

УДК 539.4

## НАНОТРЕЩИНЫ ПРИ РАЗРУШЕНИИ НЕФЕЛИНА

© 2021 г. В.И. Веттегрень<sup>1,2</sup>, А.В. Пономарев<sup>1</sup>, Р.И. Мамалимов<sup>1,2</sup>,  
И.П. Щербаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия  
Автор для переписки: А.В. Пономарев (e-mail: avp@ifz.ru)

Разрушение кристаллов начинается с появления самых мелких – “первичных” трещин. При их объединении образуются все более крупные трещины. Для регистрации “первичных” трещин, возникающих на поверхности кристалла нефелина при разрушении микрокристаллами алмаза, используется метод фрактолюминесценции. В спектре фрактолюминесценции наблюдаются три полосы – 1.4, 1.68 и 1.98 эВ. Полоса 1.98 эВ соответствует возбужденным свободным радикалам  $\equiv\text{Si}-\text{O}^\bullet$ , 1.68 эВ – возбужденным ионам  $\text{Fe}^{3+\bullet}$ , а 1.4 эВ – появляется при заполнении пустых ловушек электронами из зоны проводимости. Эти радикалы, ионы и ловушки возникают при разрушении кристаллических ячеек нефелина и располагаются на поверхности “первичных” трещин. Временные зависимости сигналов фрактолюминесценции представляют собой набор из отдельных сигналов длительностью  $\approx 86$  нс, интервал между которыми изменяется от 0.1 до 1 мкс. Кристалл нефелина имеет гексагональную сингонию и шесть систем плоскостей скольжения дислокаций. При пересечении плоскостей образуется шесть барьеров, препятствующих движению дислокаций. Прорыв каждого барьера вызывает появление “первичной” трещины и возникновение максимума в сигнале фрактолюминесценции. При прорыве шести барьеров образуются кластеры из такого же количества “первичных” трещин. Поэтому сигналы фрактолюминесценции содержат по шесть максимумов. Вначале появляется первая – самая крупная трещина, размеры которой варьируют от  $\approx 9$  до  $\approx 17$  нм, а время роста составляет  $\approx 16$  нс. Размеры остальных, более мелких трещин меньше в 1.7–3.0 раз. Распределение трещин по размерам подчиняется степенному закону с показателем степени равным 6.

**Ключевые слова:** фрактолюминесценция, первичные трещины, нефелин.

### Введение

Динамику трещин в горных породах ранее исследовали в основном методом акустической эмиссии [Журков, Куксенко, Петров, 1981; Lockner et al., 1992; Соболев, Пономарев, 2003; Manthei, Eisenblätter, 2008]. Этот метод позволяет получить информацию о трещинах, размеры которых составляют сантиметры, т.е. сравнимы с длиной акустических волн. Несколько лет назад для изучения более “мелких” (“первичных”) трещин начали использовать метод фрактолюминесценции [Веттегрень и др., 2020а,б, 2021а,б], основанный на регистрации и анализе сигналов фрактолюминесценции, которые появляются при разрушении кристаллов минералов. Оказалось, что размеры трещин, обнаруженных этим методом, варьируют от единиц до нескольких десятков нанометров, а время с момента их возникновения до прекращения роста занимает несколько наносекунд. До последнего времени не было ясно, как образуются “первичные” трещины. Существует несколько моделей появления таких трещин в кристаллах металлов, согласно которым “первичные” трещины возникают при прорыве барьеров, препятствующих движению дислокаций по плоскостям скольжения [Cottrell, 1964; Орлов, 1983; Владимиров, 1984], что было подтверждено анализом сигналов фрактолюминесценции при разрушении кристаллов кварца, низкого альбита и олигоклаза [Веттегрень и др., 2020а,б, 2021а,б].

Цель данной работы – используя метод фрактоллюминесценции, изучить механизм и динамику возникновения “первичных” трещин при разрушении поверхностного слоя нефелина.

### Объект и методы исследования

Нефелин – породообразующий минерал группы каркасных алюмосиликатов, который входит в состав щелочных магматических пород и имеет гексагональную сингонию [Tait et al., 2003; Расцветаева, Аксенов, Чуканов, 2010].

В процессе измерений образец нефелина прижимали к стальной пластине с приклеенными к ее поверхности микрокристаллами алмаза с размерами примерно 7 мкм. Пластина была посажена на ось электромотора, при вращении которого микрокристаллы алмаза разрушали поверхность образца, что приводило к фрактоллюминесценции (рис. 1). Ее спектр регистрировался оптоволоконным спектрометром *AvaSpec-ULSi2048L-USB2 OE*.



