

05

## Иницированная ударной волной эмиссия ионов из напряженных гранитов

© И.П. Щербаков, В.И. Веттегрень,<sup>†</sup> Р.И. Мамалимов, Х.Ф. Махмудов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>†</sup> e-mail: Victor.Vettegren@mail.ioffe.ru

(Поступило в редакцию 1 февраля 2018 г.)

Получены распределения по интенсивности пучков положительно заряженных ионов, вылетающих с поверхности одноосно сжатых гранитов под влиянием ударной волны. Интенсивность пучков экспоненциально уменьшается при увеличении их числа. Ионы вылетают в моменты выхода на поверхность дислокаций,двигающихся в пересекающихся плоскостях скольжения. Сжимающая нагрузка подавляет процесс выхода дислокаций и интенсивность пучков ионов.

DOI: 10.21883/JTF.2019.03.47228.48-18

### Введение

В последние годы нами были начаты экспериментальные исследования механизма и динамики разрушения с наносекундным разрешением ненагруженных и одноосно сжатых горных пород под воздействием ударных волн [1–8]. Интерес к этой проблеме вызван тем, что скорость ударной волны в несколько раз больше скорости поперечной звуковой волны  $S$ , а разрушение путем образования и накопления трещин может происходить только со скоростью не больше, чем  $\sim (1/3)S$  [9]. В наших исследованиях было установлено [1–8], что кристаллические решетки кварца и полевых шпатов, входящих в состав гранитов, под воздействием ударных волн разрушаются не путем образования и накопления микротрещин, а испарением положительно заряженных ионов.

В работе [10] был предложен следующий механизм эмиссии ионов под воздействием слабых (энергия несколько десятых J) ударных волн. Известно [11], что при взаимодействии дислокаций, движущихся в пересекающихся плоскостях скольжения, возникают сильные искажения кристаллической решетки. Они могут вызывать переходы между уровнями основного и возбужденного электронных состояний, распад межатомных связей и вылет положительно заряженных ионов. Ударная волна „выносит“ искаженные участки кристаллических решеток на поверхность, что и приводит к вылету пучков возбужденных ионов из образца. Эти ионы находятся в электронно-возбужденном состоянии, и при переходе в основное состояние излучают свет в видимой области спектра, т. е. возникает люминесценция.

В предыдущем исследовании было установлено, что при одноосном сжатии интенсивность струй ионов уменьшается. Цель настоящей работы — детальное исследование влияния сжимающего напряжения на эмиссию ионов из гранитов, концентрация кварца в которых изменялась от 0 до 35–40%.

### Объект и метод исследования

Для исследований были использованы граниты трех видов: аляскит, плагиогранит и габбро-диабаз. Аляскит и плагиогранит содержали  $\sim 35$ – $40\%$  зерен кварца и  $\sim 50$ – $60\%$  зерен плагиоклаза. Средний размер зерен в аляските составлял  $\sim 7$  mm, а в плагиограните —  $\sim 4$  mm. Габбро-диабаз содержал только плагиоклаз ( $\sim 60\%$ ) и пироксен ( $\sim 30\%$ ) с размерами зерен обеих минералов  $\sim 2$  mm.

Из гранитов были выпилены образцы в виде параллелепипедов с размерами ребер  $4 \times 4 \times 6$  cm. Внутри них был вырезан паз, в который были вставлены медные электроды, присоединенные к конденсатору. При разряде конденсатора между электродами возникала дуга. Энергия разряда составляла  $\sim 0.2$  J, а мощность —  $2 \cdot 10^5$  W. Разряд вызывал появление ударной волны в воздухе и вслед за ней — в образце [12]. Когда она достигала поверхности образца, возникала люминесценция. Для ее регистрации перед поверхностью образцов

