

УДК 552.31; 543.424

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛОВ ЗЕРКАЛА СКОЛЬЖЕНИЯ ИЗ ЗОНЫ СЕЙСМОДИСЛОКАЦИИ

© 2015 г. Г.А. Соболев<sup>1</sup>, В.И. Веттегрень<sup>2</sup>, В.В. Ружич<sup>3</sup>, С.М. Киреенкова<sup>1</sup>,  
А.И. Смульская<sup>1</sup>, Р.И. Мамалимов<sup>2</sup>, В.Б. Кулик<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

<sup>3</sup> Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

Методами рамановской и инфракрасной спектроскопии проведены исследования структуры зеркала скольжения на поверхности образца порфирита, взятого из зоны протяженной сейсмической дислокации, образовавшейся при катастрофическом землетрясении 350–250 млн. лет назад в Южной Монголии, вблизи озера Орок-Нур.

Установлено, что зеркало содержит нанокристаллы эпидота и воду. Предполагается, что такое строение зеркала обуславливает резкое уменьшение коэффициента трения и возникновение неустойчивой подвижки с залипанием (stick-slip).

**Ключевые слова:** зеркало скольжения, динамическая подвижка, нанокристаллы, коэффициент трения.

### Введение

Под зеркалами скольжения понимаются гладкие поверхности, возникшие при трении скользящих по разрыву пород [Геологический ..., 2010], которые, как правило, образуются при скоростях скольжения, превышающих 1 м/с [Di Toro, Goldsby, Tullis, 2004; Di Toro et al., 2011], когда коэффициент трения на контакте пород уменьшается, по крайней мере, на порядок. Это явление объясняется формированием между блоками горных пород промежуточного слоя с низким сопротивлением сдвигу [Di Toro, Goldsby, Tullis, 2004; Di Toro et al., 2011; Nielsen et al., 2008; Wang, Manga, 2010; Han et al., 2011]. Предполагается, что этот слой – продукт измельчения породы до наноразмеров [Di Toro et al., 2011], представляющий собой насыщенный флюидом минеральный агрегат [Wang, Manga, 2010; Han et al., 2011] или расплав минералов в зоне трения [Ружич, 1992; Hirose, Shimamoto, 2005; Di Toro et al., 2006; Fialko, Khazan, 2005; Kanamori, Anderson, Heaton, 1998].

Наличие зеркал скольжения в зонах палеосейсмических событий позволяет связывать их генезис с сейсмическим процессом [Di Toro, Goldsby, Tullis, 2004; Di Toro et al., 2011]. Интерес к их изучению обусловлен открывающимися возможностями получения новой информации об одной из наиболее существенных сторон процесса динамического разрушения горных пород – возникновении неустойчивой подвижки с залипанием (stick-slip).

По-видимому, первое прямое исследование на наноуровне строения зеркала скольжения, образовавшегося в аркозовом песчанике при температуре не выше 100 °С, было проведено в [Соболев и др., 2012]. С использованием методов инфракрасной и рамановской спектроскопии авторы обнаружили, что зеркало скольжения состоит из деформированных нанокристаллов монтмориллонита и анатаза с линейными размерами ~15 и ~3 нм соответственно.

Позже [Соболев и др., 2015] методами рентгеновского рассеяния, инфракрасной и флуоресцентной спектроскопии было исследовано зеркало скольжения, образовавшееся

при динамической подвижке в зоне Виллюйского глубинного разлома. Было установлено, что и это зеркало состоит из окруженных водой дефектных нанокристаллов кварца и альбита. Образование структуры такого рода, по-видимому, привело к уменьшению коэффициента трения и созданию условий для развития неустойчивой подвижки в горном массиве.

В настоящей работе исследуется зеркало скольжения, образовавшееся в иных, нежели в двух упомянутых выше работах, условиях.

### Объект исследования

Исследованный образец был взят в 1985 г. при проведении геологической экспедиции на территории Южной Монголии в районе оз. Орок-Нур из зоны протяженной сейсмодислокации катастрофического ( $M=7.9$ ) Гоби-Алтайского землетрясения 04.12.1957 г. Зеркало скольжения образовалось при более раннем палеоземлетрясении, произошедшем предположительно 350–250 млн. лет назад [Ружич, 1989, 1992]. Исходная порода как продукт древних вулканических излияний может считаться андезитбазальтовым порфиритом. По данным изучения шлифов, в её состав входят вкрапленники плагиоклаза (27–47 %, две генерации), клинопироксен (10 %), кварц (10–15 %, две генерации), хлорит (5 %), альбит (5 %) и рудные образования (сульфиды, в основном пирит).

