

УДК 539.4

МИКРОТРЕЩИНЫ В БАЗАЛЬТЕ И ТОНАЛИТЕ ПРИ ТРЕНИИ

© 2019 г. В. И. Веттегрень^{1,2}, А. В. Пономарев^{1*}, Р. И. Мамалимов^{1,2},
И. П. Щербаков¹, К. Арора³ (K. Arora), Д. Шринагеш³ (D. Srinagesh),
Р. К. Чадда³ (R. K. Chadha)

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

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

³Национальный геофизический исследовательский институт, г. Хайдарабад, Индия

*E-mail: avp@ifz.ru

Поступила в редакцию 25.03.2019 г.

Принята в печать 22.06.2019 г.

При помощи люминесценции проведены исследования скорости роста и размеров микротрещин, образующихся в поверхностном слое базальта и тоналита (гранодиорита) при трении. Найдено, что при разрушении кристаллических решеток лабрадора и кварца, входящих в состав этих пород, возникают сигналы триболюминесценции. Каждый сигнал соответствует «зародышевой» микротрещине, поверхность которой содержит электронно-возбужденные свободные радикалы $\equiv \text{Si}-\text{O}^-$, ионы Fe^{3+} и ловушки электронов. Средняя скорость роста «зародышевых» микротрещин в базальте варьирует от ≈ 0.6 до ≈ 1 км/с, а в тоналите – от ≈ 0.7 до ≈ 1.3 км/с. Размеры «зародышевых» микротрещин в базальте заключены в пределах от ≈ 3 до ≈ 5.5 мкм, а в тоналите – от ≈ 3.5 до ≈ 6.5 мкм.

Ключевые слова: люминесценция, «зародышевые» микротрещины, ловушки электронов, триболюминесценция.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019676-83>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время установлено, что процесс разрушения металлов, полимеров и неорганических кристаллов начинается с рождения, роста и объединения мельчайших трещин с размерами от ≈ 100 нм до нескольких мкм [Регель и др., 1974; Журков и др., 1981; Черемской и др., 1990; Петров и др., 1993; Бетехтин, Кадомцев, 2005]. Процесс образования и накопления трещин в горных породах был исследован методами акустической эмиссии [Куксенко и др., 1983; Lockner et al., 1992; Lockner, 1993; Соболев, Пономарев, 1999; 2003; Lei, Ma, 2014; и др.]. Эти методы позволяют получить информацию о трещинах, размеры которых сравнимы с длиной упругих волн, и поэтому нечувствительны к трещинам, размеры которых меньше 30 мкм [Веттегрень и др., 2012а; 2016]. По этой причине процесс образования и роста таких микротрещин в горных породах до последнего времени оставался слабо изученным. Перспективным для решения этой проблемы может быть метод

регистрации и анализа сигналов люминесценции, возникающей при трении горных пород.

Явление триболюминесценции кристаллических веществ известно с 1600 г., когда Cascariolo V. наблюдал свечение при измельчении барита [Beckman, 1846]. С развитием экспериментальной техники и физических методов исследований началось изучение спектров свечения и кинетики люминесценции [Longchambon, 1925; Абрамова и др., 1998; 1999; Беляев и др., 1962; Веттегрень и др., 2009; Молоцкий, 1983; Chudáček, 1967; Chapman, Walton, 1993; Chandra, Zink, 1980; Hardy, Zink, 1976; Kawaguchi Y., 1995; 1998а; б; Langford et al., 1989; Toyoda et al., 2000; Sweeting, Guido, 1985; Zakrevskii, Shuldiner, 1995]. Было обнаружено, что свечение носит характер внезапных вспышек, возникает на стадии хрупкого разрушения кристаллов при образовании микротрещин и наблюдается у многих минералов, хотя механизм явления остается недостаточно изученным [Мартышев, 1965; Пархоменко, 1968; Пархоменко, Мартышев, 1975; Sage, Bourhill, 2011].

Как показали исследования последних лет [Веттегрень и др., 2011; 2012а; б; 2016; 2017а; б; в; 2018], метод люминесценции позволяет наблюдать образование и рост микротрещин с размерами от одного до нескольких мкм. Цель данной работы – исследование скорости роста и определение размеров микротрещин, образующихся при трении базальта и тоналита.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образец порфировидного, равномерно и мелко-среднезернистого базальта отобран из скважины, пробуренной в области Латур (Махараштра, Индия), с глубины 209 м. Основная масса породы (50–60%) образована плагиоклазом основного состава (лабрадор), который представлен мелкими призмочками, иногда таблитчатыми зернами, с характерным размером несколько мкм, беспорядочно расположенными в породе. Между кристаллами плагиоклаза находятся мелкие изометричные скопления агрегатов авгита (до 30% породы). Размеры зерен авгита – несколько мкм. Рудный минерал составляет 10% породы и рассеян по всей поверхности шлифа. Бурое вулканическое стекло составляет до 10% породы. Структура основной массы – долевитовая.

