

Изменение структуры гетерогенного твердого тела (гранита) под влиянием ударной волны

© В.И. Веттегрень, И.П. Щербаков, Р.И. Мамалимов, В.Б. Кулик

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Victor.Vettegren@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 21 сентября 2015 г.)

Методами инфракрасной, рамановской и фотолюминесцентной спектроскопии исследовано строение двух видов гранитов (плагриогранита и аляскита) до и после воздействия ударной волны. Установлено, что ударная волна вызвала трансформацию кристаллов кварца и полевых шпатов, из которых состоят эти граниты, в диаплектические стекла.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-05-00011-а).

1. Введение

К настоящему времени большие успехи достигнуты в области кинетики деформации твердых тел под действием ударных волн [1–3]. Начато построение теоретической модели разрушения при ударно-волновом нагружении [4]. Первые экспериментальные данные о механизме разрушения диэлектриков были получены [5–7] благодаря созданию установок, регистрирующих динамику люминесценции с наносекундным разрешением. Установлено, что под действием ударной волны из диэлектриков вылетают пучки положительно заряженных ионов и электронов. Одновременно они распадаются на осколки с размерами от нескольких микрометров до нескольких миллиметров.

В работе [8] методом ИК-спектроскопии отражения была исследована поверхность осколка монокристалла кварца после воздействия ударной волны. Было обнаружено, что на его поверхности образовался слой из диаплектического стекла — кварца с чрезвычайно сильно искаженной кристаллической решеткой.

Настоящая работа продолжает цикл этих исследований. В ней исследовано строение осколков и порошков гранитов, образовавшихся после воздействия ударной волны.

2. Объект и метод исследования

Образцы представляли собой параллелепипеды, выпиленные алмазной пилой из двух видов гранитов: плагриогранита и аляскита. Они содержали кристаллы кварца (30–40 vol.%) и два вида полевых шпатов: первый — плаггиоклаз, а второй — сандин. Образцы имели размеры $10 \times 10 \times 20$ мм. В их центре было просверлено отверстие диаметром ~ 1 мм, где располагались медные электроды, расстояние между которыми составляло ~ 4 мм. Блок-схема установки описана в [6]. При разряде между электродами образовалась плазма [9], состоявшая из микрочастиц и атомов Си. Она вызывала

появление ударной волны в образце кварца, которая распространялась со скоростью ~ 6 км/с [6]. Под действием волны через ~ 1 мкс из образца начинала вылетать струя плазмы, состоявшей из положительно заряженных ионов кремния, кислорода и электронов. Механизм ее образования описан в [8]. Одновременно образец распадался на осколки с размерами от нескольких микрометров до нескольких миллиметров.

Для исследования строения образцов гранитов до взрыва и их осколков после взрыва использовались методы инфракрасной (ИК), рамановской и фотолюминесцентной (ФЛ) спектроскопии.

ИК-спектры отражения записывались на Фурье-спектрометре IR-21 „Prestige“. Для записи спектров использовалась приставка SRM-8000A. Угол падения луча на образец составлял 10° .

Рамановские спектры записывались на спектрометре Ramalog-5. Их возбуждали аргоновым лазером Ar²⁺ 16508 (Spectra Physics), линия 514.5 нм. На поверхность образца, установленного на предметном столике, направлялся луч лазера, сфокусированный в пятно диаметром ~ 30 мкм. Рассеянный в обратном направлении луч света при помощи зеркала и фокусирующей оптической системы направлялся на входную щель монохроматора. Для более точного определения частот максимумов полос и их сдвигов одновременно с регистрацией спектров производилась запись линий лазера, положение которых использовалось в качестве репера.

Спектры ФЛ регистрировались под углом 10° к направлению луча импульсного лазера LGI-21, линия 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. Измеренная интенсивность полос нормировалась на интенсивность луча лазера, отраженного от поверхности.