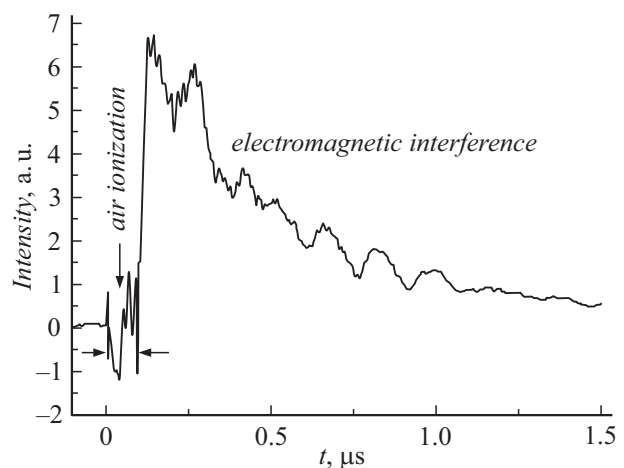
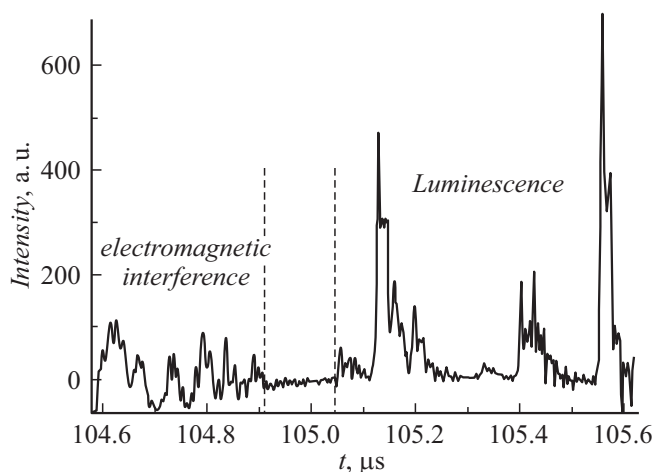


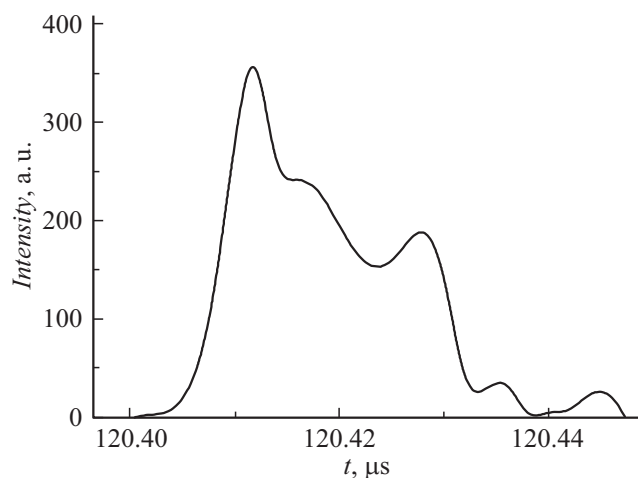
Рис. 1. Временная зависимость электромагнитных помех, вызванных горением дуги.

устанавливали один из концов кварцевого световода, а его второй конец располагали перед поверхностью фотокатода фотоэлектронного умножителя PMT-136. Напряжение на выходе PMT подавали на вход аналогового цифрового преобразователя ADS-3112 и через каждые 2 ns записывали в память компьютера для дальнейшего анализа и обработки (схема установки приведена в работе [8]).

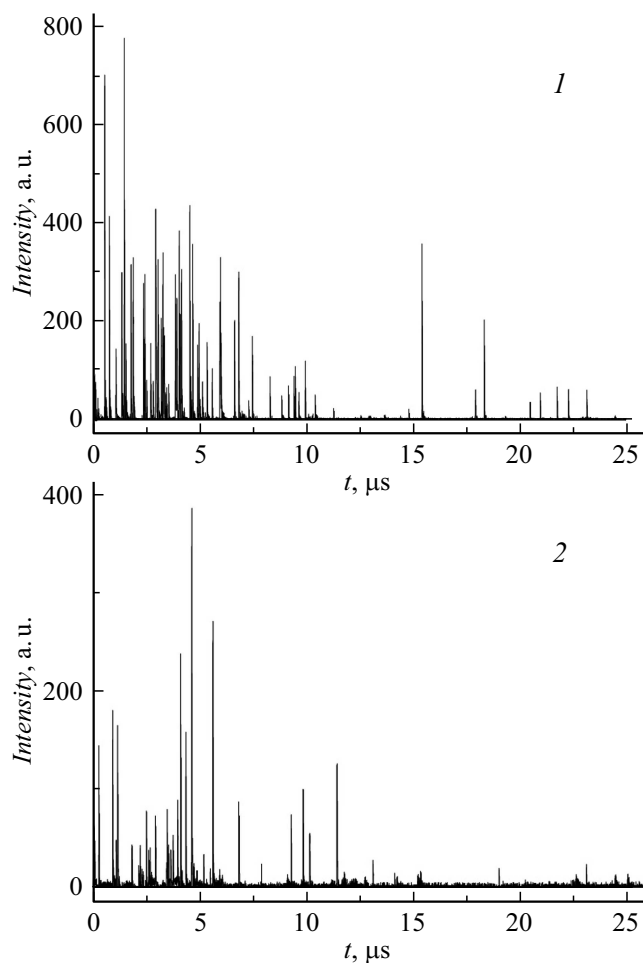
Для сжатия образцов использовали пресс PGDR. Величину сжимающего напряжения изменяли ступенчато — через (0.5–1.0) МПа. Разрушающее напряжение  $P_f$  составило: для плагиогранита  $\sim 250$  МПа, аляскита  $\sim 160$  МПа и габбро-диабазы 320 МПа. После приложения заданного напряжения через образец пропускали ударную волну и записывали временную зависимость интенсивности люминесценции.