Образец неоднороден; на удалении от поверхности зеркала скольжения это малоизмененный андезитбазальтовый порфирит; с приближением к зеркалу скольжения степень дробления породы (бластокатаклаза) усиливается и повышается уровень вторичных изменений. Собственно порфирит состоит из вкрапленников, основной массы и миндалин. Вкрапленники представлены пироксеном и плагиоклазом; основная масса – агрегатом микролитов (мелких кристалликов плагиоклаза) и стекла; каплевидные миндалины представляют собой следы дегазации остывающего расплава. Со временем стекло частично раскристаллизовалось, а в пространстве миндалин сформировались вторичные минералы – кварц, карбонат, хлорит, эпидот, пумпеллит. Порода интенсивно и многократно дробилась, перетиралась; трещины залечивались кварцем, эпидотцоизитом, кальцитом, хлоритом.

С приближением к зеркалу скольжения зоны вторичной минерализации расширялись, уменьшалось количество и размеры обломков исходного базальта. В истории породы друг друга несколько раз сменяли стадии компрессии и декомпрессии, сопровождавшиеся разрушением и перекристаллизацией минералов; при этом возникла кварцевая жилка, в которой встречаются как дробленные зерна, так и совершенные шестигранные кристаллы “свободного роста”. Внутри трещин протекали гидротермально-метасоматические процессы.

Зеркало скольжения представляет собой слой фишашково-зеленого цвета, характерного для эпидота. Можно предположить, что при сейсмодислокации вдоль осевой части некоторых трещин произошли сдвиги, превратившие эпидотовый агрегат в зеркало скольжения, которое выглядит одинаково по всей поверхности образца, несмотря на образование по химически неоднородному субстрату. Вероятно, имела место следующая последовательность событий, приведших к формированию исследуемой породы: “застывание расплава → бластокатаклаз со сменой периодов компрессии и декомпрессии → образование системы пор и трещин с интенсивной гидротермальной минерализацией → образование зеркала скольжения”.

## Методы исследования

Строение поверхности зеркала скольжения исследовалось при помощи инфракрасной спектроскопии отражения и рамановской спектроскопии [Ельяшевич, 2001]. Сведения о строении объема образца были получены в результате анализа инфракрасных спектров отражения от поверхности, полученной при выпиливании образца из блока породы.

Инфракрасные спектры отражения в неполяризованном свете записывались на Фурье-спектрометре IR-21 "Prestige". Угол падения луча на образец составлял  $10^\circ$ . Из-за сильного рассеяния, вызванного неровностями поверхности образца, удалось получить спектры только двух достаточно гладких участков зеркала скольжения. С использованием модифицированного метода Крамерса–Кронига был рассчитан [Kuzmenko, 2005] спектр мнимой части  $\epsilon''(\nu)$  диэлектрической постоянной ( $\nu$  – частота света).

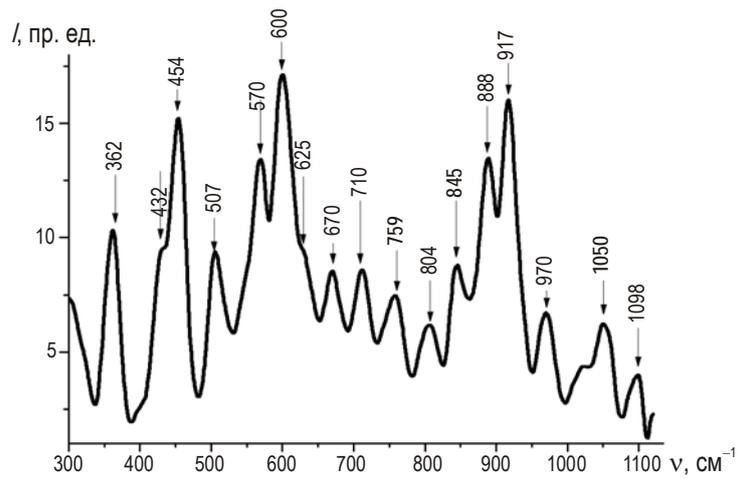
Рамановские спектры от поверхности образца записывались на спектрометре Ramalog-5 в режиме счета фотонов. Спектры возбуждались аргоновым лазером Ar<sup>++</sup> 16508 (Spectra Physics), линия 514.5 нм. На поверхность образца, установленного на предметном столике, направлялся луч лазера, сфокусированный в пятно диаметром  $\sim 30$  мкм. Рассеянный в обратном направлении свет при помощи зеркала и фокусирующей оптической системы направлялся на входную щель монохроматора. Для более точного определения частот максимумов полос и их сдвигов одновременно с регистрацией спектров производилась запись линии лазера, положение которой использовалось в качестве репера. Погрешность определения частоты максимума и ширины исследуемых полос в спектре составляла  $0.2 \text{ см}^{-1}$ .