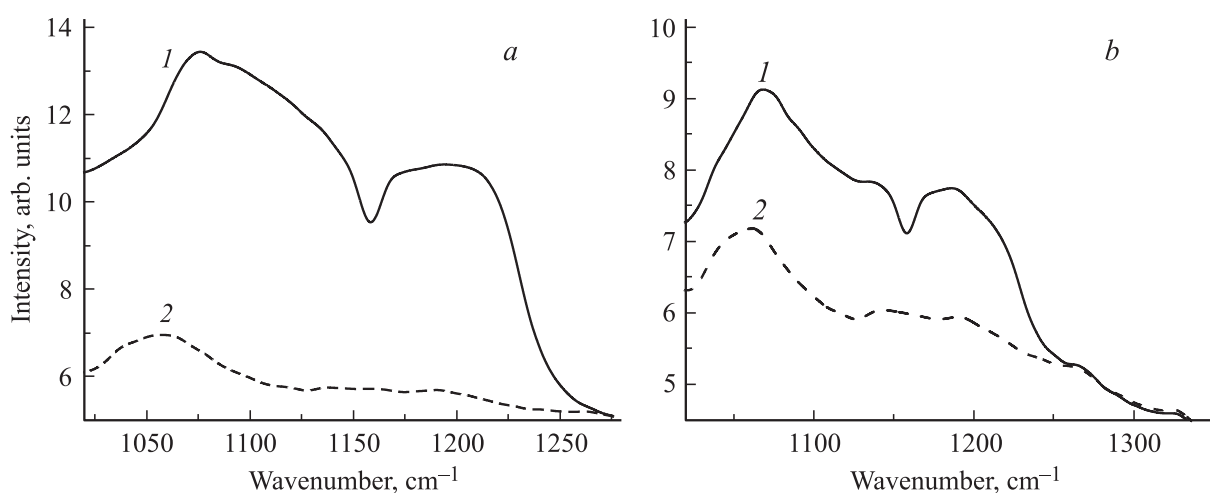


Рис. 1. Спектры отражения двух гранитов до взрыва (1) и их осколков после взрыва (2). *a* — плагиогранит, *b* — аляскит.

3. Результаты измерений и их обсуждение

3.1. Данные инфракрасной спектроскопии. На рис. 1 показаны фрагменты ИК-спектров отражения поверхности исходных образцов и осколков гранитов с линейными размерами $\sim 3 \times 4$ мм до и после воздействия ударной волны.

Напомним, что амплитуда колебаний электрического вектора ИК-излучения затухает экспоненциально от поверхности в глубь образца. Глубина h , на которой она уменьшается в $e \approx 2.7$ раза (e — основание натуральных логарифмов), а интенсивность излучений в $e^2 \approx 8$ раз, соответствует эффективной толщине поверхностного слоя, о которой несет информацию спектр отражения. Ее вычисляли по формуле [10]

$$h \approx 1/4\pi\nu k, \quad (1)$$

где k — показатель поглощения, а ν — частота излучения. Расчеты показали, что эффективная толщина поверхностного слоя составила ~ 0.1 – 0.2 мкм.

В спектрах наблюдаются два максимума, приписанные валентным колебаниям кристаллических решеток кварца и полевых шпатов (плагиоклаза и сандина) [11–14]. Видно, что интенсивность максимумов после воздействия ударной волны уменьшается в ~ 1.5 – 2 раза. Одновременно исчезает характерный минимум в области 1150 cm^{-1} . Это означает, что кристаллическая решетка кварца и полевых шпатов трансформируется в диаплектическое стекло — вещество с сильно искаженной кристаллической структурой [15–20].

3.2. Данные ФЛ-спектроскопии. На рис. 2 представлены спектры ФЛ исходных образцов и порошков с размерами зерен в несколько десятков микрометров. До воздействия ударной волны в спектрах обоих гранитов наблюдается две полосы: 2.44 и 2.84 eV. Первая приписа-

на электронному переходу в ионах Mn^{2+} , а вторая — в центрах $\text{Al-O}^- - \text{Al}$ [21]. Под влиянием ударной волны интенсивность полосы 2.84 eV уменьшается, т.е. уменьшается концентрация ионов $\text{Al-O}^- - \text{Al}$. Интенсивность второго максимума практически не изменяется, но его энергия уменьшается на ~ 0.3 eV, а ширина увеличивается. Согласно [22,23], эти изменения вызваны разрушением кристаллических решеток кварца и полевых шпатов и образованием вместо них диаплектических стекол.

