

УДК 539.4

РАЗРУШЕНИЕ КВАРЦЕВОГО ДИОРИТА ПРИ ТРЕНИИ

© 2020 г. В.И. Веттегрень^{1,2}, А.В. Пономарев¹, В.Б. Кулик²,
Р.И. Мамалимов^{1,2}, И.П. Щербаков²

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

С использованием методов фрактолюминесцентной (с временным разрешением 2 нс), фотолюминесцентной и рамановской спектроскопии получены сведения о строении и эволюции дефектов, образующихся на поверхности нанотрещин в кристаллах низкого альбита и кварца при трении лейкократового кварцевого диорита. До трения порода содержала 60–70 % низкого альбита и 15–20 % кварца при размерах кристаллов от ≈ 100 до 800 мкм. После трения примерно в течение 1 мс размеры кристаллов уменьшились до 1–3 мкм. Концентрация кристаллов кварца уменьшилась на порядок, а низкого альбита – примерно в три раза. В оставшихся после разрушения кристаллах кварца и низкого альбита концентрация дефектов ионов Fe^{3+} и радикалов $\equiv\text{Si-O}\bullet$ увеличилась на порядок. При разрушении кристаллов образуются кластеры из четырех трещин с размерами в несколько нанометров. Средняя величина временного интервала между появлением двух следующих друг за другом кластеров составляет около 60 нс. Нанотрещины в кластерах формируются друг за другом с интервалом 7–10 нс. Предполагается, что трещины образуются при прорыве дислокациями барьеров, возникающих при пересечении плоскостей скольжения. Определены скорость роста и размеры нанотрещин; изучена динамика их накопления. Первая трещина является самой крупной – в кристаллах низкого альбита площадь ее берегов составляет $\approx 36 \text{ нм}^2$; площадь берегов последующих трещин – $\approx 18 \text{ нм}^2$. В кристаллах кварца размер площади поверхности берегов трещин в три раза меньше – $\approx 10 \text{ нм}^2$. Известный в сейсмологии закон Гутенберга–Рихтера, связывающий число очагов разрушения с энергией их образования, выполняется и для нанотрещин в низком альбите.

Ключевые слова: трение, разрушение, кварц, низкий альбит, нанотрещины.

Введение

В основе явления разрушения твердых тел под влиянием механических напряжений лежит процесс образования, накопления, объединения и роста трещин. Этот процесс начинается с образования самых “мелких” – “первичных” трещин, размеры которых составляют несколько нанометров и всего на два-три порядка больше размеров кристаллических ячеек. В кристаллах металлов такие трещины образуются при прорывах барьеров, препятствующих движению линейных дефектов – дислокаций [Орлов, 1983; Владимиров, 1984].

Экспериментальные исследования методами рассеяния рентгеновских лучей, электронной микроскопии и ряда других позволили обнаружить трещины в металлах, которые имеют размеры от десятых долей до нескольких микрон [Регель, Слуцкер, Томашевский, 1974; Бетехтин, Кадомцев, 2005; Журков, Куксенко, Петров, 1981; Martelli, Smith, Woodward, 1989; Черемской, Слезов, Бетехтин, 1990; Петров, Башкарев, Веттегрень, 1993; Gottstein, 2004].

Изучение трещин в горных породах в основном проводилось методом акустической эмиссии [Журков, Куксенко, Петров, 1981; Соболев, Пономарев, 2003; Lockner et al., 1992; Lei, Ma, 2014; Смирнов и др., 2019], позволяющим получить информацию о трещинах, размеры которых сравнимы с длиной акустических волн (от нескольких

сотен микрон до сантиметров). До недавнего времени “первичные” трещины в кристаллах минералов горных пород экспериментально не обнаруживались. С учетом малых размеров “первичных” трещин (нанометры) их образование и рост должны протекать в течение нескольких наносекунд, что ранее невозможно было зафиксировать. Решение этой задачи стало возможным с появлением метода фрактोलюминесценции, который позволяет проследить за возникновением свободных радикалов и ионов, образующихся на поверхностях нанотрещин с временным разрешением от 1 до 2 нс [Веттегрень и др., 2017а,б,в, 2018, 2019а,б, 2020а,б]. Данный метод основан на регистрации импульсов света, возникающих при разрывах химических связей в процессе разрушения. Продукты разрыва в первые несколько наносекунд находятся в возбужденном электронном состоянии, а затем переходят в основное состояние. Энергия возбуждения выделяется в виде сигналов фрактोलюминесценции. Отметим, что в первых исследованиях [Веттегрень и др., 2017а,б, 2018, 2019а,б] предполагалось, что скорость роста “первичных” трещин составляет приблизительно одну треть скорости звука. В рамках такого предположения размеры трещин оценивались в несколько микрон. Однако последующие исследования образования трещин в макрокристаллах кремния и кварца [Веттегрень и др., 2020а,б,в] показали, что указанное выше предположение противоречит современным представлениям о механизме образования “первичных” трещин. Действительный размер трещин оказался на 2–3 порядка меньше и составил в кремнии, карбиде кремния и в кварце несколько нанометров.

Цель настоящей работы – определение скорости и размеров “первичных” трещин в кварцевом диорите – горной породе, содержащей кристаллы кварца и плагиоклазов, обозначаемой далее для краткости как диорит.

Предлагаемая статья разделена на несколько частей. В первой описана установка для трения и методы, использованные для решения поставленной задачи. Во второй части представлены результаты исследований дефектов, образующихся при разрушении кристаллов кварца и плагиоклазов в диорите, и оценка скорости роста и размеров “первичных” трещин. Последняя, третья часть посвящена выяснению вопроса – выполняется ли для “первичных” нанотрещин уравнение Гутенберга–Рихтера, связывающее число очагов разрушения с энергией, которая выделяется при их образовании.

Объект и методы исследования

Исследовались образцы лейкократового среднекристаллического кварцевого диорита, содержащего кристаллы низкого альбита (60–70 %) и кварца (15–20 %) размером от ≈ 100 до 800 мкм. Из образца были изготовлены стержни длиной 45 мм и диск диаметром 41 мм, в центре которого высверлили отверстие для посадки на ось электромотора. Линейная скорость движения поверхности диска после включения электромотора составляла примерно 8 м/с. Заточенные концы стержней прижимались к вращающемуся диску; величина контактного давления при соприкосновении составляла около 1 МПа. В момент касания возникало излучение – фрактोलюминесценция (рис. 1), спектр которой регистрировался оптоволоконным спектрометром AvaSpec-ULSi2048L-USB2 OE.

Для исследования структуры, минерального состава поверхности диоритового диска и дефектов, образующихся на ней после трения, использовали методы рамановской и фотолюминесцентной спектроскопии. Рамановские спектры были получены при использовании оборудования Уникальной научной установки “Физика, химия, и механика кристаллов и тонких пленок” (ИПМаш РАН, Санкт-Петербург) на рамановской установке Witec Alpha 300R. Длина волны излучения лазера 532 нм. Размер светового

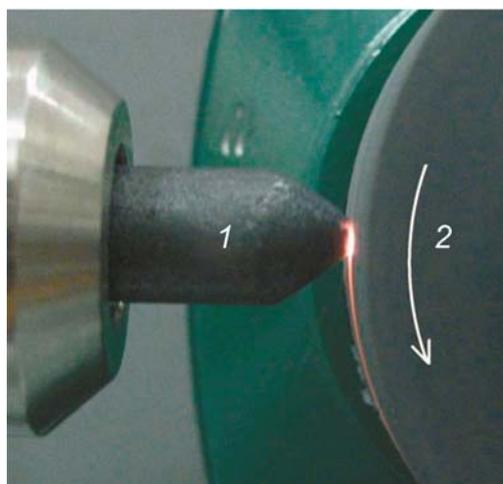


Рис. 1. Фрактолюминесценция при трении диорита: 1 – стержень, 2 – диск. Светлое пятно в месте касания стержня к диску – фрактолюминесценция. Светлая полоса на поверхности ниже области касания стержня к диску – частицы порошка, образовавшегося при трении

Fig. 1. Fractoluminescence during friction of diorite: 1 – rod, 2 – disk. A bright spot at the point where the rod touches the disk is fractoluminescence. The light band on the surface below the area of contact of the rod to the disk is the particles of powder formed during friction

пятна на поверхности образца ≈ 5 мкм. Спектры фотолюминесценции получены на лабораторной установке, в которой луч светодиода UVTOP280TO39HS (длина волны излучения 285 нм) падал на поверхность образца под углом 80° к плоскости поверхности. Размер светового пятна на поверхности образца составлял 2 мм. Возникающее под действием луча светодиода излучение через кварцевый световод направлялось в спектрометр.

