

Изменение строения поверхностного слоя гетерогенного твердого тела (гнейса) при сдвиге

© В.И. Веттегрень¹, А.В. Пономарев², К. Агора³, Р.И. Мамалимов¹, И.П. Щербаков¹, А.В. Патонин⁴

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

³ CSIR National Geophysical Research Institute, Hyderabad, India

⁴ Геофизическая обсерватория „Борок“ — филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Борок, Россия

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

(Поступила в Редакцию 28 декабря 2016 г.)

Методами фотолюминесцентной и инфракрасной спектроскопии исследовано строение поверхностного слоя толщиной $\sim 1 \mu\text{m}$, образовавшегося при разрушении горной породы — гнейса. Обнаружено, что в этом слое кристаллы полевых шпатов (плаггиоклаза и микроклина) полностью разрушены и вместо них образовался монтмориллонит.

Работа выполнена при финансовой поддержке российско-индийского проекта РФФ–DST India: грант Российского научного фонда № 16-47-02003, грант Департамента науки и технологии Правительства Индии — INT/RUS/RSF/P-13.

DOI: 10.21883/FTT.2017.07.44595.462

1. Введение

При сдвиге хрупких гетерогенных твердых тел, таких как горные породы, часто образуются гладкие поверхности, получившие название зеркал скольжения. Их образование вызывает резкое (на порядок) уменьшение коэффициента трения породы и может служить причиной неустойчивости скольжения горных пород. Экспериментальные исследования строения природных зеркал скольжения на поверхности гетерогенных твердых тел — горных пород (песчаника ПВ 364, доломита и порфирита) — были начаты в работах [1–4]. Обнаружено, что они содержат нанокристаллы минералов, имеющих низкий коэффициент трения. Затем было проведено исследование поверхностного слоя толщиной 30 nm, образовавшегося на поверхности пластинок из песчаника ПВ 364 после трения в условиях лаборатории [5]. Оказалось, что этот слой тоже состоит из нанокристаллов минерала с низким коэффициентом трения — монтмориллонита (ММТ). Настоящая работа продолжает цикл этих исследований. В ней изучен состав поверхностного слоя, образовавшегося при сдвиге гетерогенной горной породы — гнейса.

2. Объект и методы исследования

Кусок гнейса был извлечен из скважины в зоне неоднократного повторения землетрясений в районе Койна–Варна, Индия. Он содержал 35–45% полевых шпатов (плаггиоклаз и микроклин), 40–50% кварца и 5–15%

пироксенов и слюд. Из куска был выпилен стержень диаметром 30 mm, а из него отпилены 2 образца. Один имел длину 60 mm и не содержал видимых глазом дефектов. Второй — содержал естественную трещину, которая образовалась в породе до изготовления стержня.

Для деформации образца построена камера высокого давления, представляющая собой толстостенный стакан внутрь которого помещается образец. Сверху камера закрывается подвижным поршнем, передающим усилие, создаваемое прессом, на образец. Отдельная насосная станция создает внутри камеры гидростатическое давление 30 МПа путем закачки туда масла.

Камера помещалась в гидравлический двухкамерный пресс INOVA, имеющий систему сервоконтроля [6]. С помощью программы управления задавали временную зависимость смещения положения поршня прессы.

Для исследований строения породы были использованы методы инфракрасной (IR) и фотолюминесцентной (PL) спектроскопии.

Чтобы получить спектры PL, построили лабораторную установку. В ней луч ультрафиолетового светодиода UVTOP280TO39HS (длина волны излучения — 285 nm), падал на поверхность образца. Возникающее излучение кварцевым световодом направлялось в спектрометр AvaSpec-ULSi2048L-USB2 OEM. Диаметр луча светодиода, падающего на исследуемые поверхности торцов цилиндра и трещины, составлял 2 mm, что на порядок меньше их размеров. Поэтому измерения методом PL проводились в трех разных местах, и полученные данные усредняли. На величину интенсивности полос в спектре

PL сильно влияет рассеяние на шероховатой поверхности образца. Поэтому интенсивность луча лазера подбиралась такой, чтобы величина рассеянного излучения при всех измерениях была одинаковой.