Второй образец исследованной породы представлен лейкократовым тоналитом, слабо-гнейсовидным, средне-кристаллическим, извлеченным с глубины 614 м. Кристаллы плагиоклаза имеют размер около 600 мкм, имеются полисинтетические двойники. Зерна кварца размером от 100 до 800 мкм и более часто наблюдаются в виде реликтов в плагиоклазе и калиевом полево-м шпате. Состав породы: плагиоклаз ряда андезин–лабрадор – (45–50)%; кварц – (15–20)% в виде ориентированных зерен; калиевый полевой шпат (ортоклаз) – (12–15)%; хлоритизированный амфибол и биотит (1–2)%; акцессорные примеси (апатит, сфен, циркон; титанит) \approx 1%.

Фотографии шлифов представлены на рис. 1 и рис. 2.

Для исследования механизма и динамики трения из обеих пород были изготовлены диски и стержни. Диски имели толщину 18 мм, с отверстием в центре для посадки на ось электромотора. Диаметр диска из базальта составлял 42 мм, а из тоналита – 41 мм. Стержни имели длину 45 мм и диаметр 9.5 мм, концы стержней затачивались на точильном круге до диаметра \approx 2 мм. Диски закрепляли на оси электромотора, включали его и затем к образующей поверхности

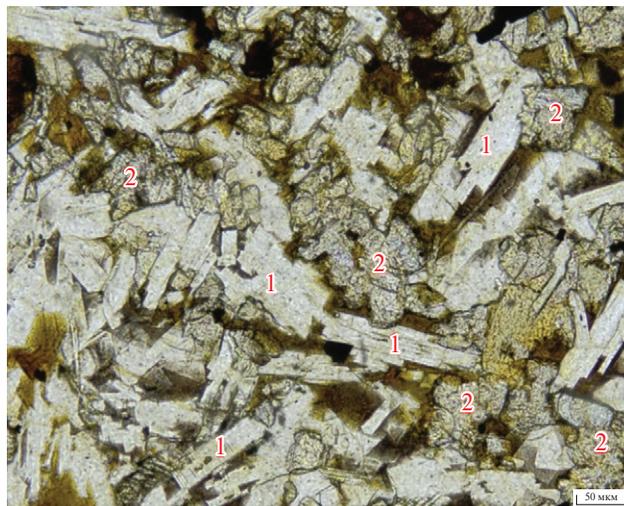


Рис. 1. Фотография шлифа базальта. Увеличение 10. Призмы плагиоклаза (1) и авгита (2) хаотически расположены в породе.

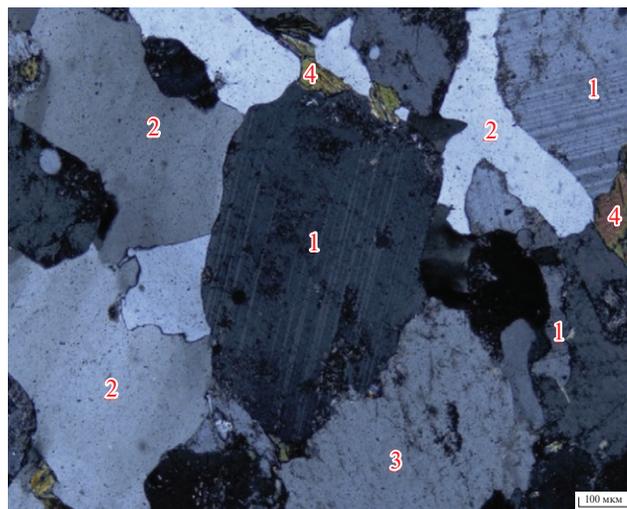


Рис. 2. Фотография шлифа тоналита. Увеличение 5. Кристалл плагиоклаза в центре (1) на контакте с калиевым полевым шпатом (3) в окружении ксеноморфных зерен кварца (2) и чешуек биотита (4).

диска прижимали стержень из той же породы. Линейная скорость движения образующей поверхности диска из базальта $V_d \approx 6.5$ м/с, а из тоналита – ≈ 6.3 м/с. В момент касания стержня к диску возникала триболюминесценция (рис. 3). Спектр триболюминесценции регистрировали оптоволоконным спектрометром AvaSpec-ULSi2048 L-USB2 OE.