Амплитуда колебаний падающего на поверхность образца электрического вектора света затухает с глубиной экспоненциально. Эффективная глубина  $h$ , на которой амплитуда уменьшается в  $e$  раз (примерно в 2.7 раза), а интенсивность света – в  $e^2$  раз (примерно в 8 раз), вычислялась по формуле  $h \approx 1/4\pi\nu k$ , где  $k$  – показатель поглощения [Born, Wolf, 1964]. Величина  $h$  приближенно представляет толщину исследуемого поверхностного слоя.

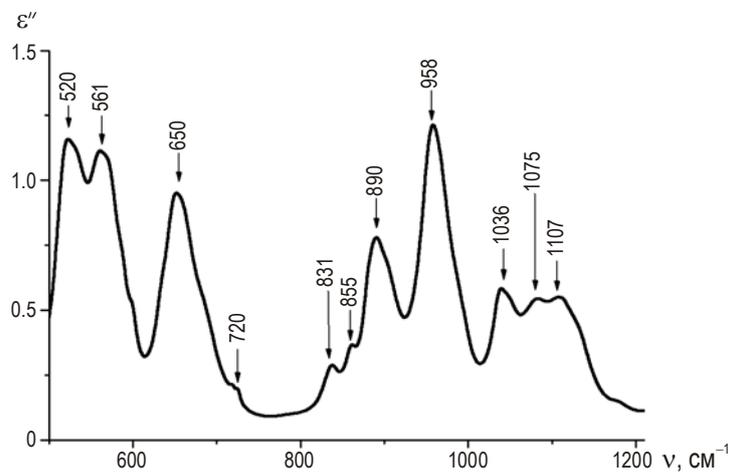
## Результаты исследований методами рамановской и инфракрасной спектроскопии

Фрагменты рамановского спектра поверхностного слоя зеркала скольжения толщиной  $h \sim 30$  нм и спектра затухания инфракрасного излучения в поверхностном слое зеркала скольжения толщиной  $\sim 4$  мкм показаны на рис. 1, 2. Полосы 362, 393, 432, 454, 507, 570, 600, 625, 888, 917, 971 и  $1098 \text{ см}^{-1}$ , наблюдаемые в рамановском спектре (см. рис. 1), приписаны колебаниям кристаллической решетки эпидота [Makreski et al., 2007], а полосы 759, 845,  $1050 \text{ см}^{-1}$  – колебаниям решетки диопсида [Huang et al., 2000]. Таким образом, данные рамановской спектроскопии показывают, что поверхностный слой зеркала скольжения толщиной 30 нм содержит кристаллы эпидота –  $\text{Ca}_2\text{Al}_2(\text{Fe}^{3+}, \text{Al})(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$  и диопсида  $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ . Все полосы, наблюдаемые в спектре затухания инфракрасного излучения (см. рис. 2), приписаны колебаниям кристаллической решетки эпидота [Makreski et al., 2007].