Рис. 1. Фрактоллюминесценция при разрушении нефелина

Fig. 1. Fractoluminescence at fracture of nepheline

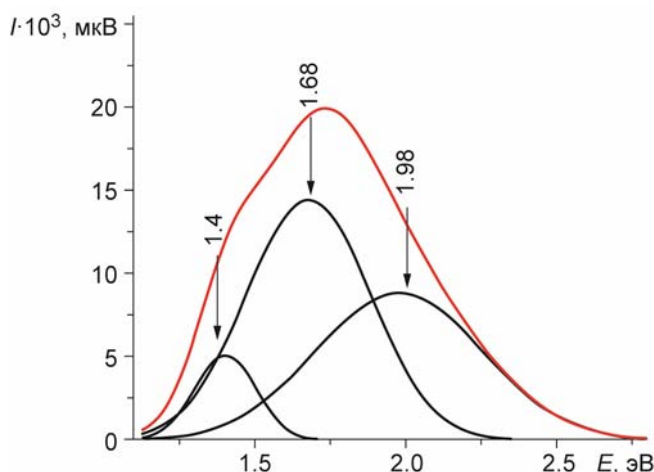
В целях изучения временной зависимости интенсивности сигналов фрактоллюминесценции возникающее при разрушении излучение фокусировалось кварцевой линзой на поверхность фотоэлектронного умножителя ФЭУ-136. Электрическое напряжение на его выходе подавалось на вход аналогово-цифрового преобразователя АСК-3106 и через каждые 2 нс записывалось в память компьютера.

### Спектры фрактоллюминесценции нефелина

Спектр фрактоллюминесценции нефелина показан на рис. 2. В нем наблюдаются три полосы излучения, имеющие гауссову форму: 1.4, 1.68 и 1.98 эВ. Полоса 1.98 эВ соответствует возбужденным свободным радикалам  $\equiv\text{Si-O}^\bullet$  [Stevens Karlceff, Phillips, 1995; Götze, 2012], а 1.68 эВ – возбужденным ионам  $\text{Fe}^{3+\bullet}$ , замещающим ионы  $\text{Si}^{4+}$  в

**Рис. 2.** Измеренный спектр фрактолюминесценции при разрушении поверхности кристалла нефелина (красная кривая) и его разложение на составляющие полосы (черные кривые). Здесь и на рис. 3, 4 на вертикальной оси – интенсивность  $I$ , мкВ

**Fig. 2.** The measured spectrum of fractoluminescence at destruction of a nepheline crystal surface (red curve) and its decomposition into its constituent bands (black curves). Here and in Fig. 3, 4 on the vertical axis – intensity  $I$ ,  $\mu\text{V}$



кристаллических ячейках нефелина [Götze, 2012]. Знак  $\bullet$  здесь обозначает неспаренный электрон на возбужденной орбитали. Полоса 1.4 эВ возникает при заполнении пустых ловушек электронами из зоны проводимости. Ловушки образуются при разрывах Si-Al и Si-O связей [Baril, Huntley, 2003; Andersen, Jain, Tidemand-Lichtenberg, 2012].

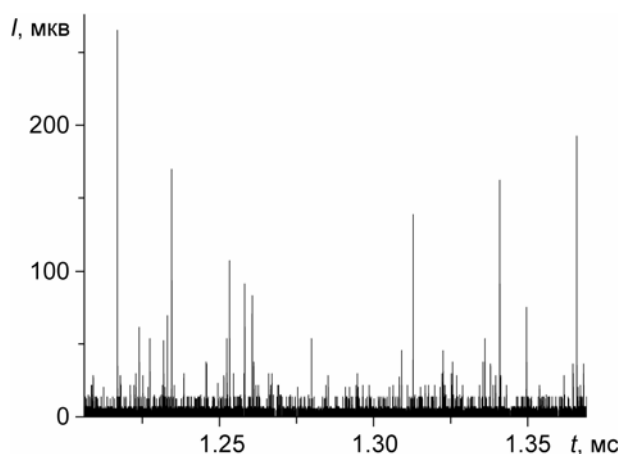
Известно, что кристаллы горных пород содержат дислокации [Hull, Bacon, 2011; Shaocheng, Mainprice, 1988; Zhou, He, 2015], движение которых в нефелине требует разрыва сильных Si-Al связей между атомами. При механических напряжениях и температурах ниже 700 °С, используемых при испытаниях на ползучесть, дислокации не двигаются. Однако в работах [Trépiéd, Doukhan, 1982; Shavva, Grubiy, 2015] было обнаружено, что при сильных напряжениях дислокации в кварце могут перемещаться по плоскостям скольжения на несколько микрометров.

Известно, что в местах пересечения плоскостей скольжения дислокаций, появляются барьеры, препятствующие их движению [Владимиров, 1984; Орлов, 1983]. Дислокации скапливаются перед ними и напряжение в “голове” скопления растет до тех пор, пока не достигнет величины, достаточной для прорыва барьеров [Владимиров, 1984]. При разрушении барьеров химические связи Si-O-Si и Si-Al разрываются, и возникают возбужденные радикалы  $\equiv\text{Si-O}\bullet$  и ионы  $\text{Fe}^{3+\bullet}$ . При переходе электронов с возбужденных орбиталей на основные выделяется энергия в виде фрактолюминесценции. Одновременно при разрывах связей образуются свободные электроны [Kawaguchi, 1998; Shuldiner, Zakrevskii, 1996], часть из которых попадает в зону проводимости и из нее – в ловушки электронов. При попадании электрона в ловушку также выделяется энергия в виде фрактолюминесценции [Andersen, Jain, Tidemand-Lichtenberg, 2012; Baril, Huntley, 2003].

### Динамика сигналов фрактолюминесценции нефелина

Временная зависимость фрактолюминесценции нефелина содержит множество сигналов длительностью около  $86 \pm 2$  нс, интенсивность которых изменяется на порядок (рис. 3). Интервал между сигналами варьирует от 0.1 до 1.0 мкс. Каждый сигнал содержит шесть максимумов, интервал между которыми составляет 10–20 нс. Первый максимум всегда самый интенсивный.