**Рис. 2.** Фрагмент временной зависимости напряжения на входе ADS, иллюстрирующий появление сигналов люминесценции. Слева от — осцилляции, вызванные горением дуги, справа — первые сигналы с выхода PMT после падения на его поверхность фотонов от положительно заряженных ионов.



**Рис. 3.** Сигнал на выходе PMT после падения на него пучка фотонов, излученных ионами, вылетевшими из габбро-диабазы под действием ударной волны.



**Рис. 4.** Временные зависимости интенсивности люминесценции ненагруженного (1) и сжатого (2) образцов габбро-диабазы (давление — 190 МПа = 0.6  $P_f$ ).

## Временные зависимости люминесценции гранитов

После замыкания пластин конденсатора происходила ионизация молекул воздуха, и возникал пробой промежутка между электродами (рис. 1) [12]. Еще через  $\sim 0.3 \mu\text{s}$  загоралась дуга. Ее появление приводило к мощным помехам (рис. 1). Через  $\sim 2 \mu\text{s}$  дуга гасла, и интенсивность помех уменьшалась на 2–3 порядка. Еще через 0.1–0.2  $\mu\text{s}$  появлялись сигналы люминесценции, возникающей при вылете ионов с поверхности исследованных образцов (рис. 2). Они имели одинаковый вид (рис. 3), отражающий особенности конструкции приемника излучения PMT-136. Отметим, что появление всплесков такого вида позволило зафиксировать момент начала люминесценции образцов.

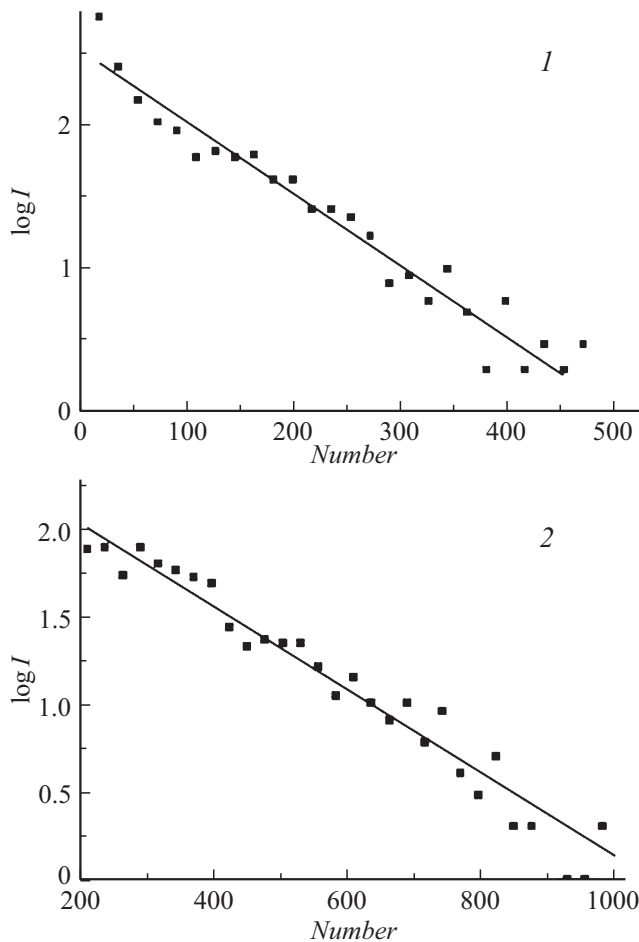
Временная зависимость интенсивности сигналов люминесценции представляет собой набор всплесков, интенсивность которых изменяется приблизительно на порядок (рис. 4). Интервал между сигналами изменялся от  $\sim 0.05$  до  $0.8 \mu\text{s}$ , а их интенсивность — на порядок.