Для регистрации с использованием метода фрактолюминесцентной спектроскопии дефектов, образующихся в образце при трении, была построена специальная лабораторная установка, в которой возникающее при трении излучение через кварцевый световод подавалось на фотокатод фотоэлектронного умножителя – ФЭУ 136. Сигнал с выхода ФЭУ 136 направлялся на вход аналогово-цифрового преобразователя – АЦП-3112, а сигнал с его выхода через каждые 2 нс записывался в память персонального компьютера.

Методы спектроскопии позволяют получить информацию о строении поверхностного слоя, эффективная толщина которого задана глубиной h . На этой глубине интенсивность поля электромагнитного излучения источника затухает в e^2 раз (примерно в 8 раз). Здесь e – основание натуральных логарифмов. Значение h рассчитывалось по формуле [Born, Wolf, 1964]

$$h = \frac{1}{4\pi\nu k(\nu)}, \quad (1)$$

где ν – частота электромагнитного излучения, см^{-1} ; $k(\nu)$ – показатель поглощения.

Для вычисления $k(\nu)$ измерялся коэффициент отражения $R(\nu)$ породы на частоте ν . Значение $R(\nu)$ при падении света на поверхность образца под углом 90° связано с показателями преломления $n(\nu)$ и поглощения $k(\nu)$ следующим уравнением [Born, Wolf, 1964]:

$$R = \frac{(n(\nu) - 1)^2 + k^2(\nu)}{(n(\nu) + 1)^2 + k^2(\nu)}. \quad (2)$$

Для большинства горных пород показатель преломления в видимой области спектра составляет около 1.5 [Schumann, 1997]. С использованием этого значения и измеренной величины $R(\nu)$ сначала оценивалась величина $k(\nu)$, а затем по формуле (1) рассчитывалась эффективная толщина h , оказавшаяся для диорита равной примерно 1 мкм.

На интенсивность рамановских и фотолюминесцентных спектров оказывает влияние шероховатость поверхности – рассеяние на неоднородностях приводит к уменьшению их интенсивности. В процессе трения шероховатость поверхности образцов значительно увеличилась, и для уменьшения ее влияния интенсивность возбуждающих источников (лазера или светодиода) устанавливалась так, чтобы интенсивность рассеяния на длинах волн их излучения была одинаковой. Это связано с тем, что, если поверхность содержит много неровностей с размерами, сравнимыми с длиной волны источника излучения или меньше нее, то часть света, иногда значительная, от этих центров проходит мимо приемника. Чтобы этот эффект не влиял на результаты измерения интенсивности полос люминесценции, интенсивность источников изменялась до тех пор, пока интенсивность света, отраженного от образца на длине волны их излучения, не становилась одинаковой.

Результаты исследования

Напомним, что для возбуждения рамановских спектров использовался лазер, размер пятна излучения которого на поверхности образца ≈ 5 мкм, что на два порядка меньше размера кристаллов кварца и плагиоклазов (≈ 100 – 800 мкм). Это позволило получить спектры названных минералов до трения в отдельности (рис. 2 слева). Полосы 128 , 208 , 355 и 465 см^{-1} в этих спектрах соответствуют колебаниям кристаллической решетки кварца [De Boer et al., 1996], а 165 , 185 , 254 , 333 , 414 , 481 , 509 , 569 см^{-1} – низкого альбита [McKeown, 2005].

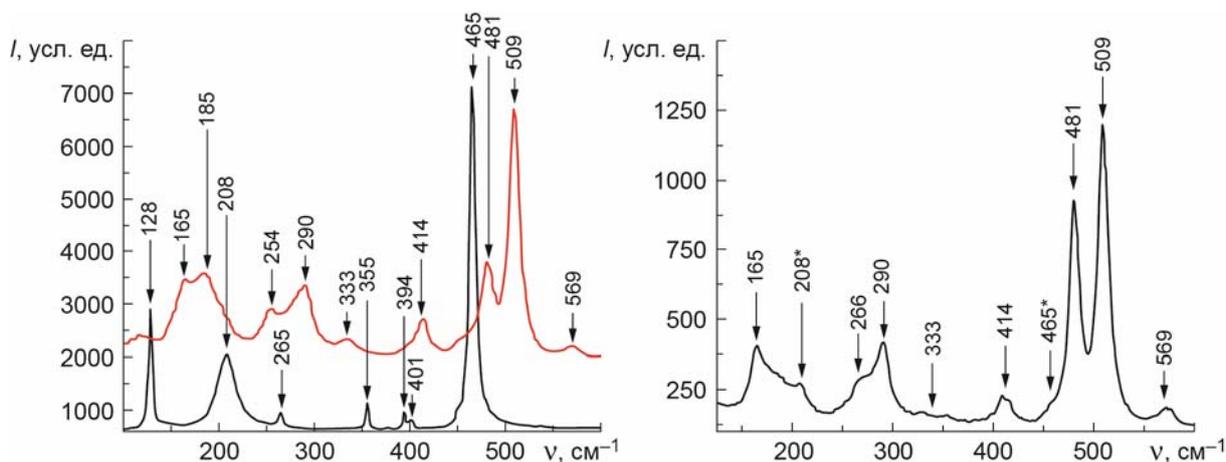


Рис. 2. Рамановские спектры на поверхности диорита до трения (слева, красный график – спектры кристалла кварца, черный – плагиоклазов) и после трения (справа, звездочками отмечены полосы 208 и 465 см^{-1} , соответствующие колебаниям кристаллов кварца). Здесь и на рис. 3, 4 на вертикальной оси – интенсивность I , усл. ед.

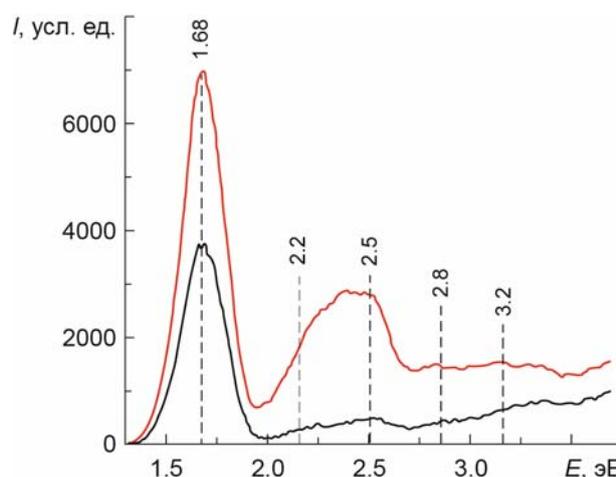
Fig. 2. Raman spectra on the diorite surface before friction (on the left, red line – spectra of quartz crystal, black – plagioclase) and after friction (on the right, asterisks mark bands at 208 and 465 см^{-1} , corresponding to vibrations of quartz crystals). Here and in Fig. 3, 4 on the vertical axis is the intensity I , arb. units

После трения размеры кристаллов уменьшаются до 1–3 мкм и становятся меньше размеров пятна излучения лазера. В этом случае в спектре наблюдаются полосы всех упомянутых выше минералов (рис. 2 *справа*). Оказалось, что после трения интенсивность полос 208 и 465 см⁻¹, соответствующих колебаниям кристаллов кварца [Etchepare, Meria, Smetankme, 1974], на порядок меньше, чем до него, что свидетельствует об уменьшении на порядок концентрации кристаллов кварца после трения. Ранее в работе [Веттегрень и др., 2020б] было установлено, что при разрушении макрокристалла кварца образуется порошок из частиц размером ≈10 нм. Вероятно, при трении диорита часть этих частиц “вылетает” с поверхностного слоя породы (см. рис. 1). Интенсивность полос, соответствующих колебаниям кристаллических решеток альбита, после трения уменьшилась примерно в три раза, что говорит об уменьшении примерно в три раза концентрации кристаллов плагиоклазов.

