

07

## Наносекундная динамика разрушения гетерогенного твердого тела (гранита) при ударе по его поверхности

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

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

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

(Поступила в Редакцию 26 апреля 2016 г.)

С временным разрешением 2 ns проведены исследования динамики образования микротрещин и деформации поверхности образца гранита под влиянием удара бойком по его поверхности. Удар вызывает появление собственных колебаний образца, которые приводят к образованию кластеров из микротрещин с линейными размерами от  $\sim 2$  до  $\sim 10 \mu\text{m}$  в зернах полевого шпата. Образование микротрещин в свою очередь вызывает появление собственных колебаний зерен.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-05-00138 а).

### 1. Введение

Метод флуоресценции (FL), позволяющий исследовать образование возбужденных свободных радикалов и ионов при разрыве химических связей, используется для изучения механизма разрушения кварца и гранитов уже более 30 лет [1–10]. Ранее в спектрах FL гранитов при их разрушении наблюдалась полоса 1.9 eV, соответствующая возбужденным свободным радикалам  $\text{SiO}^*$  [8–10]. Радикалы образуются при разрыве связей Si–O–Si в кристаллических решетках кварца и полевых шпатов, входящих в состав гранитов.

В работах [6–10] были проведены исследования временных зависимостей интенсивности FL (с временным разрешением 10 ns), возникающей при ударе бойком по образцам кварца и гранитов. Оказалось, что она имеет вид отдельных вспышек длительностью  $\sim 30$  ns. Было сделано предположение, что каждая из таких вспышек соответствует рождению микротрещины. По интенсивности вспышек и скорости распространения упругих волн оценен средний размер микротрещин. Как оказалось, он лежит в пределах от 8 до  $40 \mu\text{m}$  [7–10]. Микротрещины такого размера были действительно обнаружены на поверхности гранитов методом оптической микроскопии.

Однако из литературы [11] известно, что время жизни свободных радикалов обычно составляет несколько наносекунд. Поэтому часть из них успевала „погибнуть“ за время регистрации вспышек (10 ns), что могло повлиять на форму и интенсивность вспышек, а значит, привести к некорректной оценке размеров микротрещин. В настоящей работе описаны результаты исследований динамики FL и деформации образца с помощью новой установки, временное разрешение которой составляет 2 ns. Это позволило, как показано далее, обнаружить новые детали динамики образования

микротрещин и деформации гранита при ударе по его поверхности.

### 2. Методика эксперимента

Для исследования был выбран образец гранита, содержащий  $\sim 30$  vol.% зерен кварца и  $\sim 70$  vol.% полевых шпатов. Образцы имели вид кубов с полированными гранями и размером ребер  $\sim 11 \times 11 \times 11$  см. Размеры зерен полевого шпата и кварца были измерены при помощи оптического микроскопа. Оказалось, что они составляют от 0.4 до  $\sim 1.4$  mm.

Конструкция установки, использованной для исследования динамики FL и волн деформации при ударе, описана в [8]. В новой установке вместо аналогового преобразователя ASK-3106 использовался преобразователь ADS-3112, что позволило изменить временное разрешение регистрирующей системы в 5 раз (с 10 до 2 ns).

Волны деформации и FL возбуждались ударом груза массой 50 g, падающего с высоты  $\sim 10$  cm на стальной боек. Боек представлял собой стальной стержень, вершина которого имела радиус закругления  $\sim 1$  mm. Известно, что прочность зерен полевого шпата значительно меньше, чем кварца, и при ударе в них в первую очередь зарождаются микротрещины [7]. Поэтому боек устанавливался так, чтобы его вершина располагалась на одном из зерен полевого шпата. Возникающее излучение при помощи фоконя фокусировалось на поверхность катода фотоэлектронного умножителя РЕМ-136. Для измерения профиля и скорости  $S$  распространения механического импульса, вызванного ударом, на поверхность на расстоянии 5 mm от места расположения бойка устанавливалась квадратная пластина из пьезокерамики СТС-19. Длина ребер пластины составляла 4 mm, а толщина — 1 mm. Величины напряжений на выходе РЕМ-136 и

пьезокерамики после оцифровки записывалась в память компьютера.

### 3. Динамика микротрещин после удара

Временные зависимости интенсивности FL и деформации поверхности гранита показаны на рис. 1.