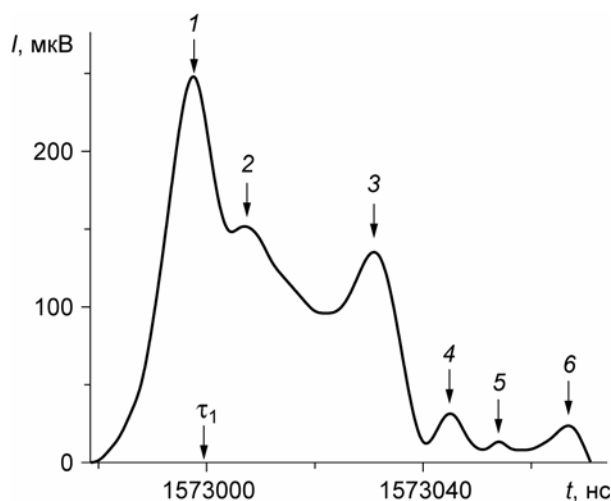
Как же возникают такие сигналы? Кристалл нефелина имеет гексагональную сингонию и шесть основных систем плоскостей скольжения дислокаций:  $(10\bar{1}1)$ ,  $(10\bar{1}0)$ ,  $(0001)$ ,  $(11\bar{2}2)$ ,  $1/3\langle\bar{1}2\bar{1}0\rangle$  и  $1/3\langle\bar{1}\bar{1}23\rangle$  [Фёдоров, Тялин, Тялина, 2004; Яковенчук и др., 2010; Balassone et al., 2014; Rizzi, Saviano, Mondillo, 2014].



**Рис. 3.** Фрагмент временной зависимости интенсивности фрактолюминесценции при разрушении поверхности кристалла нефелина

**Fig. 3.** Fragment of the time dependence of fractoluminescence intensity at destruction of nepheline crystal surface

При пересечении плоскостей может образоваться шесть барьеров, препятствующих движению дислокаций. Прорыв барьеров ведет к возникновению такого же количества “первичных” трещин [Cottrell, 1964; Орлов, 1983, Владимиров, 1984]. Образование каждой трещины вызывает появление максимума в сигналах фрактолюминесценции [Turro, Ramamwrite, Scaiano, 2010]. Каждый сигнал фрактолюминесценции действительно содержит шесть максимумов (рис. 4). Этот результат согласуется с предположением, что “первичные” трещины в нефелине возникают при прорыве дислокациями барьеров, появляющихся при пересечении плоскостей скольжения. Сила, действующая на дислокации пропорциональна произведению  $\cos\alpha\cos\beta$  (фактор Шмида), где  $\alpha$  – угол между направлением внешней силы и плоскостью скольжения, а  $\beta$  – угол между направлением силы и перпендикуляром к ней [Шмид, Боас, 1938].



**Рис. 4.** Сигнал фрактолюминесценции при разрушении нефелина. 1–6 – наблюдаемые максимумы;  $\tau_1$  – время формирования первого максимума

**Fig. 4.** Fractoluminescence signal at fracture of nepheline. 1–6 – observed maxima;  $\tau_1$  – time of formation of the first maximum

Первый максимум в сигналах фрактолюминесценции соответствует трещинам, возникшим, когда дислокации двигались по плоскостям скольжения, величина фактора Шмида для которых максимальна. Остальные сигналы отвечают трещинам, когда величина произведения  $\cos\alpha\cos\beta$  меньше.

### Динамика образования первичных трещин в нефелине

Исследуя временные зависимости интенсивности сигналов фрактолюминесценции, можно изучить динамику роста “первичных” трещин, появление которых приводит к формированию первого максимума. Действительно, при временах  $t < \tau_1$ , где  $\tau_1$  – время формирования первого максимума (см. рис. 4), изменением его интенсивности за счет наложения других максимумов можно пренебречь. Интенсивность сигнала зависит только от скорости двух процессов – увеличивается с ростом трещин и уменьшается при его остановке.

В общем случае зависимость интенсивности фрактолюминесценции  $I_1$  от времени  $t$  имеет вид:

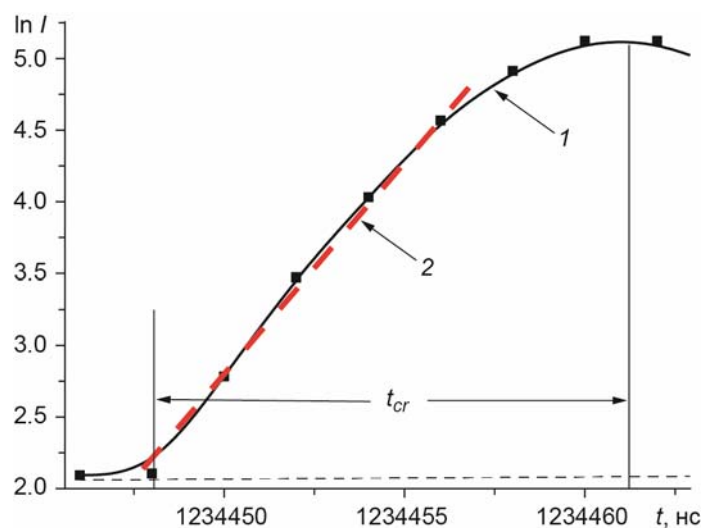
$$I_1(t) = q[(S - s)\exp k_i t - s \exp(-k_r t)],$$

где  $q$  – отношение энергии испущенных фотонов к энергии, затраченной на возникновение “первичной” трещины;  $S$  – площадь поверхности всех трещин, образовавшихся к моменту разрушения образца;  $s$  – площадь поверхности остановившихся трещин к моменту времени  $t$ ;  $k_i$  и  $k_r$  – константы скоростей роста и уменьшения интенсивности фрактолюминесценции, величина которых определяется как  $k \equiv ds/sdt$ .