Интенсивность полосы 481 см⁻¹ после трения не уменьшилась, а, наоборот, увеличилась (см. рис. 2 *справа*). Согласно [Velde et al., 1989], интенсивность этой полосы растет при увеличении концентрации дефектов в кристаллах низкого альбита. Детальные сведения о строении дефектов в кристаллических решетках кварца и альбита до и после трения были получены в результате анализа спектров фотолюминесценции диорита (рис. 3), образованных при наложении друг на друга полос, которые имеют гауссову форму [Turro, Ramamwrte, Scaiano, 2010]. Полоса 1.68 эВ соответствует ионам Fe³⁺, полосы 2.2 и 2.5 эВ – радикалам ≡Si-O● [Веттегрень и др., 2020б], а 2.8 эВ – самозахваченным экситонам [Götze, 2012]. Эти дефекты существовали в кварце до трения. После трения интенсивность полосы 1.68 эВ увеличилась примерно в три раза, полос 2.2, 2.5 и 2.8 эВ – примерно в четыре раза. Это показывает, что в кристаллах кварца концентрация ионов Fe³⁺ увеличилась примерно в три раза, а радикалов ≡Si-O● и самозахваченных экситонов – примерно в пять раз.

Рис. 3. Спектры фотолюминесценции диорита до трения (красный график) и после трения (черный график). Пунктиром обозначены положения максимумов полос, при наложении которых образуется наблюдаемый спектр

Fig. 3. Photoluminescence spectra of diorite before friction (red line) and after friction (black line). The dotted line shows the positions of the band maxima and their superposition forms the observed spectrum



Энергия для возбуждения ионов Fe³⁺, видимо, заимствуется из энергии, выделяющейся при разрывах Si-O-Si связей в кристаллах кварца, хотя конкретно для этого минерала данное явление не рассматривалось [Агранович, Галанин, 1978]. Интенсивность полосы 3.2 эВ, возникающей при переходе электронов из зоны проводимости в ловушки электронов в альбите [Baril, Huntley, 2003; Huntley, Godfrey-Smith, Thewalt, 1985; Huntley, Baril, Haidar, 2007], которые образуются при разрывах Si-O-Si и Si-O-Al связей в плагиоклазах, увеличилась примерно в три раза. Следовательно, концентрация ловушек электронов в кристаллах альбита после трения увеличилась примерно в три раза.

Как уже отмечалось, метод фотолюминесценции позволяет получить сведения о дефектах в кристаллической решетке диорита до и после трения. Однако при трении образуются и другие дефекты, время жизни которых варьирует от нескольких десятков до сотен наносекунд. Очевидно, что они не могут быть зарегистрированы указанным методом, поскольку время записи спектров фотолюминесценции составляет приблизительно 10 с. Сведения о таких дефектах были получены после анализа спектров фотолюминесценции. Эти дефекты в течение нескольких наносекунд находятся в возбужденном электронном состоянии. Затем энергия возбуждения в виде фотолюминесценции выделяется в видимой области спектра [Turro, Ramamwrt, Scaiano, 2010]. Спектр фотолюминесценции при трении диорита показан на рис. 4.

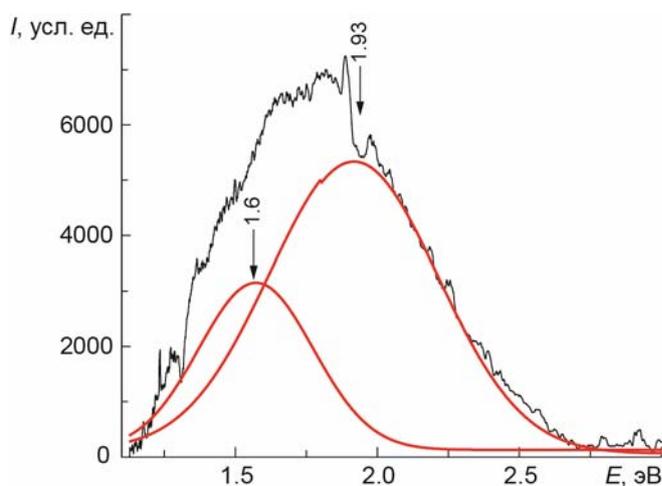


Рис. 4. Спектр фотолюминесценции при трении диорита. Черная кривая отображает экспериментальный спектр. Красные кривые – результат разложения спектра на составляющие полосы

Fig. 4. Fractoluminescence spectrum during friction of diorite. The black curve shows the experimental spectrum. Red lines are the result of the decomposition of the spectrum into its component bands

Прежде чем привести результаты анализа рассматриваемого спектра, отметим, что на его получение уходило несколько минут. В течение этого времени интенсивность фотолюминесценции изменялась: она сначала росла, достигая максимальной величины при 170 мкс, затем уменьшалась и при $t > 1$ мс становилась на два порядка меньше (рис. 5). Поэтому наблюдаемый спектр фотолюминесценции в основном соответствует дефектам при разрушении диорита при $t < 1$ мс. Полоса 1.6 эВ в этом спектре соответствует ионам Fe^{3+} [Götze, 2012] в плагиоклазах, а полоса 1.93 эВ – центрам $\equiv Si-O\bullet$, образующимся при разрывах Si-O-Si связей [Kalceff, Phillips, 1995].

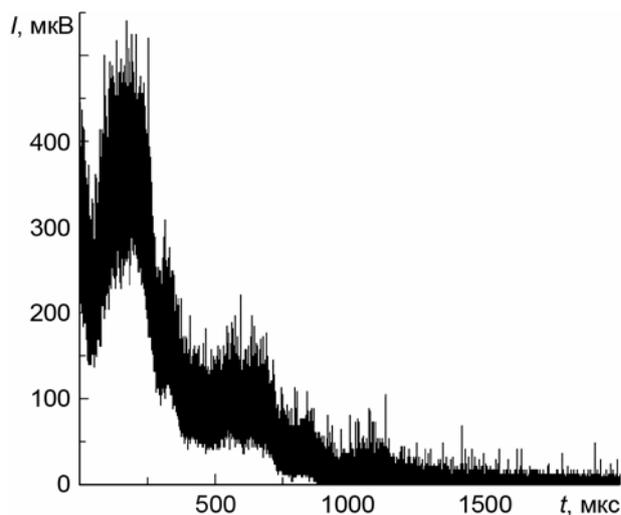


Рис. 5. Временная зависимость интенсивности сигналов фотолюминесценции при трении диорита. Здесь и на рис. 6–8 на вертикальной оси – интенсивность I , мкВ

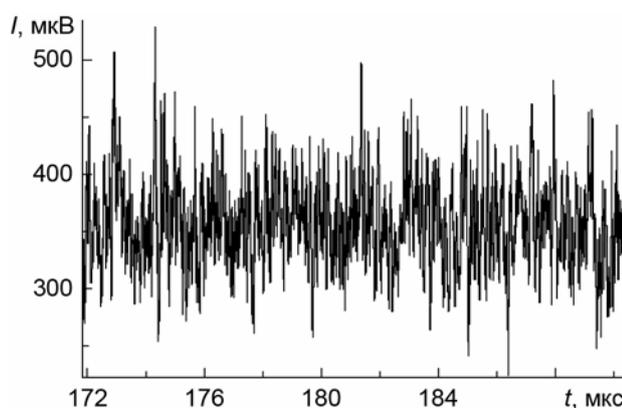
Fig. 5. Time dependence of the intensity of fractoluminescence signals during friction of diorite. Here and in Fig. 6–8 on the vertical axis – intensity I , μV

По современным представлениям, в основе явления разрушения твердых тел лежит процесс образования, накопления, объединения и роста трещин. Вероятно, дефекты, образующиеся при разрушении кристаллов кварца и плагиоклазов, в основном располагаются на поверхности трещин. Рассмотрим образование и рост нанотрещин, анализируя динамику сигналов фрактолюминесценции.