3.3. Данные рамановской спектроскопии. На рис. 3 и 4 показаны рамановские спектры образцов до воздействия ударной волны и порошков с размерами зерен в несколько десятков микрометров, образовавшихся после ее воздействия.

Как уже отмечалось, диаметр луча лазера ~ 30 мкм, а линейные размеры кристаллов кварца и полевого шпата в первом образце составляют 2 – 5 нм, а во втором — 5 – 8 нм [24]. Это позволило получить спектры кварца и полевого шпата по отдельности. Такие спектры показаны на рис. 3 и 4 (кривые 1).

Полученный после воздействия ударной волны порошок сортировался по цвету на три фракции. Первая фракция — „белая“ — представляла собой зерна кварца, вторая — красная — зерна сандина, а третья — темно-серая — зерна плагиоклаза. Спектры порошков показаны на рис. 3 и 4 (кривые 2). Видно, что в спектрах образцов, повергнутых воздействию ударной волны, узкие полосы, приписанные колебаниям кристаллических решеток этих минералов, исчезают, а вместо них появляются широкие максимумы, соответствующие колебаниям диаплектических стекол [25,26].

Таким образом, все три метода спектроскопии показали, что под влиянием ударной волны кристаллическая структура кварца и полевых шпатов, входящих в состав гранитов, трансформируется в диаплектические стекла.

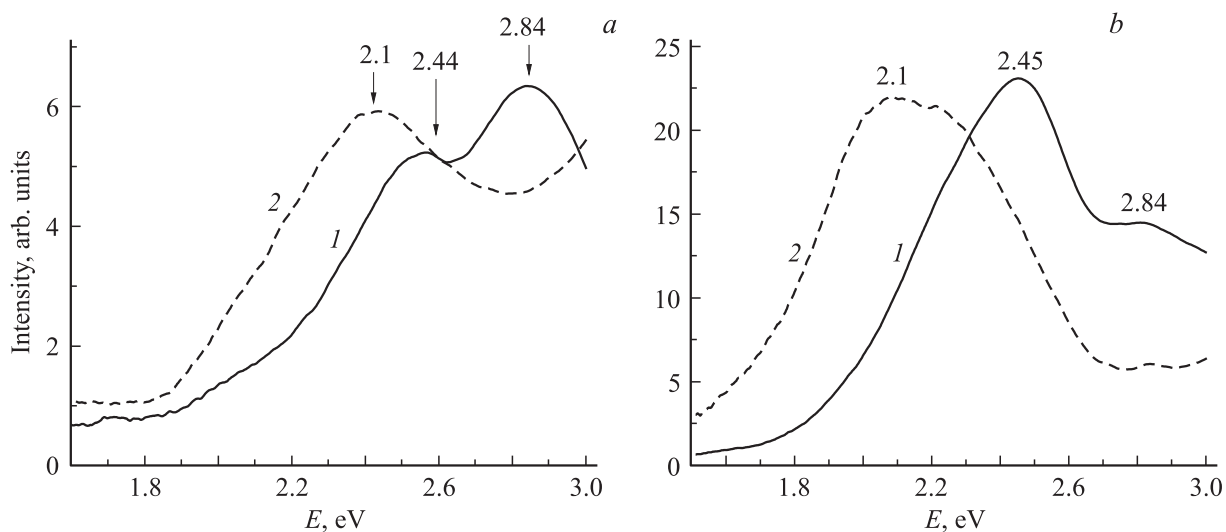


Рис. 2. Спектры ФЛ образцов гранитов (1) и образовавшихся из них после воздействия ударной волны порошков (2). *a* — плагиогранит, *b* — аляскит.