Как уже упоминалось, расстояние от места расположения вершины бойка до центра пластины из пьезокерамики CTS-19 составляет 5 mm. Скорость пробега волны деформации в граните  $S \approx 1 \text{ km/s}$  [8–10], и это расстояние она пробегает за  $5 \mu\text{s}$ . Поэтому для удобства сравнения с временной зависимостью FL начало временной зависимости деформации на рис. 1 было смещено в сторону низких времен на  $5 \mu\text{s}$ .

Первая вспышка FL появляется в момент времени  $148.8 \mu\text{s}$ , вслед за ней наблюдаются еще две вспышки.

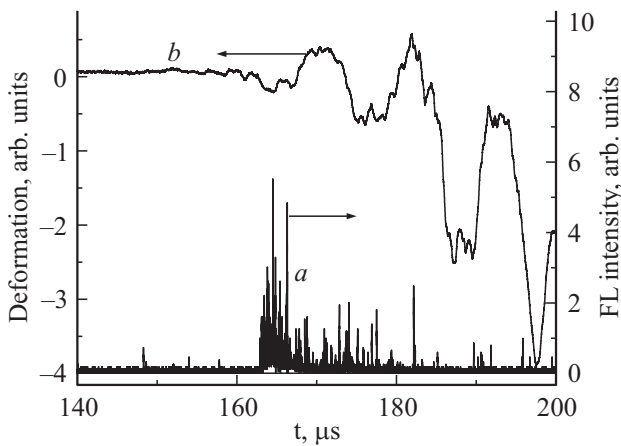


Рис. 1. Временные зависимости интенсивности FL (a) и деформации поверхности (b) образца гранита.

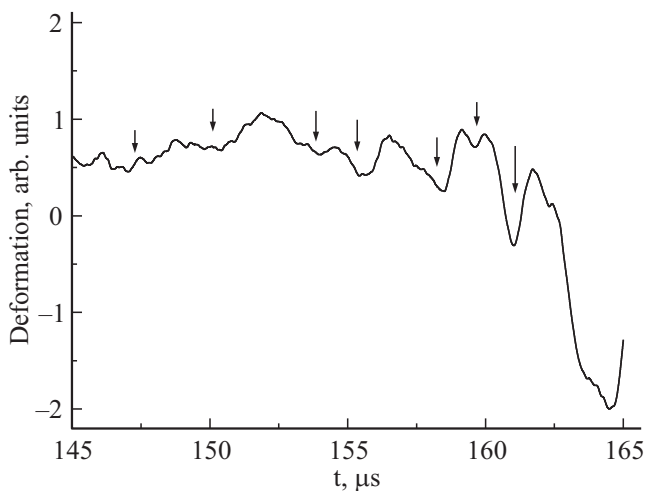


Рис. 2. Фрагмент временной зависимости деформации поверхности гранита. Стрелками показаны минимумы слабоинтенсивных волн деформации.

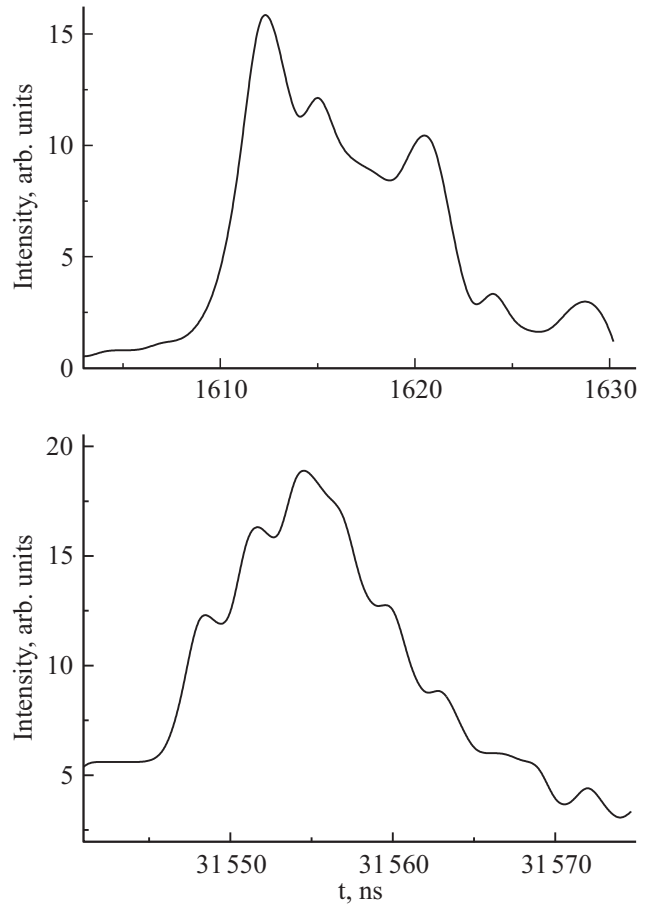


Рис. 3. Форма двух случайно выбранных вспышек.