Как отмечалось выше, интенсивность фрактолюминесценции сначала растет, достигая максимального значения при $t \approx 170$ мкс, а через 1 мс после начала трения уменьшается на два порядка. При $t < 1$ мс сигналов так много, что их наложение друг на друга приводит к беспорядочным биениям интенсивности (рис. 6) и делает невозможным наблюдение отдельных сигналов.

Рис. 6. Фрагмент временной зависимости интенсивности фрактолюминесценции при трении диорита

Fig. 6. Fragment of the time dependence of the intensity of fractoluminescence during friction of diorite



При $t \geq 1$ мс, когда в поверхностном слое диорита остаются в основном кристаллы низкого альбита, интенсивность фрактолюминесценции уменьшается на порядок. В этом случае временная зависимость интенсивности фрактолюминесценции представляет собой ряд отдельных сигналов, всего в 5–10 раз превышающих шум прибора. Средний интервал времени между появлением следующих друг за другом сигналов составляет примерно 60 нс (рис. 7).

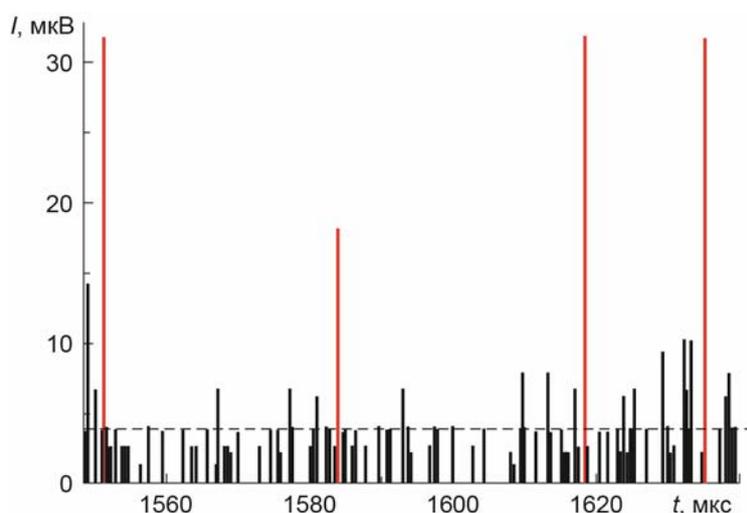


Рис. 7. Временная зависимость интенсивности фрактолюминесценции при $t = 1550$ – 1640 мкс. Красные отрезки – сигналы фрактолюминесценции, пунктирная линия – шум прибора

Fig. 7. Time dependence of the fractoluminescence intensity at $t = 1550$ – 1640 μ s. Red segments – signals of fractoluminescence, dotted line – noise of the device

Характерный вид сигналов приведен на рис. 8. Их длительность составляла 32–34 нс. Они содержали четыре максимума, средний интервал времени между которыми равен примерно 6 нс. Интенсивность первого максимума в 1.5–2 раза больше последующих. Ранее были исследованы сигналы фрактолюминесценции при разрушении поверхности кристаллов кварца [Веттегрень и др., 2020б]. Как и для плагиоклазов, сигналы фрактолюминесценции при разрушении кварца содержали четыре максимума длительностью ≈ 41 –43 нс и временным интервалом между ними ≈ 10 –13 нс.

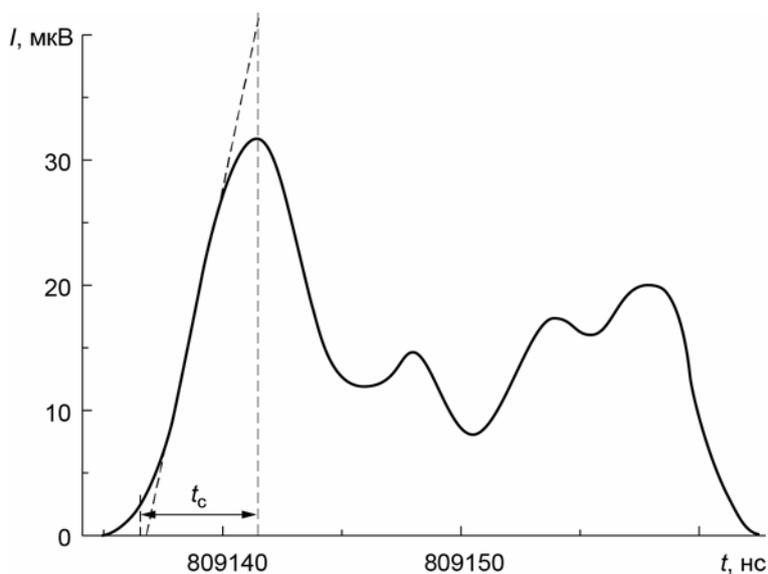


Рис. 8. Типичный сигнал фрактолюминесценции при трении диорита. t_c – время нарастания сигнала до первого максимума

Fig. 8. Typical signal of fractoluminescence during friction of diorite. t_c – the rise time of the signal to the first maximum

Каков же механизм возникновения сигналов фрактолюминесценции? Известно, что при механических воздействиях дислокации в кристаллах начинают двигаться по плоскостям скольжения. В местах пересечения плоскостей создаются барьеры, препятствующие их движению [Cottrell, 1964; Орлов, 1983; Владимиров, 1984; Gottstein, 2004]. Если напряжения достаточно велики, то дислокации могут прорывать барьеры. В этот момент атомы в барьерах переходят в возбужденное состояние [Zakrevskii, Shuldiner, 1995]. Энергия возбуждения выделяется в виде излучения в видимой области спектра – фрактолюминесценции.

При комнатной температуре кристаллы низкого альбита обладают триклинной сингонией, а кварца – тригональной. Обе решетки содержат четыре системы плоскостей скольжения дислокаций [Shaocheng, Mainprice, 1988; Stünitz, Gerald, Tullis, 2003; Кац, Симанович, 1974], при пересечениях которых возникают четыре барьера. Поэтому сигналы фрактолюминесценции при разрушении барьеров должны содержать четыре максимума, что и наблюдается в эксперименте. При прорыве барьеров, согласно [Cottrell, 1964], образуются микротрещины. Таким образом, появление сигналов, содержащих четыре максимума, свидетельствует о том, что в кристаллах низкого альбита и кварца образуются кластеры из четырех трещин.

Интенсивность максимумов полос 1.6 и 1.93 эВ в спектре фрактолюминесценции при трении диорита (см. рис. 4) пропорциональна площади берегов трещин. Вычислим ее.

Скорость роста трещин задается скоростью пересечения барьера дислокациями после его разрушения. Средняя скорость движения дислокаций определяет скорость ползучести кристаллов [Орлов, 1983; Владимиров, 1984]. В нашем эксперименте она задана скоростью движения поверхности диска из диорита, составляющей 8 м/с. Форма трещин неизвестна. Предположим, что берега трещин имеют одинаковую ширину и длину. Тогда средняя скорость увеличения площади берегов трещин $\langle dS/dt \rangle \approx 8 \text{ нм}^2/\text{нс}$.

Распределение скоростей роста интенсивности первого максимума dI/dt в сигналах фрактоллюминесценции показано на рис. 9.