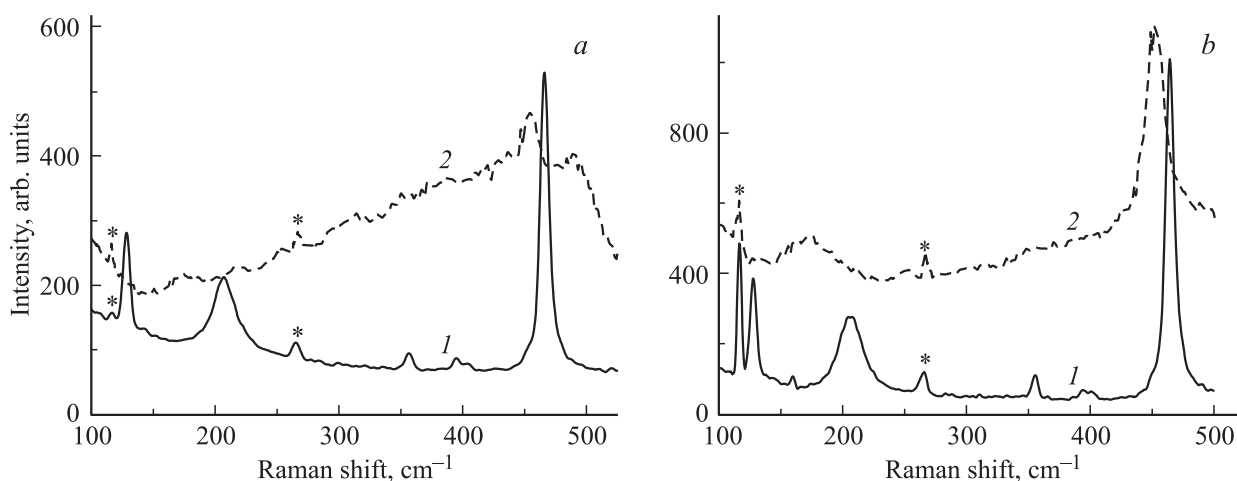


Рис. 3. Рамановские спектры кварца (1) в составе аляскита (*a*) и плагиогранита (*b*) и его порошка (2), образовавшегося под действием ударной волны. Звездочками отмечены линии излучения лазера.

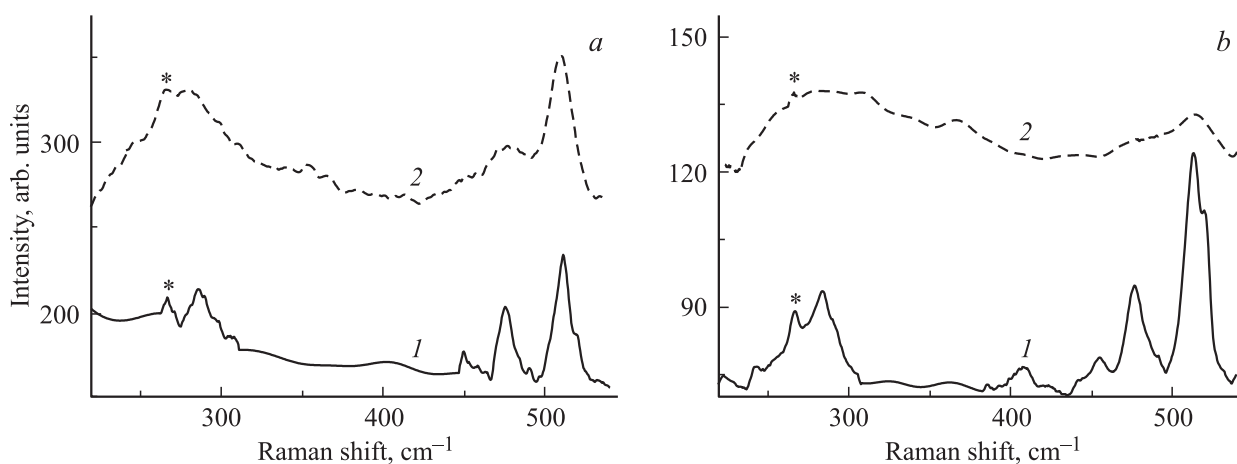


Рис. 4. Рамановские спектры сандина в аляските (*a*, кривая 1), плагиоклаза в плагиограните (*b*, кривая 1) и порошков этих шпатов (2), образовавшихся после воздействия ударной волны. Звездочками отмечены линии излучения лазера.