При  $t < 0.5t_{cr}$  ( $t_{cr}$  – время от начала излучения до достижения максимальной интенсивности фрактолюминесценции) уменьшением интенсивности из-за прекращения роста трещин можно пренебречь. Тогда

$$I_1(t) \approx qS \exp k_i t.$$

Начальный участок временной зависимости интенсивности в произвольно выбранном сигнале при разрушении нефелина показан на рис. 5 в полулогарифмических координатах.



**Рис. 5.** Фрагмент временной зависимости  $\ln I$  первого максимума в полулогарифмических координатах.  $t_{cr}$  – время от начала излучения до достижения максимальной интенсивности фрактолюминесценции. Здесь и на рис. 6: 1 – экспериментальная кривая; 2 – аппроксимирующая линейная зависимость; тонкая штриховая линия – уровень шума

**Fig. 5.** Fragment of the time dependence of  $\ln I$  of the first maximum in semilogarithmic coordinates.  $t_{cr}$  – the time from the beginning of radiation till the maximum of fractoluminescence intensity. Here and in Fig. 6: 1 – experimental curve; 2 – approximating linear dependence; thin dashed line – noise level

Видно, что до значений  $\approx 0.5t_{cr}$  опытные точки укладываются на прямую линию, т.е. зависимость интенсивности  $I$  от времени  $t$  описывается выражением

$$\ln I = \ln(B + qS) + k_i t, \quad (1)$$

в котором  $B$  – интенсивность шумов установки.

При  $t > 0.5t_{cr}$  наблюдаются отклонения от прямой линии, которые вызваны увеличением числа остановившихся трещин. Такая же линейная зависимость логарифма интенсивности начального участка первого максимума от времени наблюдалась и для других сигналов фразтолюминесценции при разрушении поверхности нефелина. Оказалось, что для сигналов с интенсивностью  $I > 170$  мкВ величина  $k_i = 0.47 \pm 0.07$  нс<sup>-1</sup>, а для сигналов с  $I < 130$  мкВ значение  $k_i = 0.25 \pm 0.07$  нс<sup>-1</sup>.

Отметим, что линейная зависимость логарифма интенсивности начального участка первого максимума от времени наблюдалась ранее для кварца и олигоклаза [Веттегрень и др., 2021а,б].

Интенсивность фразтолюминесценции пропорциональна площади поверхности берегов трещин, и из уравнения (1) следует важный вывод – размер площади поверхности “первичных” трещин  $S_{cr}$  растет экспоненциально от времени:

$$S_{cr}(t) = S_0 \exp k_i t, \quad (2)$$

где  $S_0$  – площадь поверхности берегов трещины при слиянии двух первых дислокаций.

Какова же причина подобного вида зависимости  $S_{cr}(t)$ ? Вероятно, первые дислокации проходят через барьер, когда он только начинает разрушаться, сопротивление их слиянию еще значительно, и скорость зарождения трещин мала. Затем, по мере увеличения степени разрушения барьера, скорость слияния дислокаций и роста “первичной” трещины растет.

Измерения показали, что время роста интенсивности первого максимума в сигналах фразтолюминесценции  $t_{cr} \approx 12 \pm 1$  нс (см. рис. 5). Используем это значение  $t_{cr}$ , чтобы оценить размеры “первичных” трещин. Предположим, что при прорыве барьера двумя дислокациями длина трещины увеличивается приблизительно на величину поперечного размера кристаллической решетки нефелина около 1 нм [Самсонова, 1973]. Тогда, как следует из формулы (2), за 12 нс размер самых крупных “первичных” трещин, достигающих значений  $\approx 9$ –17 нм, остальные трещины меньше в 1.7–3.0 раз.

### Распределение сигналов фразтолюминесценции по интенсивности

Распределение размеров трещин при механическом нагружении горных пород детально изучалось с помощью акустоэмиссионных измерений [Lockner et al., 1992; Amitrano, 2003; Соболев, Пономарев, 2003]. Установлено, что зависимость количества акустических сигналов от их амплитуды  $A$ , описывается степенной функцией вида  $N(>A) = a_a A^{-b}$ , в которой  $N(>A)$  – количество акустических сигналов с амплитудой, превышающей  $A$ ;  $a_a$  и  $b$  – константы.