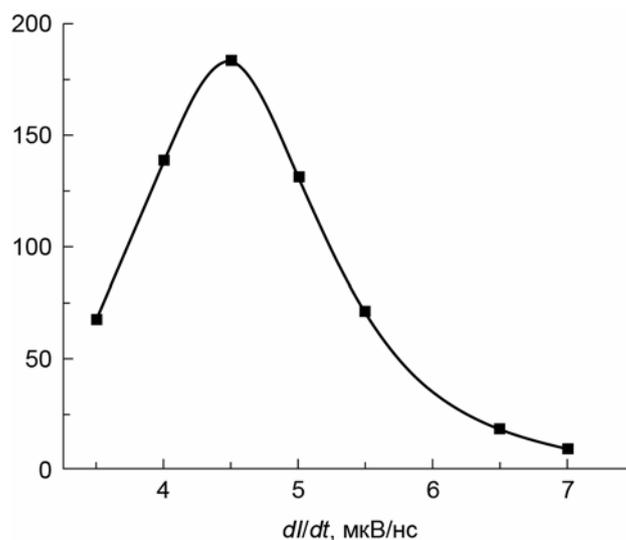


Рис. 9. Распределение скоростей роста первого, самого интенсивного максимума, в сигналах фрактоллюминесценции при разрушении кристаллов плагиоклазов при $t \geq 1$ мс. Здесь и на рис. 10, 11 квадраты – отдельные измерения. На вертикальной оси – число сигналов

Fig. 9. Distribution of the growth rates of the first, most intense maximum, in the signals of fractoluminescence during the destruction of plagioclase crystals at $t \geq 1$ ms. Here and in Fig. 10, 11 squares are individual measurements. On the vertical axis is the number of signals

Можно видеть, что средняя скорость роста интенсивности $\langle dI/dt \rangle \approx 4.5$ мкВ/нс. Она связана со средней скоростью роста площади берегов трещин следующим выражением: $\langle dS/dt \rangle = Q \langle dI/dt \rangle$, где Q – коэффициент пропорциональности. Зная среднюю скорость роста интенсивности и среднюю скорость увеличения площади берегов трещин, получаем $Q = 1.8 \text{ нм}^2/\text{мкВ}$.

Как это видно на рис. 9, величина разброса скорости роста интенсивности примерно равна 1.6 мкВ/нс (на половине высоты первого максимума на этом графике). Следовательно, используя формулу для определения средней скорости увеличения площади берегов трещин, получаем значение среднего разброса скорости роста площади берегов трещин $\langle dS/dt \rangle = 2.8 \text{ нм}^2/\text{нс}$.

Какова же причина разброса? Для прорыва барьера необходимо, чтобы локальные напряжения достигли его прочности [Орлов, 1983; Владимиров, 1984]. В свою очередь, величина локальных напряжений около барьера тем больше, чем больше дислокаций в полосе скольжения. Кристаллы плагиоклазов имеют много разных дефектов, и критические напряжения, при которых барьеры прорываются, неодинаковы. Поэтому барьеры разрушаются при разном числе дислокаций около них. Вероятно, разброс скорости роста трещин отражает вариацию “прочности” барьеров, образующихся в кристаллах альбитов.

Для оценки площади берегов самых крупных трещин в кластерах трещин в альбите, сначала вычислялась скорость роста первого, самого интенсивного максимума в сигналах фрактолюминесценции. Затем определялась скорость роста площади трещин dS/dt и умножалась на время их роста t_c (время нарастания сигнала до первого максимума) – $S=dS/dt \cdot t_c$. Полученное таким образом распределение площадей наиболее крупных трещин в альбите представлено на рис. 10. Видно, что средний размер площади берегов трещин $\approx 36 \text{ нм}^2$. Для сравнения отметим, что средний размер берегов трещин в кварце в три раза меньше и составляет $\approx 10 \text{ нм}^2$ [Веттегрень и др., 2020б].

Интенсивность второго, третьего и четвертого максимумов в сигналах фрактолюминесценции приблизительно в два раза меньше, чем первого. Соответственно, площадь поверхности берегов трещин, образующихся в плагиоклазах вслед за первой, примерно в два раза меньше.

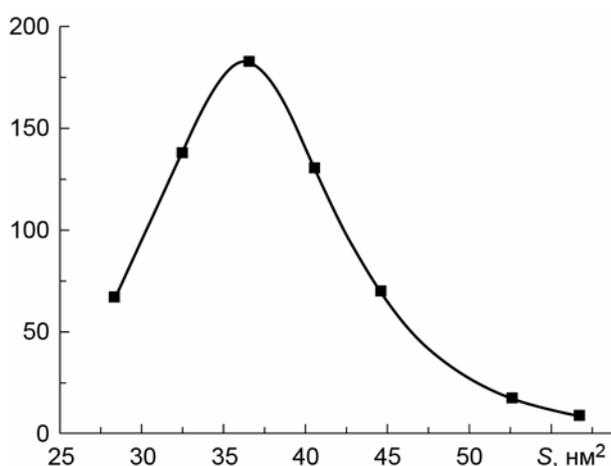


Рис. 10. Распределение площадей берегов наиболее крупных трещин, образующихся в плагиоклазе при $t \geq 1$ мс. На вертикальной оси – число трещин, на горизонтальной – площадь S , нм^2

Fig. 10. The distribution of the coastal areas of the largest cracks formed in the plagioclase at $t \geq 1$ ms. On the vertical axis – the number of cracks, on the horizontal – area S , нм^2

Соотношение размеров и интенсивности сигналов фрактолюминесценции

Исследование динамики накопления акустических сигналов при нагружении горных пород показало, что распределение их амплитуды A описывается выражением $N(>A) = aA^{-b}$, где $N(>A)$ – количество сигналов с амплитудой, превышающей A ; a и b – константы [Lockner et al., 1992; Amitrano, 2003]. Зависимость $\lg N = f(\lg A)$ линейна, причем коэффициент наклона $b \approx 1$. Она отражает зависимость числа трещин с размерами от единиц до нескольких десятков микрон от энергии, выделяющейся при их образовании.

Важно, что, как было установлено ранее в работе [Gutenberg, Richter, 1954], распределение между числом землетрясений N и их магнитудой M (величина M пропорциональна логарифму энергии землетрясения) описывается выражением $\lg N = a - bM$. Это распределение выполняется при вариации размеров очагов разрушения от нескольких десятков микрон при лабораторных экспериментах до десятков и сотен километров, типичных для сейсмологии [Wiemer, Wyss, 2002; Scholz, 2019].

Так как интенсивность первых максимумов сигналов фрактолюминесценции $I_{\text{фр}}$ пропорциональна энергии, выделяющейся при их образовании, было решено проверить выполняется ли такое распределение для “первичных” трещин, которые образуются

при трении диорита. Удобнее всего это сделать для первого максимума в сигналах фрактолюминесценции (см. рис. 8). Видно, что в координатах $\lg N_{\text{фр}}(I_{\text{фр}}) = \lg I_{\text{фр}}$, где $N_{\text{фр}}$ – количество сигналов, экспериментальные точки укладываются на прямую линию, т.е. распределение $N_{\text{фр}}(I)$ тоже имеет степенной вид $N_{\text{фр}}(I_{\text{фр}}) = N_{0\text{фр}} I_{\text{фр}}^{\beta}$. Здесь $N_{0\text{фр}}$ – параметр, зависящий от расположения приемника сигнала фрактолюминесценции – ФЭУ 136, его чувствительности и т.п. В тоже время величина показателя β не зависит от этих параметров и приблизительно равна -1 (рис. 11). Это показывает, что соотношение Гутенберга–Рихтера, установленное для землетрясений, выполняется и для “первичных” трещин, образующихся в альбите, площадь берегов которых изменяется от единиц до первых десятков квадратных нанометров.