Такие же временные зависимости были получены ранее для плаггиогранита и аляскита [8].

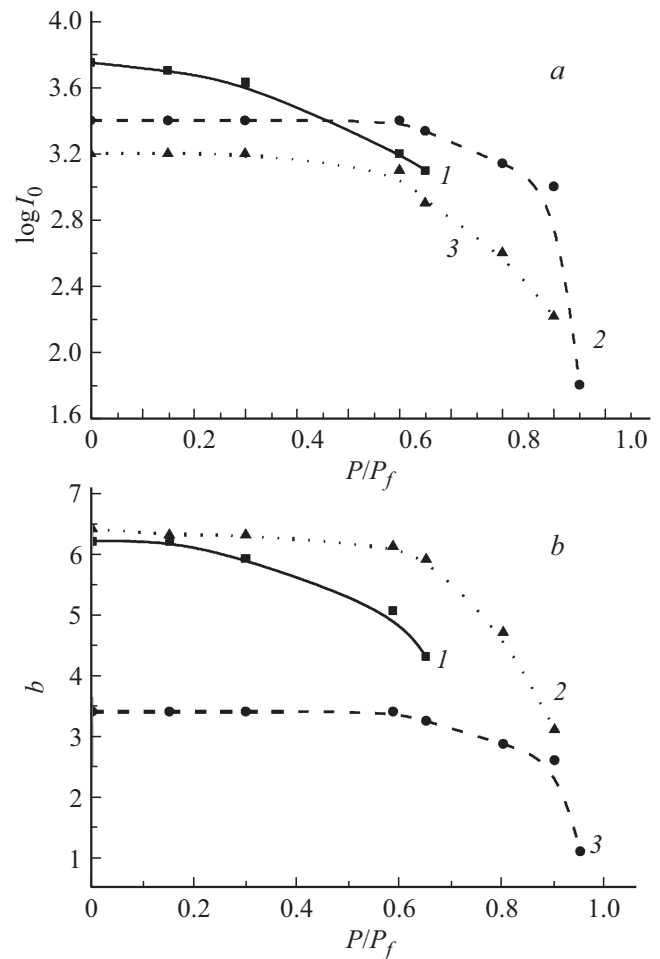
На рис. 5 показаны распределения интенсивностей  $I$  струй ионов из ненапряженных и одноосно сжатых образцов габбро-диабазы и плаггиогранита. Они имеют вид  $I = I_0 \exp(-bN)$ , где  $N$  — число вспышек,  $I_0$  — значение  $I$  при  $N \rightarrow 0$ . Это распределение оказалось справедливым как для всех ненагруженных, так и нагруженных образцов всех исследованных гранитов.

Оказалось, что при одноосном сжатии параметры  $I_0$  и  $b$  уменьшаются (рис. 6). Этот результат может быть объяснен действием двух механизмов. Как уже упоминалось выше, возбужденные ионы вылетают из мест столкновения дислокаций, движущихся в пересекающихся плоскостях скольжения. Сжатие образца может препятствовать движению и пересечению дислокаций. В работе Г.И. Малыгина [13] был предложен другой механизм. А именно, автор теоретически показал, что высокое давление может способствовать аннигиляции дислокаций и тем самым вызывать уменьшение вышеупомянутых параметров.

Отметим, что на зависимость параметров  $I_0$  и  $b$  от давления влияет структура горных пород, а именно,



**Рис. 5.** Распределения интенсивностей пучков фотонов, излученных ионами, вылетевшими с поверхности ненагруженных образцов габбро-диабазы (1) и плаггиогранита (2).



**Рис. 6.** Зависимости  $\text{Lg}I_0$  (a) и константы  $b$  (b) от давления: 1 — габбро-диабаз; 2 — плаггиогранит; 3 — аляскит.

наличие в них кристаллов кварца. Так, для габбро-диабазы, который не содержит кристаллов кварца, эти параметры начинают уменьшаться уже при  $P > 0.15P_f$ , а для плаггиогранита и аляскита, содержащих ( $\sim 35-40\%$ ) кварца, — только при  $P > 0.7P_f$ . По-видимому, кристаллы кварца препятствуют выносу на поверхность областей пересечения дислокаций.

## Заключение

Под влиянием ударной волны на поверхность гранитов выходят дислокации,двигающиеся в пересекающихся плоскостях скольжения. Кристаллическая решетка в областях пересечения плоскостей сильно искажена. Поэтому ударная волна вызывает испарение положительно заряженных ионов из таких областей. Одноосное сжатие образцов уменьшает концентрацию дислокаций, выходящих на поверхность.