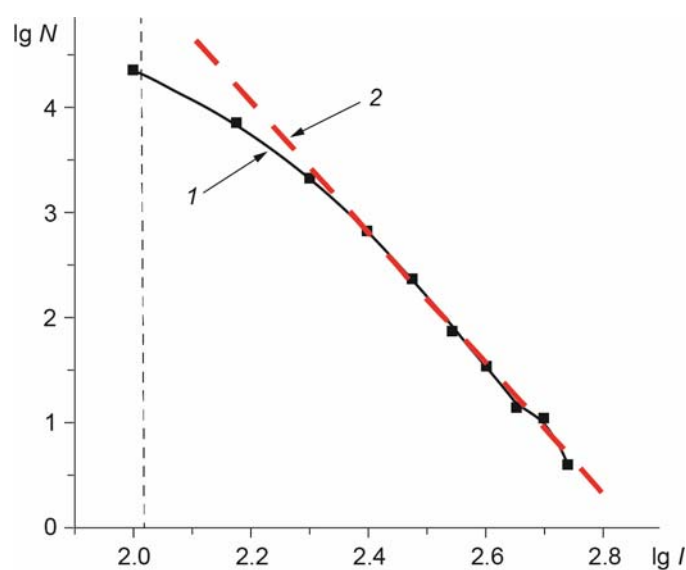
В сейсмологии такое же уравнение известно как закон Гутенберга–Рихтера [Gutenberg, Richter, 1954], связывающий число землетрясений с их магнитудой  $M$ :

$$\lg N = a_e - b_e M.$$

Здесь  $N$  – совокупное число землетрясений с магнитудой, превышающей  $M$ ;  $a_e$  и  $b_e$  – константы, причем  $b_e \approx 1$ . Это соотношение соблюдается при масштабах разрушений с размерами, составляющими миллиметры для лабораторных экспериментов до типичных в сейсмологии десятков километров [Wiemer, Wyss, 2002; Scholz, 2019]. Представляет интерес ответ на вопрос, будет ли оно соблюдаться для трещин с размером порядка нанометров, наблюдаемых методом фразтолюминесценции в нефелине. Поскольку

интенсивность фрактолюминесценции пропорциональна площади поверхности трещин, авторы статьи полагают, что она может служить энергетической характеристикой источника сигнала.

Распределение значений  $\lg I$  для 120000 сигналов фрактолюминесценции показано на рис. 6 в двойных логарифмических координатах. Учитывались только сигналы, интенсивность которых превышала в два раза уровень шума установки. Видно, что при  $\lg I > 2.3$  экспериментальные точки укладываются на прямую линию, т.е. распределение трещин имеет степенной вид  $\lg N = \lg N_0 - b \lg I$ , где  $N_0$  – опытный параметр, величина которого зависит от расположения образца относительно приемника сигнала фрактолюминесценции и его чувствительности. В то же время величина показателя  $b$  не зависит от этих параметров и примерно равна  $6 \pm 0.2$ .



**Рис. 6.** Распределение интенсивности  $I$  первого максимума в сигналах фрактолюминесценции в двойных логарифмических координатах

**Fig. 6.** Distribution of intensity  $I$  of the first maximum in of fractoluminescence signals in double logarithmic coordinates

При значениях  $\lg I < 2.3$  наблюдается отклонение от линейной зависимости, которое, вероятно, вызвано увеличением погрешности измерения амплитуды слабоинтенсивных сигналов.

Обращает на себя внимание то, что значение  $b=6$  значительно больше, чем наблюдаемое для распределения акустических сигналов и землетрясений ( $b_e \approx 1$ ). Какова причина такого различия параметров  $b_e$  и  $b$  в настоящее время не ясно. Во всяком случае, распределение трещин по размерам степенное, что позволяет отнести исследуемые процессы к явлениям саморганизованной критичности.

### Заключение

При разрушении поверхности кристалла нефелина микрокристаллами алмаза образуются кластеры из шести “первичных” трещин, размеры которых варьируют от  $\approx 3$  до  $\approx 17$  нм. Эти трещины возникают при разрушении барьеров, препятствующих движению дислокаций по плоскостям скольжения. Распределение трещин по размерам подчиняется степенному закону с показателем степени  $b=6$ .

### Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-05-00155а) и в рамках государственных заданий Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта и Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Литература