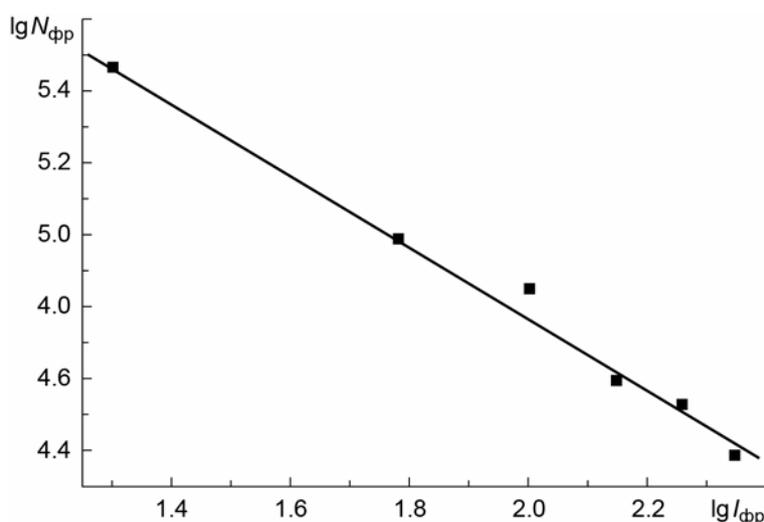


Рис. 11. Распределение интенсивностей первого максимума в сигналах фрактолюминесценции

Fig. 11. The intensity distribution of the first maximum in the signals of fractoluminescence

Такой же результат был получен ранее после анализа распределения площадей “первичных” трещин, образующихся при разрушении кристаллов кварца в работе [Веттегрень и др., 2020б]. Средняя площадь берегов “первичных” трещин в кварце составила $\approx 10 \text{ нм}^2$.

Таким образом, анализируемое соотношение Гутенберга–Рихтера справедливо для очагов разрушения в горных породах с размерами от нескольких нанометров до десятков километров.

Выводы

Трение в поверхностном слое диорита толщиной 1 мкм в описанных условиях приводит к почти полному разрушению кристаллов кварца и частичному разрушению кристаллов низкого альбита.

При разрушении кристаллов альбита образуются трещины, площадь поверхности берегов которых изменяется в пределах от единиц до первых десятков квадратных нанометров. Они рождаются кластерами по четыре трещины в каждом.

Предполагается, что трещины возникают при прорывах дислокациями барьеров, образующихся в местах пересечения плоскостей их скольжения. Кристаллы низкого альбита и кварца на берегах трещин содержат множество радикалов $\equiv \text{Si-O}\bullet$ в возбужденном электронном состоянии.

Проведенные эксперименты показали, что соотношение Гутенберга–Рихтера, применяемое в сейсмологии, выполняется и для “первичных” трещин в кристаллах низкого альбита и кварца, площадь берегов которых варьирует от единиц до нескольких десятков квадратных нанометров.

Благодарности

Авторы признательны рецензентам работы, замечания которых позволили заметно улучшить содержание и стиль статьи.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания при поддержке экспериментальной части исследования Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 20-05-00155а).

Литература

- Агранович В.М., Галанин М.Д.* Перенос энергии электронного возбуждения в конденсированных средах. М.: Наука, 1978. 383 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.
- Веттегрень В.И., Соболев Г.А., Пономарев А.В., Щербаков И.П., Мамалимов Р.И.* Наносекундная динамика разрушения поверхностного слоя гетерогенного нанокристаллического тела (песчаника) при трении // *Физика твердого тела*. 2017а. Т. 59, вып. 5. С.931–934. DOI: 10.21883/FTT.2017.05.44382.373
- Веттегрень В.И., Пономарев А.В., Щербаков И.П., Мамалимов Р.И.* Динамика разрушения гетерогенного тела (диорита) при трении // *Физика твердого тела*. 2017б. Т. 59, вып. 11. С.2263–2265. DOI: 10.21883/FTT.2017.11.45072.093
- Веттегрень В.И., Пономарев А.В., Щербаков И.П., Мамалимов Р.И.* Влияние структуры гетерогенного нанокристаллического тела (песчаника) на динамику накопления микротрещин при трении // *Физика твердого тела*. 2017в. Т. 59, вып. 8. С.1557–1560. DOI: 10.21883/FTT.2017.08.44758.18
- Веттегрень В.И., Пономарев А.В., Arora K., Raza Haris, Мамалимов Р.И., Щербаков И.П., Фокин И.В.* Наносекундная динамика разрушения гетерогенных природных тел при трении // *Физика твердого тела*. 2018. Т. 60, вып. 11. С.2266–2264. DOI: 10.21883/FTT.2018.11.46674.057
- Веттегрень В.И., Пономарев А.В., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П.* Микротрещины в гетерогенном твердом теле (песчанике) при трении // *Физика твердого тела*. 2019а. Т. 61, вып. 7. С.1318–1321.
- Веттегрень В.И., Пономарев А.В., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П., Арора К., Шринагеш Д.* Микротрещины в базальте и тоналите при трении // *Физика Земли*. 2019б. № 6. С.76–83. DOI: <http://dx.doi.org/10.31857/S0002-33372019676-83>
- Веттегрень В.И., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П., Кулик В.Б.* Образование нанокристаллов кремния при трении // *Физика твердого тела*. 2020а. Т. 62, вып. 7. С.1070–1073.
- Веттегрень В.И., Пономарев А.В., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П.* Нанотрещины при разрушении кварца // *Физика Земли*. 2020б. № 6. С.106–112.
- Веттегрень В.И., Кадомцев А.Г., Щербаков И.П., Кулик В.Б.* Образование нанометровых трещин и фрактоломинесценция при разрушении углеродной керамики // *Физика твердого тела*. 2020в. Т. 62, вып. 11. С.1860–1864.
- Владимиров В.И.* Физическая природа разрушения металлов. М.: Металлургия, 1984. 280 с.

- Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. Физические основы прогнозирования механического разрушения // Докл. АН СССР. 1981. Т. 259, № 6. С.1350–1353.
- Кац М.Я., Симанович И.М. Кварц кристаллических горных пород (минералогические особенности и плотностные свойства) // Труды Геологического института. М.: Наука, 1974. Вып. 259. 230 с.
- Орлов А.Н. Введение в теорию дефектов в кристаллах. М.: Высшая школа, 1983. 144 с.
- Петров В.А., Башкарев А.Я., Веттегрень В.И. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных 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.
- Смирнов В., Пономарев А., Станциц С., Потанина М., Патонин А., Dresen G., Narteau C., Bernard P., Строганова С. Лабораторное моделирование афтершоковых последовательностей: зависимость параметров Омори и Гутенберга–Рихтера от напряжений // Физика Земли. 2019. № 1. С.149–165. <https://doi.org/10.31857/S0002-333720191149-165>
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
- Черемской П.Г., Слезов В.В., Бетехтин В.И. Поры в твердом теле. М.: Энергоатомиздат, 1990. 376 с.
- Amitrano D. Brittle-ductile transition and associated seismicity: Experimental and numerical studies and relationship with the b value // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N B1. 2444. DOI: 10.1029/2001JB000680
- Baril M.R., Huntley D.J. Infrared stimulated luminescence and phosphorescence spectra of irradiated feldspars // J. Phys.: Condens. Matter. 2003. V. 15, N 46. P.8029–8048.
- Born M., Wolf E. Principles of optics. Second Ed. Oxford: Pergamon press, 1964. 856 p.
- Cottrell A.H. Theory of Crystal Dislocations. New York: Gordon and Breach, 1964. 91 p.
- Etchepare J., Merian M., Smetankme L. Vibrational normal modes of SiO₂. I. α and β quartz // J. Chem. Phys. 1974. V. 60. P.1873–1876.
- De Boer K., Jansen A.P.J., van Santen R.A., Watson G.W., Parker S.C. Free Energy calculations of thermodynamic, elastic and structural // Phys. Rev. B. 1996. V. 54, N 2. P.826–835.
- Gottstein G. Physical Foundations of Materials Science. Berlin: Springer, 2004. 502 p.
- Gutenberg B., Richter C. Seismicity of the Earth and Associated Phenomena. Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1954. 295 p.
- Götze J. Application of cathodoluminescence microscopy and spectroscopy in geosciences // Microsc. Microanal. 2012. V. 18. P.1270–1284. doi: 10.1017/S1431927612001122
- Huntley D.J., Baril M.R., Haidar S. Tunnelling in plagioclase feldspars // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. V. 40, N 3. P.900–906.
- Huntley D.J., Godfrey-Smith D.I., Thewalt M.L.W. Optical dating of sediments // Nature. 1985. V. 313. P.105–107. doi.org/10.1016/0277-3791(88)90032-7
- Kalceff M.A.S., Phillips M.R. Cathodoluminescence microcharacterization of the defect structure of quartz // Phys. Rev. B. 1995. V. 52. P.3122–3134.
- Lei X., Ma S. Laboratory acoustic emission study for earthquake generation process // Earthq Sci. 2014. V. 27, N 6. P.627–646. DOI: 10.1007/s11589-014-0103-y
- Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V., Ponomarev V., Sidorin A. Observations of Quasi-static Fault Growth from Acoustic Emissions // International Geophysics. Academic Press, 1992. V. 51. P.3–31.
- Martelli G., Smith P.N., Woodward A.J. Light, radiofrequency emission and ionization effects associated with rock fracture // Geophys. J. Int. 1989. V. 98, N 2. P.397–401. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1989.tb03362.x
- McKeown D.A. Raman spectroscopy and vibrational analyses of albite: From 25 °C through the melting temperature // American Mineralogist. 2005. V. 90. P.1507–1517.
- Scholz C.H. The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2019. 493 p.
- Schumann W. Gemstones of the world. New York: Sterling Pub. Co., 1997. 272 p.