Ранее выполненные исследования показали, что излучение при трении лежит в видимой области спектра [Веттегрень и др., 2011; 2012а; б; 2016; 2017а; б; в; 2018]. Для регистрации временной изменчивости интенсивности

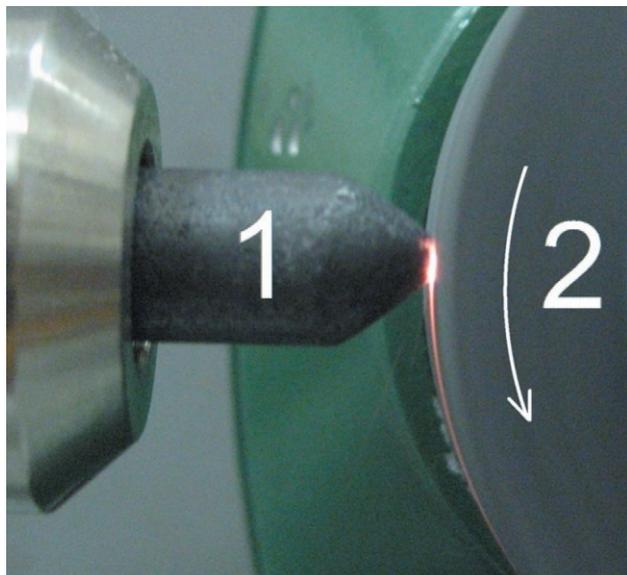


Рис. 3. Фотография триболомлюминесценции при трении тоналита — свечение с красноватой каймой в месте контакта стержня (1) и вращающегося диска (2).

триболомлюминесценции излучение через кварцевый световод подавалось на поверхность фотоэлектронного умножителя ФЭУ 136, который обладает наибольшей чувствительностью в этой области спектра [Аксененко, Бараночников, 1987]. С выхода ФЭУ сигнал подавался на вход аналогово-цифрового преобразователя АЦП-3112, позволяющего оцифровывать сигнал с разрешением 2 нс. Сигнал с выхода АЦП записывался в память персонального компьютера для дальнейшей обработки и хранения.

Чтобы оценить скорость роста микротрещин, нам потребуется определить скорость поперечных упругих волн. Ее измеряли при помощи генератора-приемника ультразвуковых сигналов «Olympus 5072 PR» и пар датчиков *P*- и *S*-волн «Panametrics» с собственной частотой 1 МГц, один из которых использовался как излучатель, а второй являлся приемником колебаний. Датчик-источник преобразует импульсный электрический сигнал с выхода генератора в ультразвуковой сигнал, а сигнал с датчика-приемника подается на вход усилителя и далее регистрируется цифровым осциллографом. Датчики располагались на торцах кернов, из которых впоследствии были изготовлены диски. Измерения показали, что скорость поперечной упругой волны для образца базальта составляла 3.3 км/с, а для тоналита 3.9 км/с.

Прежде чем перейти к изложению полученных результатов, нужно отметить, что, если давление стержня на вращающийся диск превышало

некоторое критическое значение, определяемое опытным путем для каждой породы, число сигналов люминесценции резко возрастало. В этом случае они налагались друг на друга, что не позволяло исследовать каждый сигнал в отдельности. Опытным путем было найдено, что пригодные для анализа сигналы триболомлюминесценции наблюдаются, когда давление стержня на диск не превышает 1 МПа. Описанные ниже результаты получены при давлении ≈ 1 МПа.

ПРИРОДА СИГНАЛОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Спектры триболомлюминесценции, возникающей при трении базальта и тоналита, показаны на рис. 4. Они состоят из нескольких, наложенных друг на друга полос, которые имеют гауссову форму. Это позволяет разложить наблюдаемый спектр на сумму полос и определить энергию их максимумов [Turro et al., 2010].

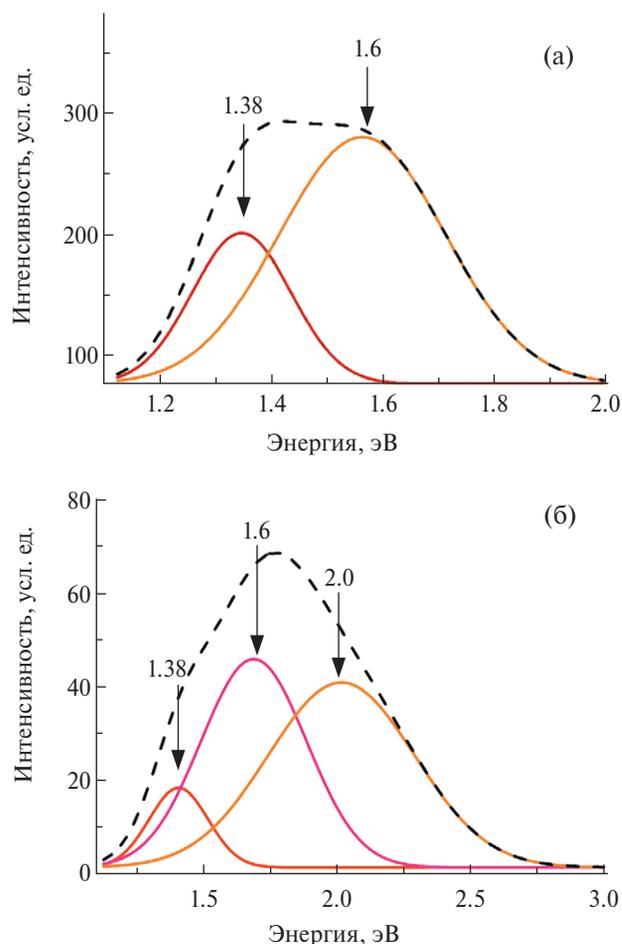


Рис. 4. Спектры излучения при трении базальта (а) и тоналита (б). Пунктир — наблюдаемый спектр, сплошные линии — результат разложения на составные полосы.

