веттегрень В.И., Куксенко В.С., Щербаков И.П. Динамика фрактोलюминесценции, электромагнитной и акустической эмиссии при ударе по поверхности мрамора // Журн. технической физики. 2013. Т. 83. Вып. 1. С. 144–147.
- Веттегрень В.И., Воронин А.В., Куксенко В.С., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П. Люминесценция кварца под действием ударной волны // Физика твердого тела. 2014а. Т. 56. Вып. 2. С. 315–317.
- Веттегрень В.И., Щербаков И.П., Воронин А.В., Куксенко В.С., Мамалимов Р.И. Динамика деформации и разрушения гетерогенного тела (гранита) под влиянием электрического разряда // Физика твердого тела. 2014б. Т. 56. Вып. 5. С. 981–985.
- Веттегрень В.И., Щербаков И.П., Куксенко В.С., Мамалимов Р.И. Эмиссия плазмы, вылетающей из гетерогенного тела (гранита) под влиянием электрического разряда около его поверхности // Физика твердого тела. 2014в. Т. 56. Вып. 9. С. 1767–1771.
- Веттегрень В.И., Куксенко В.С., Щербаков И.П., Мамалимов Р.И. Трансформация структуры кварца под влиянием ударной волны // Физика твердого тела. 2015. Т. 57. Вып. 12. С. 2385–2387.
- Веттегрень В.И., Куксенко В.С., Щербаков И.П. Механизм и динамика разрушения горных пород под влиянием механического удара и электрического разряда // Физика Земли. 2016а. № 5. С. 134–149.
- Веттегрень В.И., Щербаков И.П., Мамалимов Р.И. Наносекундная динамика разрушения гетерогенного твердого тела (гранита) при ударе по его поверхности // Физика твердого тела. 2016б. Т. 58. Вып. 11. С. 2252–2255.
- Веттегрень В.И., Щербаков И.П., Мамалимов Р.И., Кулик В.Б. Изменение структуры гетерогенного твердого тела (гранита) под влиянием ударной волны // Физика твердого тела. 2016в. Т. 58. Вып. 4. С. 681–684.
- Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. М.: Металлургия. 1984. 280 с.
- Зайдель А.Н., Прокофьев В.К., Райский С.М., Шрейдер Е.Я. Таблицы спектральных линий. М.: Физматгиз. 1952. 608 с.
- Закревский В.А., Шульдинер А.В. Взаимодействие дислокаций с радиационными дефектами в щелочно-галоидных кристаллах // Физика твердого тела. 2000. Т. 42. Вып. 2. С. 263–266.
- Закревский В.А., Шульдинер А.В. Электронные возбуждения, возникающие вследствие пластического деформирования ионных кристаллов // Физика твердого тела. 1999. Т. 41. Вып. 5. С. 900–902.
- Канель Г.И., Фортвов В.Е., Разоренов С.В. Ударные волны в физике конденсированного состояния // Успехи физических наук. 2007. Т. 177. С. 809–830.
- Малыгин Г.А. Влияние гидростатического давления на аннигиляцию винтовых дислокаций поперечным скольжением в щелочно-галоидных кристаллах // Физика твердого тела. 1992. Т. 34. Вып. 10. С. 3200–3211.
- Петров В.А., Башкарев А.Я., Веттегрень В.И. Физические основы прогнозирования долговечности кон-