Для записи инфракрасных (IR) спектров отражения использовали Фурье-спектрометр IR-21 „Prestige“, снабженный приставкой для записи таких спектров — SRM-8000A. Диаметр луча IR-излучения, падающего на исследуемую поверхность, составлял 20 mm. Это означает, что методом IR-спектроскопии были получены сведения о содержании минералов в поверхностных слоях торцов цилиндра и трещин, усредненные по площади, близкой к их площадям.

Амплитуда электрического вектора света, падающего на поверхность поглощающего образца, затухает экспоненциально от поверхности вглубь. Эффективная толщина поверхностного слоя, о строении которого несет информацию спектр отражения, задана глубиной h , на которой амплитуда электрического вектора света уменьшается в $e \sim 2.7$ раз (e — основание натуральных логарифмов), а интенсивность света — в $e^2 \sim 8$ раз. Она вычислена по формуле [7]

$$h \approx \frac{1}{\pi \nu k_e},$$

где k_e — показатель поглощения, ν — частота IR-излучения.

Как уже упоминалось выше, поверхность образца сильно рассеивает свет. По этой причине, когда использовался метод PL-спектроскопии, оказалось невозможным оценить величину эффективной толщины поверхностного слоя.

Влияние рассеяния, когда применяли метод IR-спектроскопии, меньше. Это позволило для грубой оценки h использовать значения, приведенные в [1,4]. В интересующих нас областях IR-спектра (800–1300 и 3680–3800 cm^{-1}) она равна $\approx 1 \mu\text{m}$.

3. Результаты измерений и их обсуждение

2.1. Данные механических испытаний. На рис. 1 показана временная зависимость давления при сжатии стержня вдоль его оси. Видно, что величина давления сначала растет, достигает ~ 38.4 МПа, и затем резко падает. В этот момент появилась и начала расти трещина под углом $\sim 45\text{--}50^\circ$ к направлению сжимающей силы. Она разветвилась после того, как пересекла приблизительно половину диаметра образца (рис. 2).

Методами IR- и PL-спектроскопии исследовали строение поверхностных слоев торцов образца и трещины. Для сравнения исследовали также строение поверхностного слоя трещины, которая образовалась в породе до изготовления из нее стержня.

2.2. Результаты, полученные методом IR-спектроскопии. На рис. 3 показан спектры

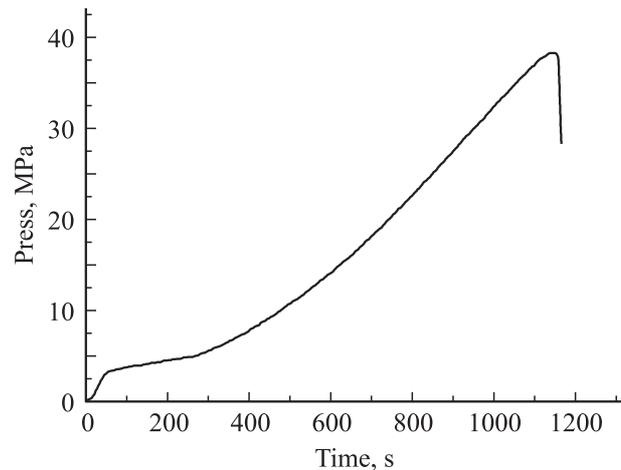


Рис. 1. Временная зависимость давления.



Рис. 2. Фотография исследованного образца после сдвига.

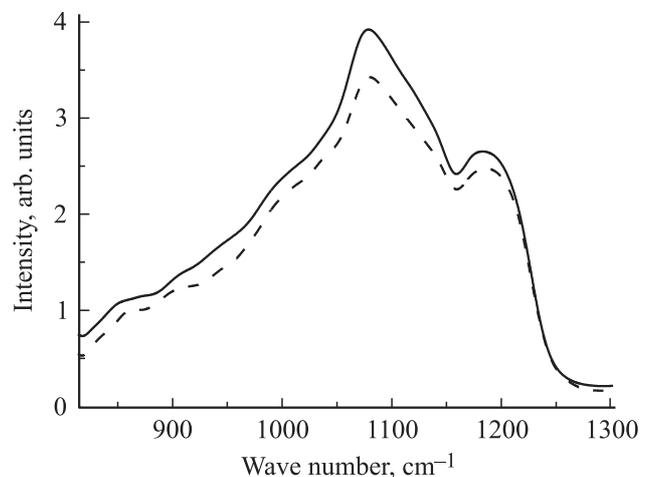


Рис. 3. Спектры противоположных торцов цилиндра в области 800–1300 cm^{-1} .