Максимум 1.6 эВ появляется при релаксации электронного возбуждения в ионах Fe^{3+} , замещающих ионы Si^{4+} в кристаллических ячейках лабрадора [Götze, 2012]. Максимум 2 эВ возникает при релаксации электронного возбуждения радикалов $\equiv Si-O^{\cdot-}$, образующихся при разрывах $Si-O-Si$ связей в лабрадоре [Götze, 2012]. Максимум 1.38 эВ соответствует излучению при переходе электронов из зоны проводимости лабрадора в ловушки электронов. Как устроены ловушки в лабрадоре, неизвестно. Ими могут являться, например, свободные радикалы $-O-Si^{2+}$ или ионы Fe^{3+} [Huntley et al., 1985; 2007; Trautmann et al., 1999; Varil et al., 2003].

Таким образом, интенсивность сигналов люминесценции при трении базальта и тоналита представляет собой сумму интенсивностей полос, соответствующих возбужденным свободным радикалам $\equiv Si-O^{\cdot-}$, ионам Fe^{3+} и ловушкам электронов. Эти радикалы, ионы и ловушки образуются при разрушении кристаллических решеток лабрадора.

Поскольку все указанные радикалы, ионы и ловушки располагаются в поверхностном слое микротрещин [Веттегрень и др., 2011; 2012а; б; 2016; 2017а; 2017б; 2018в; 2018], то интенсивность сигнала триболюминесценции пропорциональна площади их поверхности.

СКОРОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ И РАЗМЕРЫ МИКРОТРЕЩИН

Фрагменты временных зависимостей интенсивности сигналов люминесценции при трении базальта и тоналита показаны на рис. 5. Они состоят из сотен сигналов длительностью $\approx (44-46)$ нс (рис. 6). Каждый из них содержит от 4 до 5 наложенных друг на друга максимумов. Это означает, что при трении образуются группы из 4 или 5 микротрещин. Причина появления таких групп микротрещин неясна. Но в настоящее время известно, что при пересечении плоскостей скольжения дислокаций или их выходе на границу кристаллов создаются барьеры, препятствующие их движению. Микротрещины

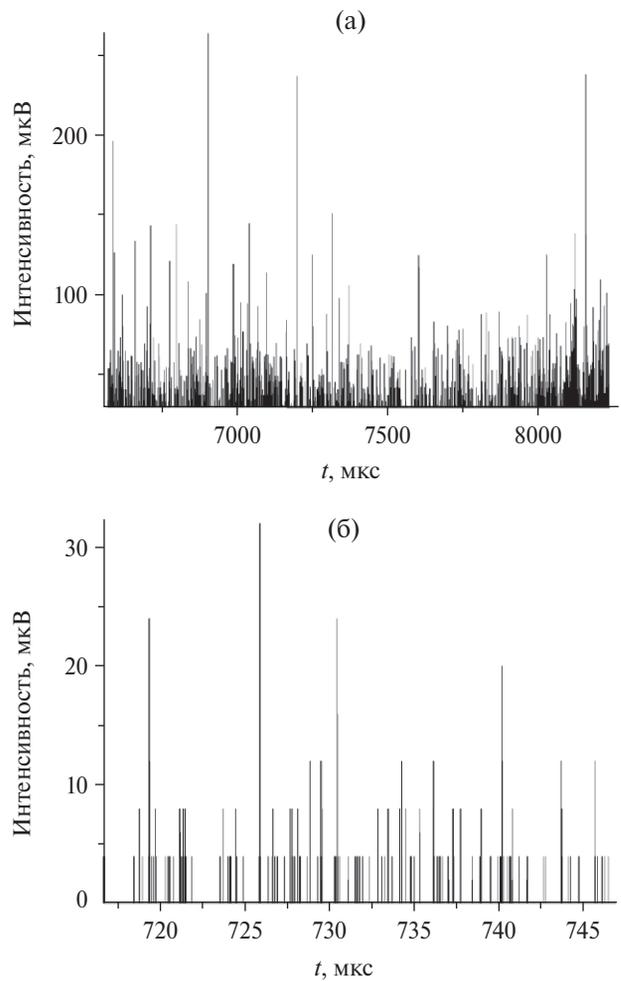


Рис. 5. Фрагменты временных зависимостей интенсивности триболюминесценции при трении базальта (а) и тоналита (б).