- Shaocheng J., Mainprice D.* Natural deformation fabrics of plagioclase: implications for slip systems and seismic anisotropy // *Tectonophysics*. 1988. V. 147. P.145–163.
- Stünitz H., Gerald J.D.F., Tullis J.* Dislocation generation, slip systems, and dynamic recrystallization in experimentally deformed plagioclase single crystals // *Tectonophys.* 2003. V. 372, Issues 3–4. P.215–233.
- Turro N.J., Ramamwrtre V., Scaiano J.C.* Modern Molecular Photochemistry. Columbia University: University Sci. Press, 2010. 1085 p.
- Velde B., Syono Y., Kikuchi M., Boyer H.* Raman Microprobe Study of Synthetic Diaplectic Plagioclase Feldspars // *Phys. Chem. Minerals*. 1989. V. 16. P.436–441.
- Wiemer S., Wyss M.* Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes // *Adv. Geophys.* 2002. V. 45. P.259–302.
- Zakrevskii V.A., Shuldiner A.V.* Electron emission and luminescence owing plastic deformation of ionic crystals // *Phil. Mag. B*. 1995. V. 71, N 2. P.127–138.

Сведения об авторах

ВЕТТЕГРЕНЬ Виктор Иванович – ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1; доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН. 194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26. Тел.: +7(921) 949-20-87. E-mail: Victor.Vettegren@mail.ioffe.ru

ПОНОМАРЕВ Александр Вениаминович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-88-41. E-mail: avp@ifz.ru

КУЛИК Виталий Борисович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН. 194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26. Тел.: +7(921) 326-20-41. E-mail: Vitaly.Kulik@mail.ioffe.ru

МАМАЛИМОВ Рустам Исмагилович – старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1; кандидат технических наук, научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН. 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26. Тел.: +7(905) 264-62-12. E-mail: mamalun@mail.ru

ЩЕРБАКОВ Игорь Петрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН. 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26. Тел.: +7(911) 294-19-19. E-mail: Sherbakov.Mhd@mail.ioffe.ru

DESTRUCTION OF QUARTZ DIORITE AT FRICTION

V.I. Vettegren^{1,2}, A.V. Ponomarev¹, V.B. Kulik²,
R.I. Mamalimov^{1,2}, I.P. Shcherbakov²

¹ *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia*

Abstract. Using methods of fractoluminescence (with resolution of 2 ns), photoluminescence and Raman spectroscopy, information was obtained on the structure and evolution of defects formed on the surface of nanocracks in low albite and quartz crystals in friction of leucocratic quartz diorite. Before friction, the rock contained

60–70 % of low albite and 15–20 % of quartz with crystal sizes from ≈ 100 to $800 \mu\text{m}$. After friction for about 1 ms, the crystal sizes decreased to $1\text{--}3 \mu\text{m}$. The concentration of quartz crystals decreased by an order, and of low albite by ≈ 3 times. In quartz and low albite crystals remaining after destruction, the concentration of defects of Fe^{3+} ions and $\equiv\text{Si-O}\bullet$ radicals increased by an order. At fracture, clusters of four cracks having a size of a few nanometers are formed. The average value of the time interval between the occurrence of two successive clusters is ≈ 60 ns. Nanocracks in clusters are formed one after another after $7\text{--}10$ ns. It is assumed that cracks are formed when dislocations break through the barriers that arise at the intersection of sliding planes. The growth rate and sizes of nanocracks are determined; the dynamics of their accumulation was studied. The first crack is the largest – the area of its edges in low albite crystals is $\approx 36 \text{ nm}^2$; the area of edges of other nanocracks is $\approx 18 \text{ nm}^2$. In quartz crystals the size of the surface area of the crack edges is three times less, i.e. $\approx 10 \text{ nm}^2$. The Gutenberg-Richter law that is known in seismology and links the number of destruction sources with the energy of their formation, is also fulfilled for nanocracks in low albite.

Keywords: friction, destruction, quartz, low albite, nanocracks.