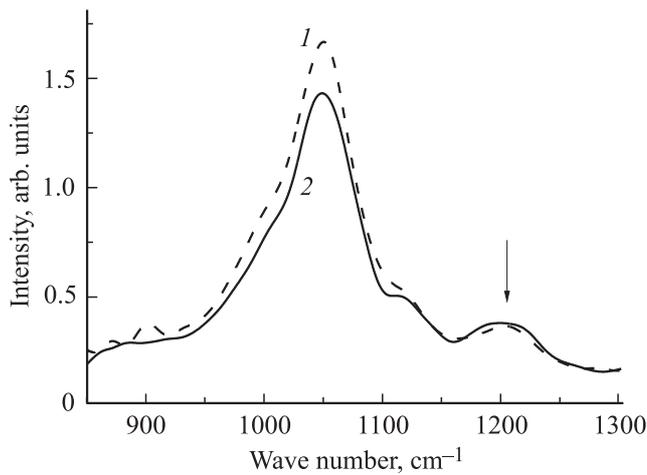


Рис. 4. Спектры отражения поверхностей трещин: 1 — существовавшей до изготовления образца; 2 — образовавшейся в результате испытаний. Стрелкой показан максимум, соответствующий кварцу.

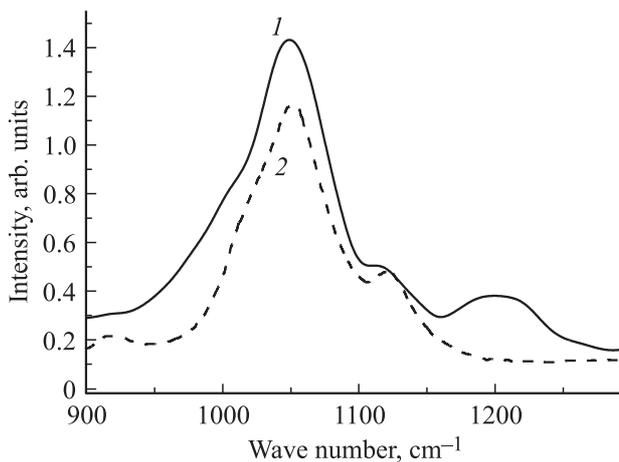


Рис. 5. Спектры отражения поверхности трещины (1) и ММТ (2).

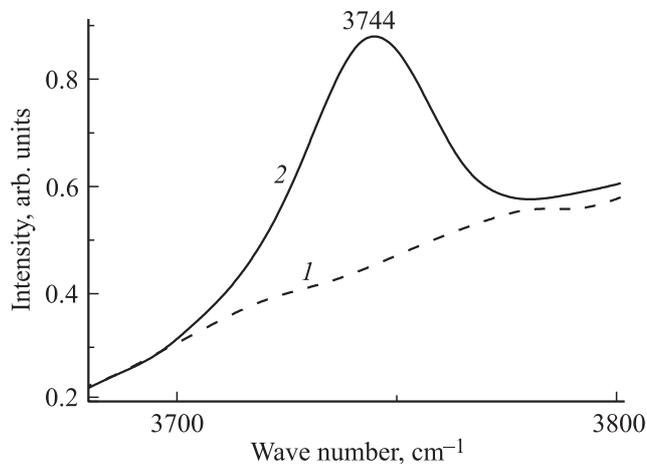


Рис. 6. Спектры отражения поверхностей торца цилиндра (1) и трещины (2) в области 3680–3800 cm^{-1} .

IR-отражения противоположных торцов цилиндра в области 800–1300 cm^{-1} . Из рисунка следует, что спектры торцов одинаковы. Это значит, что содержание минералов в поверхностных слоях толщиной 1 μm обоих торцов цилиндра одинаково.