- струкционных материалов. СПб.: Политехника. 1993. 475 с.
- Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е.* Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука. 1974. 560 с.
- Семиохин И.А.* Элементарные процессы в низкотемпературной плазме. М.: изд-во МГУ. 1988. 142 с.
- Силинь А.Р., Трухин А.Н.* Точечные дефекты и элементарные возбуждения в кристаллическом и стеклообразном SiO<sub>2</sub>. Рига: Зинатне. 1985. 244 с.
- Фортвов В.Е.* Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества // *Успехи физ. наук.* 2007. Т. 177. № 4. С. 347–368.
- Черемской П.Г., Слезов В.В., Бетехтин В.И.* Поры в твердом теле. М.: Энергоатомиздат. 1990. 376 с.
- Щербаков И.П., Веттегрень В.И., Мамалимов Р.И., Махмудов Х.Ф.* Наносекундная динамика разрушения напряженного гранита под влиянием ударной волны // *Журн. технической физики.* 2017а. Т. 87. Вып. 8. С. 1182–1184.
- Щербаков И.П., Веттегрень В.И., Мамалимов Р.И.* Механизм и динамика разрушения кальцита под влиянием ударной волны // *Журн. технической физики.* 2017б. Т. 8. Вып. 10. С. 1527–1531.
- Щербаков И.П., Веттегрень В.И., Мамалимов Р.И., Махмудов Х.Ф.* Влияние напряжения на эмиссию ионов инициированных ударной волной из гетерогенного материала (гранита) // *Физика твердого тела.* 2017в. Т. 59. Вып. 3. С. 556–558.
- Щербаков И.П., В.И. Веттегрень, Р.И. Мамалимов, Махмудов Х.Ф.* Механизм и динамика разрушения поверхности напряженных гранитов под влиянием ударной волны // *Журн. технической физики.* 2018а. Т. 88. Вып. 7. С. 1009–1013.
- Щербаков И.П., Веттегрень В.И., Башкарев А.Я., Кулик В.Б., Мамалимов Р.И.* Трансформация структуры поверхности мрамора под влиянием ударной волны // *Журн. технической физики.* 2018б. Т. 88. Вып. 1. С. 80–84.
- Adushkin V.V., Soloviev S.P.* Generation of low-frequency electric fields by explosion crater formation // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. № B9. P. 20165–20174.
- Baril M.R., Huntley D.J.* Infrared stimulated luminescence and phosphorescence spectra of irradiated feldspars // *J. Phys.: Condens. Matter.* 2003. V. 15. P. 8029–8048.
- Bishop J.L., Lane M.D., Dyar M.D., Brown A.J.* Reflectance and Emission Spectroscopy Study of Four Groups of Phyllosilicates: Smectites, Kaolinite, Serpenites, Chlorites and Micas // *Clay Minerals.* 2008. V. 43. P. 35–54.
- Born M., Wolf E.* Principles of optics. Second Ed. Oxford: Pergamon press. 1964. 856 p.
- Catalli K., Williams Q.* A high-pressure phase transition of calcite-III // *American Mineralogist.* 2005. V. 90. P. 1679–1682.
- Chapman G.N., Walton A.J.* Triboluminescence of glasses and quartz // *J. Appl. Phys.* 1983. V. 54. № 10. P. 5961–5965.
- Cottrell A.H.* Theory of Crystal Dislocations. NY.: Gordon and Breach. 1964. 91 p.
- Etchepare J., Merian M., Kaplan P.* Vibrational normal modes of SiO<sub>2</sub>.  $\alpha$  and  $\beta$  quartz // *J. Chem. Phys.* 1974. V. 60. № 5. P. 1873–1876.
- Galvez H.I.P.* Analysis of the state of the art of blast-induced fragment conditioning // *Minerals Eng.* 2011. V. 24. P. 1638–1640.
- Gunasekaran S., Anbalagan G., Pandi S.* Raman and infrared spectra of carbonates of calcite structure // *J. Raman Spectrosc.* 2006. V. 37. Iss. 9. P. 892–899.
- Gotze J.* Application of cathodoluminescence microscopy and spectroscopy in geosciences // *Microsc. Microanal.* 2012. V. 18. P. 1270–1284.
- Heymann D., Horz F.* Raman-spectroscopy and X-ray diffractometer studies of experimentally produced diaplectic feldspar glass // *Phys. Chem. Minerals.* 1990. V. 17. P. 38–44.
- Huntley D.J., Godfrey-Smith D.I., Thewalt M.L.W.* Optical dating of sediments // *Nature.* 1985. V. 313. P. 105–107.
- Johnson J.R., Horz F., Staid M.I.* Thermal infrared spectroscopy and modeling of experimentally shocked plagioclase feldspars // *American Mineralogist.* 2003. V. 88. P. 1575–1582.
- Kanel G.I., Razorenov S.V., Fortov V.E.* Shock-Wave Phenomena and the Properties of Condensed Matter. N.Y.: Springer. 2004. 322 p.
- Kawaguchi Y.* Fractoluminescence Spectra in Crystalline Quartz // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1998. V. 37. P. 1892–1896.
- Koike C.* Infrared absorption spectra of plagioclase feldspar: Dependencies of composition and temperature // *Planetary and Space Science.* 2017. V. 149. P. 94–99.
- Kuzmenko A.B.* Kramers–ronig constrained variational analysis of optical spectra // *Rev. Sci. Instr.* 2005. V. 76. № 8. P. 1–10.
- Lakshatanov D.L., Sinogeikin S.V., Bass J.D.* High-temperature phase transitions and elasticity of silica polymorphs // *Phys Chem. Min.* 2007. V. 34. P. 11–22.
- Langenhorst F.* Shock metamorphism of some minerals: Basic introduction and microstructural observations // *Bulletin of Geosci.* 2002. V. 77. № 4. P. 265–282.
- Iishi K., Yamacuchi H.* Study of the Force Field and the Vibrational Normal Modes in the  $\alpha$ - $\beta$  Quartz Phase Transition // *American Mineralogist.* 1975. V. 60. P. 907–912.
- Lou D., Sun F., Li L.* Study on vibrational modes by group theory and infrared spectra by DFT for calcite crystal // *Chinese Optics Lett.* 2007. V. 5. № 6. P. 370–372.
- Madelung O.* Festkorpertheorie. Berlin: Springer. 1972. 416 p.
- McMillan P.F., Wolf G.H.* A Raman spectroscopic study of shocked single crystalline quartz // *Phys. Chem. Min.* 1992. V. 19. P. 71–79.
- Merrill L., Bassett W.A.* The crystal structure of CaCO<sub>3</sub>(II), a high-pressure metastable phase of calcium carbonate // *Acta Crystallographica, B.* 1975. V. 31. P. 343–349.
- Merlini M., Crichton W.A., Chantel J., Guignard J., Poli S.* Evidence of interspersed co-existing CaCO<sub>3</sub>-III and CaCO<sub>3</sub>-IIIb structures in polycrystalline CaCO<sub>3</sub> at high pressure // *Mineralogical Magazine.* 2014. V. 78. № 2. P. 225–233.
- O'Keefe S.G., Thiel D.V.* Electromagnetic emissions during rock blasting // *Geophys. Res. Lett.* 1991. V. 18. № 5. P. 889–892.