В эти же моменты времени на временной зависимости деформации появляются слабоинтенсивные волны (рис. 2).

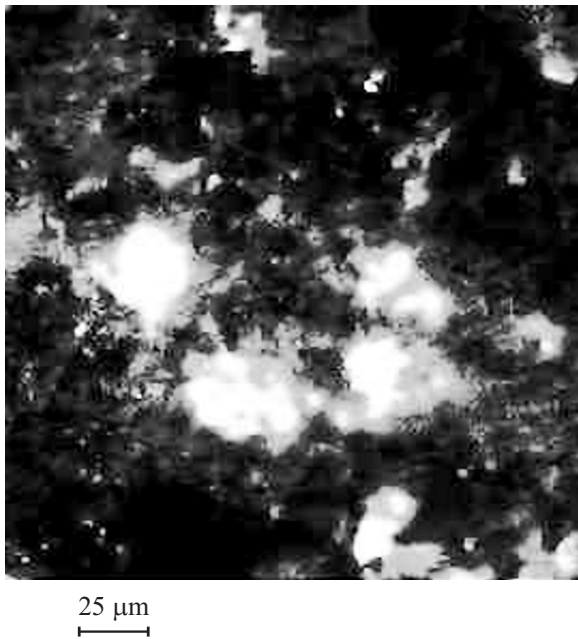
В момент времени  $\sim 162.9 \mu\text{s}$  образуется мощная волна деформации: поверхность образца начинает вспучиваться и растягиваться (кривая *b* на рис. 1). Одновременно интенсивность и число вспышек резко увеличиваются. Как показано в [8,10], FL возникает при релаксации электронного возбуждения свободных радикалов  $\text{SiO}^*$ . Эти радикалы образуются после разрыва связей  $\text{Si-O-Si}$  в полевоом шпате. По-видимому, именно вспучивание поверхности вызывает резкое увеличение числа разрывов связей  $\text{Si-O-Si}$ .

Еще через  $\sim 11 \mu\text{s}$  поверхность сжимается. Это приводит к уменьшению интенсивности вспышек в  $\sim 2$  раза. Но процесс их образования продолжается.

Новое растяжение поверхности через  $\sim 11 \mu\text{s}$  приводит к небольшому (на 20–50%) увеличению интенсивности вспышек.

При последующих растяжениях и сжатиях поверхности число и интенсивность вспышек уменьшаются, и к  $\sim 200 \mu\text{s}$  процесс появления новых вспышек заканчивается.

Таким образом, весь процесс накопления разрывов связей  $\text{Si-O-Si}$  занимает  $\sim 50 \mu\text{s}$ .



**Рис. 4.** Микротрещины в зерне полевого шпата, образовавшиеся после удара по нему бойком.

Рассмотрим теперь форму вспышек (рис. 3). Видно, что они состоят из нескольких (6–10) максимумов, наложенных друг на друга. Время возгорания  $t_h$  вспышек изменяется от  $\sim 2$  до  $\sim 20$  ns.

Предположим, что каждый максимум соответствует рождению микротрещины, и оценим ее размеры  $l$ . Скорость роста микротрещин задана скоростью пробега волн деформации в граните ( $\sim 1$  km/s) [8–10]. Тогда за 2–20 ns трещины должны достигать размера 2–20  $\mu\text{m}$ .

Микротрещины можно наблюдать при помощи оптического микроскопа. Для примера на рис. 4 показана фотография поверхности зерна полевого шпата на поверхности гранита после удара по нему бойком. Белые пятна — микротрещины. Их поверхности приблизительно параллельны поверхности образца. Поэтому они эффективно рассеивают свет и выглядят как белые пятна. Из приведенной выше фотографии следует, что размеры микротрещин варьируются от  $\sim 1$  до  $\sim 20$   $\mu\text{m}$ . Это хорошо согласуется с приведенной выше оценкой размера по временной зависимости FL.

Кроме того, из анализа временной зависимости интенсивности FL (зависимость  $a$  на рис. 2) следует, что микротрещины рождаются кластерами по 4–10 штук. Это заключение согласуется с результатами анализа фотографий поверхности гранита после удара. Действительно, из рассмотрения рис. 4 следует, что микротрещины образуют кластеры из нескольких микротрещин.