4. Заключение

Под влиянием ударной волны кристаллическая решетка кварца и полевых шпатов разрушается и вместо нее образуется диаплектическое стекло.

Список литературы

- [1] В.В. Адушкин, А.А. Спивак. Геомеханика крупномасштабных взрывов. Недра, М. (1993) 319 с.
- [2] G.I. Kanel, S.V. Razorenov, V.E. Fortov. Shock-Wave Phenomena and the Properties of Condensed Matter. Springer, N.Y. (2004) 322 p.
- [3] В.Е. Фортов. УФН **177**, 348 (2007).
- [4] Г.А. Малыгин, С.Л. Огарков, А.В. Андрияш. ФТТ **55**, 721 (2013); **57**, 1772 (2015).
- [5] В.И. Веттегрень, А.В. Воронин, В.С. Куксенко, Р.И. Мамалимов, И.П. Щербаков. ФТТ **56**, 315 (2014).
- [6] В.И. Веттегрень, И.П. Щербаков, А.В. Воронин, В.С. Куксенко, Р.И. Мамалимов. ФТТ **56**, 981 (2014).
- [7] В.И. Веттегрень, И.П. Щербаков, В.С. Куксенко, Р.И. Мамалимов. ФТТ **56**, 1767 (2014).
- [8] В.И. Веттегрень, В.С. Куксенко, И.П. Щербаков, Р.И. Мамалимов. ФТТ **57**, 2385 (2015).
- [9] К.Б. Абрамова, И.П. Щербаков, А.И. Русаков. ЖТФ **69**, 2, 137 (1999).
- [10] M. Born, E. Wolf. Principles of optics. 2nd ed. Pergamon press, Oxford (1964). 856 p.
- [11] M. Etchepare, L. Merian, J. Smetankine. J. Chem. Phys. **60**, 1873 (1974).
- [12] K. Iishi, H. Ymaguchi. Am. Mineral. **60**, 907 (1975).
- [13] S. Shimoda, J.E. Brydon. Clays Clay Minerals **19**, 61 (1971).
- [14] J.L. Bishop, M.D. Lane, M.D. Dyar, A.J. Brown. Clay Minerals **43**, 35 (2008).
- [15] J.L. Bishop, E. Murad. J. Raman Spectrosc. **35**, 480 (2004).
- [16] H. Schneider. Meteoritics. **13**, 2, 227 (1978).
- [17] F. Langenhorst. Bull. Czech Geolog. Survey. **77**, 265 (2002).
- [18] M. Chen, C. Koeberl, W. Xiao, X. Xie, D. Tan. Meteoritics Planetary Sci. **46**, 5, 729 (2011).
- [19] J.J. Wackerle. Appl. Phys. **33**, 922 (1962).
- [20] M.G.C.O. Goltrant, H. Leroux, J.-C. Doukhan, P. Cordier. Phys. Earth Planetary Interiors. **74**, 3–4, 219 (1992).
- [21] J. Gëtze, M. Plëtze, D. Habermann. Mineralogy Petrology **71**, 225 (2001).
- [22] D. Haymann, F. Hörz. Phys. Chem. Minerals **17**, 38 (1990).
- [23] M. Kayama, A. Gucsik, T. Nakazato, H. Nishido, K. Ninagwa. Antarctic Meteorites **XXXII**, 28 (2009).
- [24] В.И. Веттегрень, В.С. Куксенко, И.П. Щербаков. ФТТ **54**, 7, 1342, (2012).
- [25] P.F. McMillan, G.H. Wolf. Phys. Chem. Minerals **19**, 71 (1992).
- [26] D. Heymann, F. Horz. Phys. Chem. Minerals **17**, 38 (1990).