возникают при прорыве таких барьеров [Stroh, 1957; Cottrel, 1964]. Можно предположить, что появление таких групп микротрещин связано с тем, что в кристаллах минералов в базальте и тоналите существует 4 или 5 плоскостей скольжения, при пересечении которых образуются барьеры, прорыв которых ведет к появлению зародышевых микротрещин.

Рассмотрим более подробно временную зависимость интенсивности первого максимума.

Таблица 1. Скорости роста максимумов люминесценции – dI/dt и микротрещин – dL/dt в базальте и тоналите

| Порода | $(dI/dt)_{\min}$ | $\langle dI/dt \rangle$ | $(dI/dt)_{\max}$ | $(dL/dt)_{\min}$ | $\langle dL/dt \rangle$ | $(dL/dt)_{\max}$ |
|---------|------------------|-------------------------|------------------|------------------|-------------------------|------------------|
| | мкВ/нс | | | км/с | | |
| Базальт | 12.5 | 21 | 42.5 | 0.6 | 0.8 | 1.1 |
| Тоналит | 2.5 | 4.7 | 7.5 | 0.7 | 1 | 1.3 |

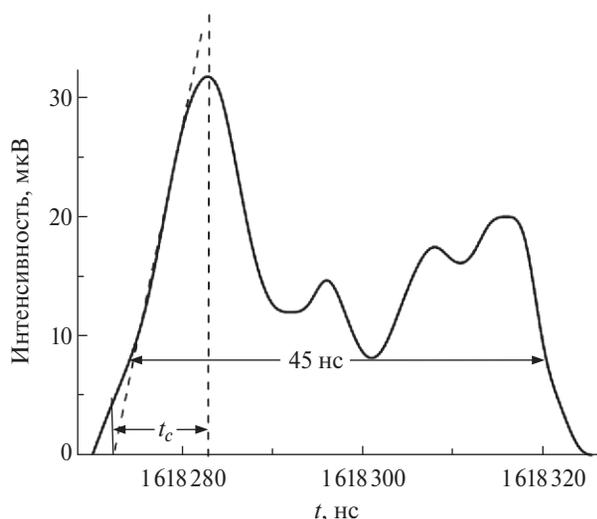


Рис. 6. «Одиночный» сигнал люминесценции при трении тоналита.

Она обусловлена временной зависимостью двух противоположных процессов. Первый – рост интенсивности триболюминесценции при увеличении площади поверхности микротрещины. Второй – затухание интенсивности, которое связано с остановкой роста микротрещины. Оно вызвано конечным временем «жизни» свободных радикалов и ионов в электронно-возбужденном состоянии и заполнением ловушек. Когда скорость роста интенсивности максимальна, вкладом последних двух процессов можно пренебречь [Антонов-Романовский, 1966]. Тогда, дифференцируя начальный участок первого максимума, можно найти максимальную скорость его роста – dI/dt , где I – интенсивность триболюминесценции, которая пропорциональна скорости роста площади поверхностного слоя микротрещины, а t – время.

На рис. 7 показаны распределения dI/dt , а в табл. 1 – минимальное – $(dI/dt)_{\min}$, среднее – $\langle dI/dt \rangle$ и максимальное – $(dI/dt)_{\max}$ значения скорости. Видно, что скорость роста интенсивности, а значит, и скорость роста площади микротрещин, в обеих породах изменяется примерно в три раза.

Оценим скорость роста линейного размера микротрещин – dL/dt . Ее можно вычислить как

$$dL/dt = Q\sqrt{dI/dt}, \quad (1)$$

где Q – коэффициент пропорциональности.

Согласно [Регель и др., 1974] значение предельной скорости роста $(dL/dt)_{\lim}$ микротрещин

Таблица 2. Размеры микротрещин L в базальте и тоналите

| Порода | L_{\min} | $\langle L \rangle$ | L_{\max} |
|---------|------------|---------------------|------------|
| | МКМ | | |
| Базальт | 3 | 4 | 5.5 |
| Тоналит | 3.5 | 5 | 6.5 |

в твердых телах, полученное опытным путем, составляет $\approx 1/3$ скорости поперечной упругой волны. Предположим, что это соотношение справедливо и для лабрадора. Тогда полученные значения dI/dt можно использовать для грубой оценки скорости роста dL/dt трещин в базальте и тоналите. Полученные предельные значения скорости роста сигналов триболюминесценции $(dI/dt)_{\max}$ составляют для базальта 42.5 мкВ/нс и для тоналита 7.5 мкВ/нс (рис. 7).