Анализ спектров показал, что они представляют собой результат наложения спектров кварца [8,9] и полевых шпатов (плагиоклаза и микроклина [10,11]).

На рис. 4 приведены IR-спектры отражения поверхностей двух трещин: образовавшейся при разрушении образца в лаборатории и существовавшей в породе ранее — до его изготовления. Видно, что и они одинаковы, различается только интенсивность максимумов. Это показывает, что строение поверхностных слоев этих трещин одинаково.

В тоже время спектры отражения поверхностей трещин отличаются от спектров торцов цилиндра. А именно, в спектрах отражения поверхностей трещин появляются новые максимумы 1049 и 3744 cm^{-1} (рис. 5 и 6). Согласно [12] эти максимумы появляются в спектрах отражения монтмориллонита (ММТ) после его длительного размола. Это показывает, что в поверхностном слое трещин образуется ММТ, кристаллическая решетка которого содержит большое количество нарушений.

Кроме максимума 1049 cm^{-1} в спектрах отражения наблюдается максимум 1200 cm^{-1} , приписанный колебаниям кристаллической решетки кварца (на рис. 4 он отмечен стрелкой). Его интенсивность в спектрах отражения поверхности цилиндра и трещины одинакова. Это показывает, что кристаллическая решетка кварца в поверхностных слоях цилиндра и трещины практически не нарушена.

В тоже время максимум 1077 cm^{-1} , соответствующий полевым шпатам [10,11], в спектрах отражения поверхности трещины практически не заметен (рис. 5). Это показывает, что в поверхностном слое трещины полевые шпаты полностью замещаются на ММТ.

Вероятно, появление ММТ вызвано механохимическими реакциями. Действительно, известно, что под действием механических напряжений химические связи в кристаллических решетках полевых шпатов и кварца разрываются [13–17]. После разрыва связей образуются весьма активные свободные радикалы $\equiv \text{S}-\text{O}^-$ и $\equiv \text{Si}^{2+}$, которые вступают в химические реакции друг с другом, с молекулами воды и атомами алюминия, калия, натрия, входящими в состав полевых шпатов. Это ведет к образованию новых химических соединений и, вероятно, ММТ.

Известно, что кристаллы горных пород содержат большое количество дефектов — ионов, примесных атомов и т.п. [18]. Интересно было выяснить — отличается ли концентрация дефектов в поверхностных слоях трещин и торца цилиндра? Чтобы ответить на этот вопрос была применена PL-спектроскопия.

2.3. Результаты, полученные методом PL-спектроскопии. На рис. 7 приведены спектры PL-поверхностных слоев торца цилиндра и тре-

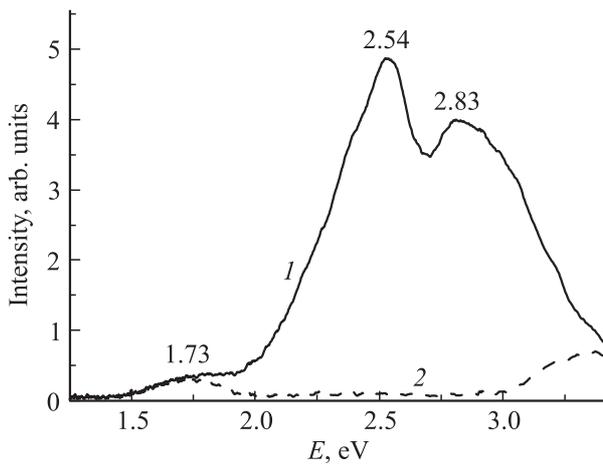


Рис. 7. Спектры PL-поверхностей цилиндра (1) и трещины (2).

шины. Они представляют собой результат наложения полос 1.73, 2.54 и 2.83 eV, приписанных дефектам кристаллической решетки кварца и полевых шпатов [18,19]. Полоса 1.73 eV соответствует ионам Fe^{3+} в кварце. Полоса 2.54 eV приписана центрам $\text{O}^- - \text{Si} \dots \text{M}^+$, где M^+ — ионы Li^+ , Na^+ или H^+ , а 2.83 eV самозахваченным экситонам в полевых шпатах [19].