Авторы выражают благодарность А.Г. Кадомцеву и Г.И. Малыгину за плодотворное обсуждение настоящей работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-05-00138).

## Список литературы

- [1] Веттегрень В.И., Воронин А.В., Куксенко В.С., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П. // ФТТ. 2014. Т. 56. Вып. 2. С. 315–317. [V.I. Vettegren, A.V. Voronin, V.S. Kuksenko, R.I. Mamalimov, I.P. Shcherbakov. // Phys. Solid State. 2014. Vol. 56. N 2. P. 317–320.] DOI: 10.1134/S1063783414020322
- [2] Веттегрень В.И., Щербаков И.П., Воронин А.В., Куксенко В.С., Мамалимов Р.И. // ФТТ. 2014. Т. 56. Вып. 5. С. 981–985. [Vettegren V.I., Shcherbakov I.P., Voronin A.V., Kuksenko V.S., Mamalimov R.I. // Phys. Solid State. 2014. Vol. 56. N 5. P. 1018–1022] DOI: 10.1134/S1063783414050321
- [3] Веттегрень В.И., Щербаков И.П., Куксенко В.С., Мамалимов Р.И. // ФТТ. 2014. Т. 56. Вып. 9. С. 1767–1771. [Vettegren V.I., Shcherbakov I.P., Kuksenko V.S., Mamalimov R.I. // Phys. Solid State. 2014. Vol. 56. N 9. P. 1828–1832.] DOI: 10.1134/S1063783414090303
- [4] Веттегрень В.И., Куксенко В.С., Щербаков И.П. // Физика Земли. 2016. № 5. С. 134–149. [Vettegren V.I., Kuksenko V.S., Shcherbakov I.P. // Izvestiya. Phys. Solid Earth. 2016. Vol. 52. N 5. P. 754–769.] DOI: 10.1134/S106935131604011X
- [5] Щербаков И.П., Веттегрень В.И., Мамалимов Р.И., Махмудов Х. // ФТТ. 2017. Т. 59. Вып. 3. С. 556–558. Shcherbakov I.P., Vettegren V.I., Mamalimov R.I., Makhmudov Kh.F. // Phys. Solid State. 2017. Vol. 59. N 3. P. 575–577.] DOI: 10.1134/S1063783417030295
- [6] Щербаков И.П., Веттегрень В.И., Мамалимов Р.И., Махмудов Х. // ЖТФ. 2017. Т. 87. Вып. 8. С. 1182–1184. [Shcherbakov I.P., Vettegren V.I., Mamalimov R.I., Makhmudov Kh.F. // Techn. Phys. 2017. Vol. 62. N 8. P. 1194–1196.] DOI: 10.1134/S1063784217080242
- [7] Щербаков И.П., Веттегрень В.И., Мамалимов Р.И., Махмудов Х. // ЖТФ. 2017. Т. 87. Вып. 10. С. 1527–1531. [Shcherbakov I.P., Vettegren V.I., Mamalimov R.I., Makhmudov Kh.F. // Techn. Phys. 2017. Vol. 62. N 10. P. 1533–1537.] DOI: 10.1134/S1063784217100218
- [8] Щербаков И.П., Веттегрень В.И., Мамалимов Р.И., Махмудов Х. // ЖТФ. 2018. Т. 88. Вып. 7. С. 1009–1013. [Shcherbakov I.P., Vettegren V.I., Mamalimov R.I., Makhmudov Kh.F. // Techn. Phys. 2017. Vol. 88. N 7. P. 979–983.] DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/S1063784218070265>
- [9] Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.
- [10] Zakrevskii V.A., Shuldiner A.V. // Phil. Mag. B. 1995. Vol. 71. N 2. P. 127–138. doi.org/10.1080/01418639508240301
- [11] Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. М.: Металлургия, 1984. 280 с.
- [12] Абрамова К.Б., Щербаков И.П., Русаков А.И. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 2. С. 137–140. [Abramova K.B., Shcherbakov I.P., Rusakov A.I. // Techn. Phys. 1999. Vol. 44. N 2. P. 259–261.] DOI: 10.1134/1.1259298
- [13] Малыгин Г.А. // ФТТ. 1992. Т. 34. Вып. 10. С. 3200–3211. [Malygin G.A. // Phys. Solid State. 1992. Vol. 34. N 10. P. 1712–1723.]