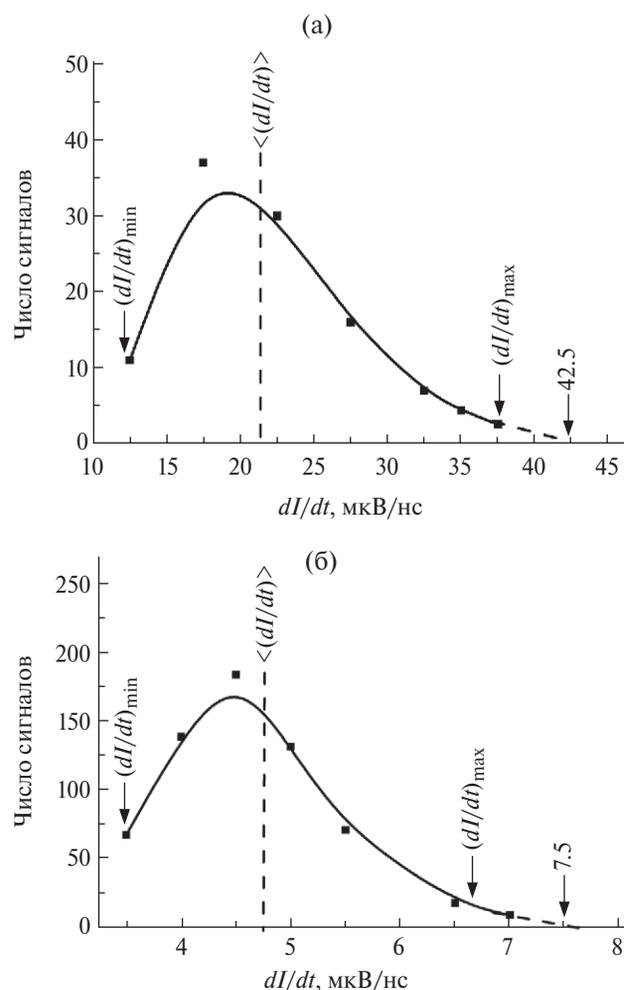


Рис. 7. Распределения скоростей dI/dt роста интенсивности максимумов триболюминесценции при трении базальта (а) и тоналита (б).

Тогда для базальта имеем следующее уравнение:

$$1100 \text{ нм/нс} = Q_6 (42.5 \text{ мкВ/нс})^{1/2}.$$

Откуда получаем $Q_6 = 169 \text{ нм}/(\text{мкВ} \cdot \text{нс})^{1/2}$.
Аналогично для тоналита

$$1300 \text{ нм/нс} = Q_T (7.5 \text{ мкВ/нс})^{1/2}.$$

И, значит, $Q_T = 475 \text{ нм}/(\text{мкВ} \cdot \text{нс})^{1/2}$.

Знание Q_6 и Q_T позволяет оценить согласно рис. 7 по формуле (1) значения скорости роста микротрещин в базальте и тоналите. В табл. 1 приведены оценочные значения минимальной $(dL/dt)_{\min}$, средней $\langle dL/dt \rangle$ и максимальной $(dL/dt)_{\max}$ скорости роста трещин в исследованных породах. Видно, что скорость роста трещин в обеих породах изменяется примерно в 1.8 раза.

Чем же вызвана вариация скорости роста микротрещин? Как уже упоминалось, микротрещины создаются при прорыве барьеров, препятствующих движению дислокаций [Stroh, 1957; Cottrell, 1964]. Скорость роста трещин определяется скоростью перехода дислокаций в микротрещину после прорыва барьера. Чем больше число дислокаций в скоплении, тем больше величина локальных напряжений и скорость роста микротрещины. По-видимому, вариация скоростей роста микротрещин отражает вариацию величины барьеров в исследованных породах.

Оценим время роста микротрещин — t_c . С этой целью проведем касательную к интенсивности, как показано на рис. 6. Продолжим ее до пересечений с осью времени и вертикальной прямой, проведенной через точку с максимальной интенсивностью I_m . Тогда отрезок t_c на оси времени будет приблизительно равен времени роста интенсивности сигнала люминесценции. Характерное время t_c для базальта и тоналита оказалось приблизительно одинаковым и составило ≈ 5 нс. Размеры микротрещин можно вычислить как $L = (dL/dt) \cdot t_c$. Найденные таким способом размеры самых мелких — L_{\min} , средних — $\langle L \rangle$ и самых крупных — L_{\max} трещин приведены в табл. 2. Из нее следует, что размеры микротрещин в базальте заключены в пределах от ≈ 3.5 до 5 мкм, а в тоналите — от 3.5 до 6.5 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При трении в поверхностном слое базальта и тоналита образуются микротрещины с линейными размерами от ≈ 3 до ≈ 7 мкм. Скорость их роста изменяется от ≈ 0.6 до ≈ 1 км/с в базальте и от ≈ 0.7 до ≈ 1.3 км/с в тоналите.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят М.А. Матвеева за петрографическое описание шлифов, М.А. Краснову и Д.Е. Белобородова за измерение скоростей ультразвуковых волн в образцах. З.-Ю.Я. Майбук и А.Ан. Хромов подготовили диски и стержни пород для экспериментов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данное исследование начиналось в 2018 г. при поддержке грантом РНФ-DST (Индия) № 16-47-02003 и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-05-00137) и завершилось в рамках государственных заданий (получение и анализ спектров, описание и интерпретация данных, технические измерения).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамова К.Б., Русаков А.И., Семенов А.А., Щербаков И.П. Люминесценция металлов, возбуждаемая при быстром неразрушающем нагружении // Физика твердого тела. 1998. Т. 40. № 6. С. 957–965.
- Абрамова К.Б., Веттегрень В.И., Щербаков И.П., Рахимов С.Ш., Светлов В.Н. Механолюминесценция и субмикрорельеф поверхности меди // Журнал технической физики. 1999. Т. 69. Вып. 12. С. 102–104.
- Аксененко М.Д., Бараночников М.Л. Приемники оптического излучения. Справочник. М.: Радио и связь. 1987. 245 с.
- Антонов-Романовский В.В. Кинетика фотолюминесценции кристаллофосфоров. М.: Наука. 1966. 324 с.
- Беляев Л.М., Набатов В.В., Мартышев Ю.Н. О времени свечения в процессах трибо- и кристаллолюминесценции // Кристаллография. 1962. Т. 4. Вып. 7. С. 576–580.
- 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., Савицкий А.В., Щербаков И.П., Мамалимов Р.И. Триболюминесценция полимеров и композитов // Вопросы материаловедения. 2009. Т. 57. № 1. С. 141–145.
- Веттегрень В.И., Куксенко В.С., Щербаков И.П. Кинетика эмиссии света, звука и радиоволн из монокристалла