- Schon J.H.* Physical Properties of Rocks. A workbook. Amsterdam: Elsevier. 2011. 494 p.
- Schneider H.* Infrared spectroscopic studies of experimentally shock-loaded quartz // *Meteoritics*. 1978. V. 13. № 2. P. 227–234.
- Shimoda S., Brydon J.E.* IR study of some interstratified mineral of mica and montmorillonites // *Clays & Clay Minerals*. 1971. V. 19. P. 61–66.
- Stevens Kalceff M. A., Phillips M.R.* Cathodoluminescence microcharacterization of the defect structure of quartz // *Phys. Rev. B*. 1995. V. 52. № 5. P. 3122–3134.
- Turro N.J., Ramamwrtte V., Scaiano J.C.* Modern Molecular Photochemistry. Columbia University: University Sci. Press. 2010. 1085 p.
- Williams Q., Collerson B., Knittle E.* Vibrational spectra of magnesite (MgCO<sub>3</sub>) and calcite III at high pressures // *American Mineralogist*. 1992. V. 77. P. 1158–1165.
- Williams Q., Hemley R.J., Kruger M.B., Jeanloz R.J.* High-pressure infrared spectra of  $\alpha$ -quartz, coesite, stishovite and silica glass // *Geophys. Res.* 1993. V. 98. P. 22157–22170.

## Fracture Mechanism of the Rock under the Action of Shock Waves

I. P. Shcherbakov<sup>a</sup>, V. I. Vettegren<sup>a, b, \*</sup>, and R. I. Mamalimov<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>*Ioffe Physical-Technical Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 194021 Russia*

<sup>b</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

\**e-mail: victor.vettegren@mail.ioffe.ru*

Fracture mechanism and dynamics is studied with a time resolution of 2 ns in the quartz, granite, gabbro-diabase, and calcite samples in a shock wave field. It is found out that jets of positively charged ions are ejected from the shock-loaded surface of minerals. The structure of the surface layer of these rocks after loading by shock waves is studied by the infrared, Raman, and photoluminescent spectroscopy. It is established that in the surface layers of quartz and granites, diaplectic glasses are formed, whereas in the surface layers of calcite—the high pressure phase—calcite III is produced.

*Keywords:* shock waves, fracture mechanism and fracture dynamics, quartz, granites, calcite