References

- Agranovich V.M., Galanin M.D., *Electronic excitation energy transfer in condensed matter*, Amsterdam, New York, Oxford: North-Holland publ. company, 1982, 371 p.
- Amitrano D., Brittle-ductile transition and associated seismicity: Experimental and numerical studies and relationship with the b value, *J. Geophys. Res.*, 2003, vol. 108, no. B1, 2444. DOI: 10.1029/2001JB000680
- Baril M.R., Huntley D.J., Infrared stimulated luminescence and phosphorescence spectra of irradiated feldspars, *J. Phys.: Condens. Matter.*, 2003, vol. 15, no. 46, pp. 8029-8048.
- Betekhtin V.I., Kadomtsev A.G., Evolution of microscopic cracks and pores in solids under loading, *Phys. Solid State*, 2005, vol. 47, is. 5, pp. 825-831. DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/1.1924839>
- Born M., Wolf E., *Principles of optics*, Second Ed., Oxford: Pergamon press, 1964, 856 p.
- Cheremskoi P.G., Slezov V.V., Betekhtin V.I., *Pory v tverdom tele* (Pores in a solid), Moscow: Energoatomizdat, 1990, 376 p. [in Russian].
- Cottrell A.H., *Theory of Crystal Dislocations*, New York: Gordon and Breach, 1964, 91 p.
- De Boer K., Jansen A.P.J., van Santen R.A., Watson G.W., Parker S.C., Free Energy calculations of thermodynamic, elastic and structural, *Physical Review. B*, 1996, vol. 54, no. 2, pp. 826-835.
- Etchepare J., Merian M., Smetankme L., Vibrational normal modes of SiO_2 . I. α and β quartz, *J. Chem. Phys.*, 1974, vol. 60, pp. 1873-1876.
- Gottstein G., *Physical Foundations of Materials Science*, Berlin: Springer, 2004, 502 p.
- Götze J., Application of cathodoluminescence microscopy and spectroscopy in geosciences, *Microsc. Microanal.*, 2012, vol. 18, pp. 1270-1284, doi: 10.1017/S1431927612001122.
- Gutenberg B., Richter C., *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*, Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1954, 295 p.
- Huntley D.J., Baril M.R., Haidar S., Tunnelling in plagioclase feldspars, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2007, vol. 40, no. 3, pp. 900-906.
- Huntley D.J., Godfrey-Smith D.I., Thewalt M.L.W., Optical dating of sediments, *Nature*, 1985, vol. 313, pp. 105-107, doi.org/10.1016/0277-3791(88)90032-7
- Kalceff M.A.S., Phillips M.R., Cathodoluminescence microcharacterization of the defect structure of quartz, *Phys. Rev. B.*, 1995, vol. 52, pp. 3122-3134.
- Katz M.Ya., Simanovich I.M., Quartz of crystalline rocks (Mineralogical Characteristics and Density Properties), *Proceedings of the Geological Institute*, Moscow: Science, 1974, is. 259, 230 p.
- Lei X., Ma S., Laboratory acoustic emission study for earthquake generation process, *Earthq. Sci.*, 2014, vol. 27, no. 6, pp. 627-646, doi: 10.1007/s11589-014-0103-y.
- Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V., Ponomarev V., Sidorin A., Observations of Quasi-static Fault Growth from Acoustic Emissions, *International Geophysics*, Academic Press, 1992, vol. 51, pp. 3-31.
- Martelli G., Smith P.N., Woodward A.J., Light, radiofrequency emission and ionization effects associated with rock fracture, *Geophys. J. Int.*, 1989, vol. 98, no. 2, pp. 397-401, doi: 10.1111/j.1365-246X.1989.tb03362.x
- McKeown D.A., Raman spectroscopy and vibrational analyses of albite: From 25°C through the melting temperature, *American Mineralogist*, 2005, vol. 90, pp. 1507-1517.
- Orlov A.N., *Vvedenie v teoriyu defektov v kristallakh* (Introduction to the theory of defects in crystals), Moscow: Vysshaya shkola, 1983, 144 p. [in Russian].

- Petrov V.A., Bashkarev A.Ya., Vettegren' V.I., *Fizicheskie osnovy prognozirovaniya dolgovechnosti konstruktivnykh materialov* (Physical foundations of predicting the durability of structural materials), St-Petersburg: Politekhnik, 1993, 475 p. [in Russian].
- Regel' V.R., Slutsker A.I., Tomashevskii E.E., *Kineticheskaya priroda prochnosti tverdykh tel* (The kinetic nature of the strength of solids), Moscow: Nauka, 1974, 560 p. [in Russian].
- Scholz C.H., *The mechanics of earthquakes and faulting*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2019, 493 p.
- Schumann W., *Gemstones of the world*, New York: Sterling Pub. Co., 1997, 272 p.
- Shaocheng J., Mainprice D., Natural deformation fabrics of plagioclase: implications for slip systems and seismic anisotropy, *Tectonophysics*, 1988, vol. 147, pp. 145-163.
- Smirnov V.B., Ponomarev A.V., Stanchits S.A., Potanina M.G., Patonin A.V., Dresen G., Narteau C., Bernard P., Stroganova S.M., Laboratory modeling of aftershock sequences: stress dependences of the Omori and Gutenberg–Richter parameters, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2019, vol. 55, no. 1, pp. 124-137.
- Sobolev G.A., Ponomarev A.V., *Fizika zemletryasenii i predvestniki* (Earthquake physics and precursors), Moscow: Nauka, 2003, 270 p. [in Russian].
- Stünitz H., Gerald J.D.F., Tullis J., Dislocation generation, slip systems, and dynamic recrystallization in experimentally deformed plagioclase single crystals, *Tectonophysics*, 2003, vol. 372, is. 3-4, pp. 215-233.
- Turro N.J., Ramamwrtte V., Scaiano J.C., *Modern Molecular Photochemistry*, Columbia University: University Sci. Press, 2010, 1085 p.
- Velde B., Syono Y., Kikuchi M., Boyer H., Raman Microprobe Study of Synthetic Diaplectic Plagioclase Feldspars, *Phys. Chem. Minerals*, 1989, vol. 16, pp. 436-441.
- Vettegren V.I., Kadomtsev A.G., Shcherbakov I.P., Mamalimov R.I., Kulik V.B., Formation of Nanoscale Cracks and Fractoluminescence upon Destruction of Carbon Ceramics, *Phys. Solid State*, 2020c, vol. 62, pp. 2089-2093.
- Vettegren' V.I., Mamalimov R.I., Shcherbakov I.P., Kulik V.B., Formation of Silicon Nanocrystals under Friction, *Phys. Solid State*, 2020a, vol. 62, pp. 1210-1213, doi: 10.1134/S1063783420070276
- Vettegren' V.I., Ponomarev A.V., Mamalimov R.I., Shcherbakov I.P., Nanocracks upon Fracture of Quartz, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2020b, vol. 56, no. 6, pp. 827-832.
- Vettegren' V.I., Ponomarev A.V., Arora K., Raza H., Mamalimov R.I., Shcherbakov I.P., Fokin I.V., Nanosecond Dynamics of the Destruction of Heterogeneous Natural Bodies by Friction, *Phys. Solid State*, 2018, vol. 60, pp. 2300-2304, doi: 10.1134/S1063783418110355
- Vettegren' V.I., Ponomarev A.V., Shcherbakov I.P., Mamalimov R.I., The influence of the structure of a nanocrystalline solid (sandstone) on the dynamics of microcrack accumulation on friction, *Phys. Solid State*, 2017c, vol. 59, is. 8, pp. 1580-1583, doi: <http://dx.doi.org/10.1134/S1063783417080315>
- Vettegren' V.I., Ponomarev A.V., Shcherbakov I.P., Mamalimov R.I., Destruction dynamics of a heterogeneous body (diorite) under friction, *Phys. Solid State*, 2017b, vol. 59, is. 11, pp. 2286–2289, doi: <https://doi.org/10.1134/S1063783417110312>
- Vettegren' V.I., Ponomarev A.V., Mamalimov R.I., Shcherbakov I.P., Formation of Microcracks in a Heterogeneous Solid (Sandstone) under the Influence of Friction, *Phys. Solid State*, 2019a, vol. 61, pp. 1259-1262, doi: <http://dx.doi.org/10.1134/S1063783419070291>
- Vettegren' V.I., Ponomarev A.V., Mamalimov R.I., Shcherbakov I.P., Arora K., Srinagesh D., Chadha R.K., Microcracks in Basalt and Tonalite at Friction, *Izvestiya, Phys. Solid Earth*, 2019b, vol. 55, is. 6, pp. 879-885, doi: <http://dx.doi.org/10.1134/S1069351319060090>
- Vettegren' V.I., Sobolev G.A., Ponomarev A.V., Shcherbakov I.P., Mamalimov R.I., Nanosecond Dynamics of Destruction of the Surface Layer of a Heterogeneous Nanocrystalline Solid (Sandstone) under the Friction, *Phys. Solid State*, 2017a, vol. 59, is. 5, pp. 955-959, doi: <http://dx.doi.org/10.1134/S1063783417050298>
- Vladimirov V.I., *Fizicheskaya priroda razrusheniya metallov* (The physical nature of the destruction of metals), Moscow: Metallurgiya, 1984, 280 p. [in Russian].
- Wiemer S., Wyss M., Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes, *Adv. Geophys.*, 2002, vol. 45, pp. 259-302.
- Zakrevskii V.A., Shuldiner A.V., Electron emission and luminescence owning plastic deformation of ionic crystals, *Phil. Mag. B.*, 1995, vol. 71, no. 2, pp. 127-138.
- Zhurkov S.N., Kuksenko V.S., Petrov V.A., Physical principles of prediction of mechanical disintegration, *Soviet Physics. Doklady RAS*, 1981, vol. 259, no. 26, pp. 755-757.