- Веттегрень В.И., Пономарев А.В., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П.* Нанотрешины при разрушении кварца // *Физика Земли*. 2020а. № 6. С.106–112. DOI: 10.31857/S0002333720060125
- Веттегрень В.И., Пономарев А.В., Кулик В.Б., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П.* Разрушение кварцевого диорита при трении // *Геофизические исследования*. 2020б. Т. 21, № 4. С.35–50. <https://doi.org/10.21455/gr2020.4-3>
- Веттегрень В.И., Кадомцев А.Г., Щербаков И.П., Мамалимов Р.И.* Фракто- и фотолюминесценция кварца при разрушении // *Физика твердого тела*. 2021а. Т. 63, № 8. С.1120–1124. DOI: 10.21883/ФТТ.2021.08.51165.060
- Веттегрень В.И., Пономарев А.В., Щербаков И.П., Мамалимов Р.И.* Нанотрешины при разрушении олигоклаза // *Физика Земли*. 2021б. № 6. С.87–92.
- 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 // *Доклады АН СССР*. 1981. Т. 259, № 6. С.1350–1353.
- Орлов А.Н.* Введение в теорию дефектов в кристаллах. М.: Высшая школа, 1983. 144 с.
- Расцветова Р.К., Аксенов С.М., Чуканов Н.В.* Разупорядочение Al и Si в нефелине из Грауляя (Германия) // *Доклады Академии наук*. 2010. Т. 435, № 6. С.760–763.
- Самсонова Н.С.* Минералы группы нефелина. М.: Наука, 1973. 140 с.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
- Фёдоров В.А., Тялин Ю.И., Тялина В.А.* Дислокационные механизмы разрушения двойникующихся материалов. М.: Машиностроение-1, 2004. 336 с.
- Шмид Е., Боас В.* Пластичность кристаллов, в особенности металлических. М.: ГОНТИ НКТП, 1938. 316 с.
- Яковенчук В.Н., Иванюк Г.Ю., Коноплева Н.Г., Корчак Ю.А., Пахомовский Я.А.* Нефелин Хибинского щелочного массива (Кольский полуостров) // *Записки Российского минералогического общества*. 2010. Т. 139, № 2. С.80–91.
- Amitrano D.* Brittle-ductile transition and associated seismicity: Experimental and numerical studies and relationship with the b value. // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2003. V. 108, Issue B1. P.19-1–19-15. doi: 10.1029/2001JB000680
- Andersen M.T., Jain M., Tidemand-Lichtenberg P.* Red-IR stimulated luminescence in K-feldspar: Single or multiple trap origin? // *J. Appl. Phys.* 2012. V. 112, Issue 4. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4745018>
- Balassone G., Kahlenberg V., Altomare A., Mormone A., Rizzi R., Saviano M., Mondillo N.* Nephelines from the Somma-Vesuvius volcanic complex (Southern Italy): crystal-chemical, structural and genetic investigations // *Miner. Petrol.* 2014. V. 108. P.71–90. DOI: 10.1007/s00710-013-0290-6
- Baril M.R., Huntley D.J.* Optical excitation spectra of trapped electrons in irradiated feldspars // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2003. V. 15, N 46. P.8029–8048.
- Cottrell A.H.* Theory of Crystal Dislocations. NY: Gordon and Breach, 1964. 91 p.
- Gutenberg B., Richter C.* Seismicity of the Earth and Associated Phenomena, 2nd ed., NJ: Princeton Univ. Press., 1954. 295 p.



- Götze J. Application of Cathodoluminescence, Microscopy and Spectroscopy in Geosciences // *Microsc. Microanal.* 2012. V. 18, N 6. P.1270–1284.
- Hull D., Bacon D.J. Introduction to Dislocations. Fifth Edition. Elsevier Ltd., 2011. 257 p.
- Kawaguchi Y. Fractoluminescence spectra of crystalline quartz // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1998. V. 37. P.1892–1896.
- Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V., Ponomarev V., Sidorin A. Observations of Quasi-static Fault Growth from Acoustic Emissions // *International geophysics.* 1992. V. 51. P.3–31.
- Manthei G., Eisenblätter J. Acoustic emission in study of rock stability // *Acoustic emission testing.* 2008. P.239–310.
- Rizzi R., Saviano M., Mondillo N. Nephelines from the Somma-Vesuvius volcanic complex (Southern Italy): crystal-chemical, structural and genetic investigations // *Miner. Petrol.* 2014. V. 108. P.71–90. DOI: 10.1007/s00710-013-0290-6
- Shaocheng J., Mainprice D. Natural deformation fabrics of plagioclase: implications for slip systems and seismic anisotropy // *Tectonophys.* 1988. V. 147. P.145–163.
- Scholz C.H. The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge: Cambridge Univ. Press., 2019. 493 p.
- Shavva M.A., Grubiy S.V. Cutting Forces Calculation at Diamond Grinding of Brittle Materials // *Appl. Mechanics and Materials.* 2015. V. 770. P.163–168.
- Stevens Kalceff M.A., Phillips M.R. Cathodoluminescence microcharacterization of the defect structure of quartz // *Phys. Rev.* 1995. V. 52, N 5. P.3122–3134.
- Shuldiner A.V., Zakrevskii V.A. On the mechanism of deformation-induced destruction of colour centres // *Radiation Protection Dosimetry.* 1996. V. 65, N 1–4. P. 113–116.
- Tait K.T., Sokolova E., Hawthorne F.C., Khomyakov A.P. The crystal chemistry of nepheline // *Canad. Mineral.* 2003. V. 41. P.61–70.
- Trépiéd L., Doukhan J.C. Transmission electron microscopy study of quartz single crystals deformed at room temperature and atmospheric pressure by indentations // *J. Physique Lettres. Edpsciences.* 1982. V. 43, N 3. P.77–81.
- Turro N.J., Ramamwrite V., Scaiano J.C. Modern Molecular Photochemistry. Columbia University, NY: University Sci. Press, 2010. 1085 p.
- Zhou Y., He C. Microstructures and deformation mechanisms of experimentally deformed gabbro // *Earthquake Science.* 2015. V. 28, N 2. P.119–127. DOI: 10.1007/s11589-015-0115-2
- Wiemer S., Wyss M. Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes // *Adv. Geophys.* 2002. V. 45. P.259–302.