- кварца после удара по его поверхности // Журнал технической физики. 2011. Т. 81. Вып. 4. С. 148–151.
- Веттегрень В.И., Куксенко В.С., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П.* Динамика фразтолюминесценции, электромагнитной и акустической эмиссии при ударе по поверхности гранита // Физика Земли. 2012а. № 5. С. 58–63.
- Веттегрень В.И., Куксенко В.С., Щербаков И.П.* Динамика микротрещин и временные зависимости деформации поверхности гетерогенного тела (гранита) при ударе // Физика твердого тела. 2012б. Т. 54. Вып. 7. С. 1342–1346.
- Веттегрень В.И., Куксенко В.С., Щербаков И.П.* Механизм и динамика разрушения горных пород под влиянием механического удара и электрического разряда // Физика Земли. 2016. № 5. С. 134–149.
- 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. С. 931–934.
- 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. 2017б. Т. 59. С. 1557–1560.
- Веттегрень В.И., Пономарев А.В., Щербаков И.П., Мамалимов Р.И.* Динамика разрушения гетерогенного тела (кварцевый диорита) при трении // Физика твердого тела. 2017в. Т. 59. С. 2263–2265.
- Веттегрень В.И., Пономарев А.В., Арора К., Раза Харис, Мамалимов Р.И., Щербаков И.П., Фокин И.В.* Наносекундная динамика разрушения гетерогенных природных тел при трении // Физика твердого тела. 2018. Т. 60. С. 2266–2264.
- Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А.* Физические основы прогнозирования механического разрушения // Докл. АН СССР. 1981. Т. 259. № 6. С. 1350–1353
- Молоцкий М.И.* Электронные возбуждения при разрушении кристаллов // Изв. Сиб. отделения АН СССР. 1983. № 12. С. 30–40.
- Куксенко В.С., Станциц С.А., Томилин Н.Г.* Оценка размеров растущих трещин в области разгрузки по параметрам акустических сигналов // Механика композитных материалов. 1983. № 3. С. 23–28.
- Мартышев Ю.Н.* Исследование свечения и электризации при деформировании // Кристаллография. 1965. Т. 10. № 2. С. 224–230.
- Пархоменко Э.И.* Явления электризации в горных породах. М.: Наука. 1968. 256 с.
- Пархоменко Э.И., Мартышев Ю.Н.* Явления электризации и свечения минералов в процессе деформации и разрушения. Физика очага землетрясений. М.: Наука. 1975. С. 151–159.
- Петров В.А., Башкарев А.Я., Веттегрень В.И.* Физические основы прогнозирования долговечности конструктивных материалов. СПб.: Политехника. 1993. 475 с.
- Резель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е.* Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука. 1974. 560 с.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Акустическая эмиссия и стадии подготовки разрушения в лабораторном эксперименте // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 50–62.
- 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.
- Baril M.R., Huntley D.J.* Infrared stimulated luminescence and phosphorescence spectra of irradiated feldspars // J. Phys.: Condens. Matter. 2003. V. 15. P. 8029–8048.
- Beckman J.* A History of Inventions, Discoveries, and Origins / Translated by William Johnston. Fourth Edition, Revised by W. Francis and J.W. Griffith. V. 1. L. 1846. 518 p.
- Chapman G.N., Walton A.J.* Triboluminescence of glasses and quartz // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. № 10. P. 5961–5968.
- Chandra B.P., Zink J.I.* Turbuluminescence and dynamics of crystal fracture // Phys. Rev. B: Solid State. 1980. V. 21. P. 816–826.
- Chudáček.* The kinetics of the triboluminescence of zinc sulphide // J. Czechoslovak J. Phys. B, Jan. 1967. V. 17. Is. 1. P. 34–42.
- Cottrell A.H.* Theory of Crystal Dislocations. NY.: Gordon and Breach. 1964. 91 p.
- Götze J.* Application of cathodoluminescence microscopy and spectroscopy in geosciences // Microsc. Microanal. 2012. V. 18. P. 1270–1284.
- Hardy G.E., Zink J.I.* Triboluminescence and pressure dependence of the photoluminescence of tetrahedral manganese complexes // Inorg. Chem. 1976. V. 15. P. 3061–3065.
- Huntley D.J., Godfrey-Smith D.I., Thewalt M.L.W.* Optical dating of sediments // Nature. 1985. V. 313. P. 105–107.
- Huntley D.J., Baril M.R., Haidar S.* Tunneling in plagioclase feldspars // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. V. 40. № 3. P. 900–906.
- Kawaguchi Y.* Time-resolved fractoluminescence spectra of silica glass in a vacuum and nitrogen atmosphere // Phys. Rev. B. 1995. V. 52. № 13. P. 9224–9228.
- Kawaguchi Y.* Fractoluminescence Spectra in Crystalline Quartz // Jpn. J. Appl. Phys. 1998а. V. 37. P. 1892–1896.
- Kawaguchi Y.* Charged Particle Emission and Luminescence upon Bending Fracture of Granite Jpn // J. Appl. Phys. 1998б. V. 37. P. 3495–3499
- Krbetschek M.R., Rieser U.* Luminescence spectra of alkali feldspars and plagioclases // Radiation Measurements. 1995. V. 24. P. 473–477.
- Langford C., Zhenyi Ma, Dickinson J.T.* Photon emission as a probe of chaotic processes accompanying fracture // J. Mater. Res. 1989. V. 4. P. 1272–1279.