Видно, что концентрация центров $\text{O}^- - \text{Si} \dots \text{M}^+$ и самозахваченных экситонов в поверхностном слое трещины уменьшается практически до нуля. Этот эффект вызван разрушением кристаллической решетки полевых шпатов.

4. Выводы

1. Поверхностный слой торцов исследуемого образца толщиной $\sim 1 \mu\text{m}$ содержит кристаллы кварца и полевых шпатов.

2. В поверхностном слое трещины такой же толщины полевые шпаты замещаются на ММТ.

Список литературы

- [1] Г.А. Соболев, С.М. Киреевкова, Ю.А. Морозов, А.И. Смольская, В.И. Веттегрень, В.Б. Кулик, Р.И. Мамалимов. *Физика Земли* 9–10, 17 (2012).
- [2] Г.А. Соболев, В.И. Веттегрень, В.В. Ружич, Л.А. Иванова, Р.И. Мамалимов, И.П. Щербаков. *Вулканология и сейсмология* 3, 3 (2015).
- [3] Г.А. Соболев, В.И. Веттегрень, В.В. Ружич, С.М. Киреевкова, А.И. Смольская, Р.И. Мамалимов, В.Б. Кулик. *Геофиз. исследования* 17, 4, 5 (2015).
- [4] Г.А. Соболев, В.И. Веттегрень, С.М. Киреевкова, В.Б. Кулик, Р.И. Мамалимов, Ю.А. Морозов, А.И. Смольская, И.П. Щербаков. *Нанокристаллы в горных породах. ГЕОС*, М. (2016). 102 с.
- [5] В.И. Веттегрень, А.В. Пономарев, Г.А. Соболев, И.П. Щербаков, Р.И. Мамалимов, В.Б. Кулик, А.В. Патонин. *ФТТ* 59, 589 (2017).
- [6] А.В. Патонин, А.В. Пономарев, В.Б. Смирнов. *Сейсмические приборы* 49, 1, 19 (2013).
- [7] M. Born, E. Wolf. *Principles of optics*. 2nd ed. Pergamon press, Oxford (1964). 856 p.
- [8] W.G. Spitzer, D.A. Kleinman. *Phys. Rev.* 121, 1324 (1961).
- [9] J. Etchepare, M. Merian, P.J. Kaplan. *Chem. Phys.* 60, 1873 (1974).
- [10] E. Theodosoglou, A. Koroneos, T. Soldatos, T. Zorba, K.M. Paraskevopoulos. *Bulletin of the Geological Society of Greece. Proc. 12th Int. Congress. Patras. M.* (2010). XLIII, 2752.
- [11] Zhou Lingdi, Guo Jiugao, Yang Nianhua, Li Liyun. *Sci. China D* 40, 2, 159 (1997). Kieffer S.W. *Rev. Geophys. Space Phys.* 17, 20 (1979).
- [12] M.A. Karakassides, D. Gournis, D. Petridis. *Clay Minerals* 34, 429 (1999).
- [13] G.N. Chapman, A.J. Walton. *J. Appl. Phys.* 54, 5961 (1983).
- [14] Р. Силинь, А.Н. Трухин. *Точечные дефекты и элементарные возбуждения в кристаллическом и стеклообразном SiO_2* . Зинатне, Рига (1985). 244 с.
- [15] А.Н. Стрелецкий, А.Б. Пакович, И.Ю. Бутягин. *Изв. АН СССР* 50, 3, 477 (1986).
- [16] Y. Kawaguchi. *Jpn. J. Appl. Phys.* 37, 1892 (1998).
- [17] В.И. Веттегрень, А.Я. Башкарев, Р.И. Мамалимов, И.П. Щербаков. *ФТТ* 50, 29 (2008).
- [18] J. Götze. *Microsc. Microanal.* 18, 1270 (2012).
- [19] Б.С. Горобец, А.А. Рогожин. *Спектры люминесценции минералов. Справочник. Изд-во ВИМС, М.* 294 с.