### Сведения об авторах

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

**ПОНОМАРЁВ Александр Вениаминович** – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (499) 254-24-78. E-mail: avp@ifz.ru

**МАМАЛИМОВ Рустам Исмагилович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1; научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН. 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26. Тел.: +7(812) 292-71-39. 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, ул. Политехническая, д. 26. Тел.: +7 (812) 292-71-39. E-mail: sherba-kov.mhd@mail.ioffe.ru

## NANOCRACKS AT DESTRUCTION OF NEPHELINE

V.I. Vettegren<sup>1,2</sup>, A.V. Ponomarev<sup>1</sup>, R.I. Mamalimov<sup>1,2</sup>, I.P. Shcherbakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Ioffe Physical Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia*

*Corresponding author: A.V. Ponomarev (e-mail: avp@ifz.ru)*

**Abstract.** The fracture process of crystals begins from the formation of the smallest – “primary” cracks. All larger cracks are formed when these “primary” cracks unite. To register “primary” cracks that appear on the surface of a nepheline crystal at destruction by diamond microcrystals, the fractoluminescence method is used. Fractoluminescence spectrum consists of three bands: 1.4, 1.68 and 1.98 eV. The 1.98 eV band corresponds to excited free radicals  $\equiv\text{Si-O}^\bullet$ , 1.68 eV corresponds to excited  $\text{Fe}^{3+\bullet}$  ions, and 1.4 eV occurs when empty traps are filled with electrons from the conduction band. These radicals, ions and traps appear at fracture of nepheline lattice cells and are located on the surface of the “primary” cracks. The time dependences of the fractoluminescence signals consist of separate signals. The duration of each signal was  $\approx 86$  ns. The interval between the signals varies from 0.1 to 1  $\mu\text{s}$ . The nepheline crystal has hexagonal syngonia and six systems of dislocation slip planes. At the intersection of these planes, six barriers are formed that prevent the movement of dislocations. The breaking of each barrier causes the appearance of a “primary” crack and the formation of a maximum in the fractoluminescence signal. When six barriers are broken, clusters are formed from the same number of “primary” cracks. Therefore, fractoluminescence signals contain six maxima. At first, the largest crack appears. Its dimensions range from  $\approx 9$  to  $\approx 17$  nm. The growth time of such crack is  $\approx 16$  ns. The remaining, smaller cracks have sizes 1.7 to 3.0 times smaller. The size distribution of cracks follows a power law with an exponent equal to 6.

**Keywords:** fractoluminescence, primary cracks, nepheline.

### Funding

This work was carried out with financial support of the Russian Foundation for Basic Research (grant no. 20-05-00155a) and within the framework of state assignments of Schmidt Institute of Physics of the Earth and Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences.

### Conflict of interest

The authors declare they have no conflict of interest.

### References

- Amitrano D., Brittle-ductile transition and associated seismicity: Experimental and numerical studies and relationship with the b value, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2003, vol. 108, iss. B1, pp. 19-1-19-15. doi: 10.1029/2001JB000680.2003
- Andersen M.T., Jain M., Tidemand-Lichtenberg P., Red-IR stimulated luminescence in K-feldspar: Single or multiple trap origin?, *J. Appl. Phys.*, 2012, vol. 112, iss. 4. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4745018>
- Balassone G., Kahlenberg V., Altomare A., Mormone A., Rizzi R., Saviano M., Mondillo N., Nephelines from the Somma-Vesuvius volcanic complex (Southern Italy): crystal-chemical, structural and genetic investigations, *Miner. Petrol.*, 2014, vol. 108, pp. 71-90. DOI: 10.1007/s00710-013-0290-6
- Baril M.R., Huntley D.J., Optical excitation spectra of trapped electrons in irradiated feldspars, *J. Phys.: Condens. Matter.*, 2003, vol. 15, no. 46, pp. 8029-8048.
- Cottrell A.H., *Theory of Crystal Dislocations*, NY: Gordon and Breach, 1964, 91 p.