Таким образом, изменение разрешения установки от 10 до 2 ns позволило выявить следующее: то, что ранее воспринималось как отдельные микротрещины, представляет собой кластеры из них. Линейные размеры

кластеров ( $\sim 30$ – $40$   $\mu\text{m}$ ) на два порядка меньше размеров зерен полевого шпата. Природа кластеризации неясна. По-видимому, внутри полевого шпата содержатся сильно неупорядоченные области размерами в несколько десятков микрометров, в которых и рождаются микротрещины.

Рассмотрим теперь временную зависимость деформации.

#### 4. Временная зависимость деформации

Зависимость деформации поверхности от времени представляет собой интенсивную волну, на которую накладывается набор слабоинтенсивных волн растяжения-сжатия поверхности (рис. 1 и 2).

Интенсивная волна начинает формироваться в момент времени  $\sim 162.9$   $\mu\text{s}$  (кривая  $b$  на рис. 1). Ее период  $\tau_s$  составляет  $\sim 23$   $\mu\text{s}$ , а амплитуда со временем растет.

Слабоинтенсивные волны, как уже упоминалось, появляются в момент образования первой вспышки FL. Их период составляет 0.8–1.4  $\mu\text{s}$  (рис. 1).

Выясним природу этих волн.

Длина волны  $\lambda$  собственных колебаний образца приблизительно в 2 раза больше его размера  $L = \lambda/2 = S\tau_s/2$ . Умножая скорость пробега волн деформации  $S = 1$  km/s на время полупериода первой волны, мы нашли  $L \approx 11$  mm, что совпадает с размерами образцов гранита. Это означает, что интенсивные колебания представляют собой собственные колебания образцов.

Точно так же, умножая скорость пробега волн деформации на время полупериодов слабоинтенсивных волн  $\tau_g/2$ , мы получили набор величин от 0.4 до 1.4 mm. Такие же размеры (0.4–1.4 mm) имеют зерна полевого шпата (см. выше). Следовательно, слабоинтенсивные колебания представляют собой собственные колебания зерен полевого шпата. Обращает на себя внимание то, что эти колебания появляются в момент возникновения первых микротрещин, т. е. уже при  $t \approx 148$   $\mu\text{s}$ . По-видимому, именно образование микротрещин вызывает собственные колебания зерен полевого шпата.

Таким образом, удар по поверхности образца гранита вызывает его собственные колебания. При таких колебаниях в кристаллической решетке полевого шпата образуются микротрещины. В свою очередь образование микротрещин вызывает собственные колебания зерен полевого шпата.

#### 5. Заключение

Удар стальным бойком по поверхности гранита приводит к появлению собственных колебаний образца и формированию в нем кластеров, содержащих от четырех до десяти микротрещин. Микротрещины образуются внутри зерен полевого шпата, что вызывает появление собственных колебаний зерен.

**Список литературы**

- [1] G.N. Chapman, A.J. Walton. *J. Appl. Phys.* **54**, 5961 (1983).
- [2] А.Н. Стрелецкий, А.Б. Пакович, И.Ю. Бутягин. *Изв. АН СССР. Сер. хим.* **50**, 477 (1986).
- [3] Y. Kawaguchi. *Phys. Rev. B* **52**, 9224 (1995).
- [4] Y. Kawaguchi. *Phys. Rev. B* **54**, 9721 (1996).
- [5] Y. Kawaguchi. *Jpn. J. Appl. Phys.* **37**, 1892 (1998).
- [6] В.И. Веттегрень, А.Я. Башкарев, Р.И. Мамалимов, И.П. Щербаков. *ФТТ* **50**, 29 (2008).
- [7] В.И. Веттегрень, В.С. Куксенко, И.П. Щербаков. *ЖТФ* **81**, 4, 148 (2011).
- [8] В.И. Веттегрень, В.С. Куксенко, И.П. Щербаков. *ФТТ* **54**, 1342 (2012).
- [9] В.И. Веттегрень, В.С. Куксенко, Р.И. Мамалимов, И.П. Щербаков. *Физика Земли* **5**, 58 (2012).
- [10] В.И. Веттегрень, В.С. Куксенко, И.П. Щербаков. *Физика Земли* **4**, 1 (2016).
- [11] N.J. Turro. *Modern molecular photochemistry*. University Science Book, N.Y. (1991). 628 p.