- Longchambon H.* Recherches experimentales sur les phenomenes de triboluminescence et de cristalloluminescence // Bull. Soc. Fr. Miner. 1925. V. 48. P. 130–211.
- Sage I., Bourhill G.* Triboluminescent materials for structural damage monitoring // J. Materials Chem. 2001. V. 11. № 2. P. 231–245. doi:10.1039/b007029 g.
- Shaocheng Ji., Mainprice D.* Natural deformation fabrics of plagioclase: implications for slip systems and seismic anisotropy // Tectonophysics. 1988. V. 147. P. 145–163.
- Stroh A.N.* Theory of fracture of metals // Proc. Roy. Soc. 1957. V. 6. № 24. P. 418–465.
- Toyoda S., Rink W.J., Schwarcz H.P., Rees-Jones J.* Crushing effects on TL and OSL on quartz: relevance to fault dating // Radiation Measurements. 2000. V. 32. P. 667–672.
- Sweeting L.M., Guido J.L.* An improved method for determining. Triboluminescence spectra // J. Lumin. 1985. V. 33. P. 167–173.
- Turro N.J., Ramamwrt V., Scaiano J.C.* Modern Molecular Photochemistry. Columbia University: University Sci. Press. 2010. 1110 p.
- Zakrevskii V.A., Shuldiner A.V.* Electron emission and luminescence owing to plastic deformation of ionic crystals // Philosophical Magazine B. 1995. V. 71. № 2. P. 127–138.

Microcracks in Basalt and Tonalite at Friction

V. I. Vettegren^{a,b}, A. V. Ponomarev^a, R. I. Mamalimov^{a,b}, I. P. Shcherbakov^a,
K. Arora^c, D. Srinagesh^c and R. K. Chadha^c

^aSchmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia

^bIoffe Physical Technical Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 194021, Russia

^cCSIR: National Geophysical Research Institute (NGRI), Hyderabad-500007, Telangana, India

*E-mail: avp@ifz.ru

Received March 25, 2019

The growth rate and size of microcracks formed in the surface layer of basalt and tonalite (granodiorite) at friction are studied using luminescence. It is found that upon breaking of crystal lattices of labradorite and quartz contained in these rocks, triboluminescence signals arise. Each signal corresponds to an embryo microcrack whose surface contains electronically excited free radicals $\equiv \text{Si}-\text{O}^-$, Fe^{3+} ions, and electron traps. The average growth rate of embryo microcracks in basalt varies from ≈ 0.6 to ≈ 1 km/s and in tonalite, from ≈ 0.7 to ≈ 1.3 km/s. The sizes of embryo microcracks in basalt range within ≈ 3 to ≈ 5.5 μm and in tonalite from ≈ 3.5 to ≈ 6.5 μm .

Keywords: luminescence, embryo microcracks, electron traps, triboluminescence