- Fedorov V.A., Tyalin Yu.I., Tyalina V.A., *Dislokatsionnye mekhanizmy razrusheniya dvoynikuyushchikhsya materialov* (Dislocation mechanisms of twinning materials destruction), Moscow: Mashinostroenie-1, 2004, 336 p. [In Russian].
- Götze J., Application of Cathodoluminescence, Microscopy and Spectroscopy in Geosciences, *Microsc. Microanal.*, 2012, vol. 18, no. 6, pp. 1270-1284.
- Gutenberg B., Richter C., *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena, 2nd ed.*, NJ: Princeton Univ. Press., 1954, 295 p.
- Hull D., Bacon D.J., *Introduction to Dislocations Fifth Edition*, Elsevier Ltd, 2011, 257 p.
- Kawaguchi Y., Fractoluminescence spectra in crystalline quartz, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1998, vol. 37, pp. 1892-1896.
- Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V., Ponomarev V., Sidorin A., Observations of Quasi-static Fault Growth from Acoustic Emissions, *International geophysics*, 1992, vol. 51, pp. 3-31.
- Manthei G., Eisenblätter J., Acoustic emission in study of rock stability, *Acoustic emission testing*, 2008, pp. 239-310.
- 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].
- Rastsvetaeva R.K., Aksenov S.M., Chukanov N.V., Disordering of Al and Si in nepheline from Grauliai (Germany), *Doklady Chemistry*, 2010, vol. 435, Part 2, pp. 339-342. DOI: 10.1134/S0012500810120074
- Rizzi R., Saviano M., Mondillo N., Nephelines from the Somma-Vesuvius volcanic complex (Southern Italy): crystal-chemical, structural and genetic investigations, *Miner. Petrol.*, 2014, vol. 108, pp. 71-90. DOI: 10.1007/s00710-013-0290-6.
- Samsonova N.S., *Mineraly gruppy nefelina* (Minerals of the nepheline group), Moscow: Nauka, 1973, 140 p. [In Russian].
- Scholz C.H., *The mechanics of earthquakes and faulting*, Cambridge: Cambridge Univ. Press., 2019, 493 p.
- Shaocheng J., Mainprice D., Natural deformation fabrics of plagioclase: implications for slip systems and seismic anisotropy, *Tectonophysics*, 1988, vol. 147, pp. 145-163.
- Shavva M.A., Grubiy S.V., Cutting Forces Calculation at Diamond Grinding of Brittle Materials, *Appl. Mechanics and Materials*, 2015, vol. 770, pp. 163-168.
- Shmidt E., Boas W., *Kristallplastizität: Mit Besonderer Berücksichtigung der Metalle*, Berlin: Springer, 1935, 316 p.
- Sobolev G.A., Ponomarev A.V., *Fizika zemletryaseni i predvestniki* (Physics of earthquakes and precursors), Moscow: Nauka, 2003, 270 p. [In Russian].
- Stevens Kalceff M.A., Phillips M.R., Cathodoluminescence microcharacterization of the defect structure of quartz, *Phys. Rev.*, 1995, vol. 52, no. 5, pp. 3122-3134.
- Shuldiner A.V., Zakrevskii V.A., On the mechanism of deformation-induced destruction of colour centres, *Radiation Protection Dosimetry*, 1996, vol. 65, no. 1-4, pp. 113-116.
- Tait K.T., Sokolova E., Hawthorne F.C., Khomyakov A.P., The crystal chemistry of nepheline, *Canad. Mineral.*, 2003, vol. 41, pp. 61-70.
- Trépiéd L., Doukhan J.C., Transmission electron microscopy study of quartz single crystals deformed at room temperature and atmospheric pressure by indentations, *J. Physique Lettres. Edpsciences*, 1982, vol. 43, no. 3, pp. 77-81.
- Turro N.J., Ramamwrite V., Scaiano J.C., *Modern Molecular Photochemistry*, Columbia University, NY: University Sci. Press, 2010, 1085 p.
- Vettegren V.I., Kadomtsev A.G., Mamalimov R.I., Shcherbakov I.P., Fracto- and photoluminescence at fracture of quartz, *Phys. Solid State*, 2021a, vol. 63, no. 8, pp. 1120-1124.
- Vettegren V.I., Ponomarev A.V., Kulik V.B., Mamalimov R.I., Shcherbakov I.P., Destruction of quartz diorite at friction, *Geophysical Research*, 2020b, vol. 21, no. 4, pp. 35-50. <https://doi.org/10.21455/gr2020.4-3> UDC 539.4
- Vettegren V.I., Ponomarev A.V., Kulik V.B., Mamalimov R.I., Shcherbakov I.P., Nanocracks of oligoclase fracture, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2021b, vol. 6. (In print).
- Vettegren V.I., Ponomarev A.V., Mamalimov R.I., Shcherbakov I.P., Nanocracks upon Fracture of Quartz, *Izvestiya. Phys. Solid Earth*, 2020a, vol. 56, no. 6, pp. 827-832.
- Vladimirov V.I., *Fizicheskaya priroda razrusheniya metallov* (Physical nature fracture 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.
- Yakovenchuk V.N., Ivanyuk G.Yu., Konopleva N.G., Korchak Yu.A., Pakhomovsky Ya.A., Nepheline of the Khibiny alkaline massif (Kola Peninsula), *Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva* (Proceedings of Russian Mineralogical Society), 2010, vol. 139, no. 2, pp. 80-91. [In Russian].

Zhou Y., He C., Microstructures and deformation mechanisms of experimentally deformed gabbro, *Earthquake Science*, 2015, vol. 28, no. 2, pp. 119-127. DOI: 10.1007/s11589-015-0115-2

Zhurkov S.N., Kuksenko V.S., Petrov V.A., Physical principles of prediction of mechanical disintegration, *Soviet Physics Doklady*, 1981, vol. 26, pp. 755-757.

#### *About the authors*

**VETTEGREN Victor Ivanovich** – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia; Professor, Leading Researcher, Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences. Politekhnikeskaya str., 26, St Petersburg 194021, Russia. Ph.: +7(921) 949-20-87. E-mail: victor.vettegren@mail.ioffe.ru

**PONOMAREV Alexander Veniaminovich** – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Head of the laboratory, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia. Ph.: +7(499) 254-24-78. E-mail: avp@ifz.ru

**MAMALIMOV Rustam Ismagilovich** – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia; Senior Researcher, Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences. Politekhnikeskaya str., 26, St Petersburg 194021, Russia. Ph.: +7(812) 292-71-39. E-mail: mamalun@mail.ru

**SHCHERBAKOV Igor Petrovich** – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences. Politekhnikeskaya str., 26, St Petersburg 194021, Russia. Ph.: +7(812) 292-71-39. E-mail: sherba-kov.mhd@mail.ioffe.ru