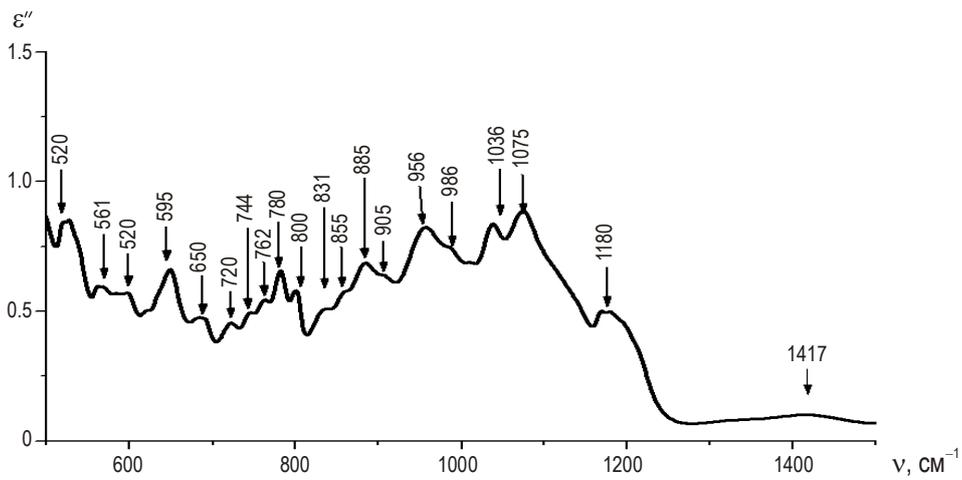
Ниже приводится фрагмент спектра затухания инфракрасного излучения в объеме образца в диапазоне  $500\text{--}1500 \text{ см}^{-1}$  (рис. 3). Спектры затухания инфракрасного излучения поверхностного слоя и объема образца в областях от  $1280$  до  $1780 \text{ см}^{-1}$  ( $h \sim 6$  мкм) и от  $1750$  до  $3800 \text{ см}^{-1}$  ( $h \sim 2$  мкм) представлены на рис. 4. Полосы  $1415$  и  $1437 \text{ см}^{-1}$  приписаны деформационным, а  $2840$  и  $2920$  – валентным колебаниям  $\text{C-H}$  связей в органических соединениях; полосы  $1560$ ,  $1604$ ,  $1644$ ,  $1650 \text{ см}^{-1}$  – деформационным колебаниям молекул воды, связанных между собой и эпидотом водородными связями [Coker, Reimer, Watts, 1982]. Полосы в области от  $3000$  до  $3700 \text{ см}^{-1}$  приписаны валентным колебаниям молекул воды, связанных между собой и эпидотом водородными связями.



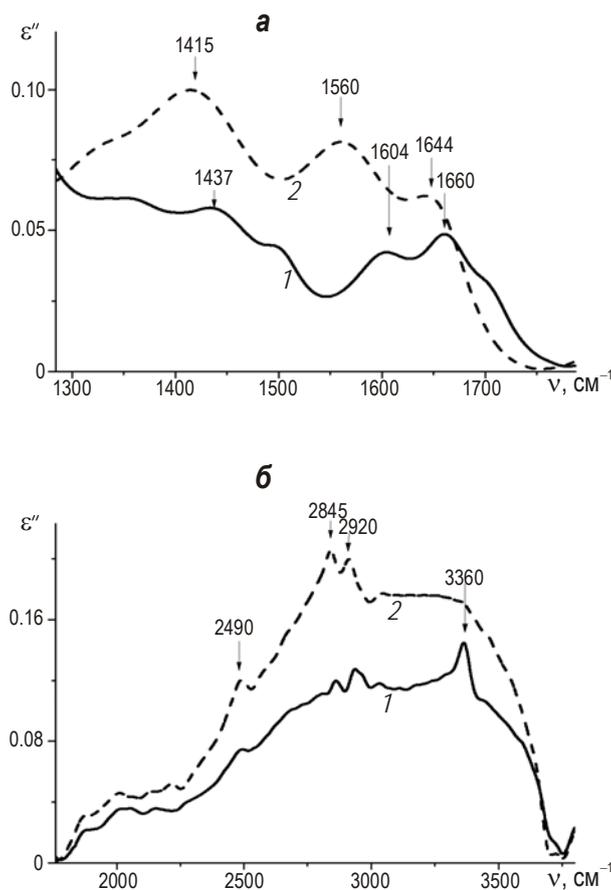
**Рис. 1.** Рамановские спектры поверхностного слоя зеркала скольжения толщиной  $\sim 30$  нм. Утолщенным шрифтом выделены полосы, приписанные колебаниям решетки диопсида



**Рис. 2.** Фрагмент спектра затухания инфракрасного излучения в поверхностном слое зеркала скольжения толщиной  $\approx 4$  мкм в диапазоне  $500\text{--}1200$   $\text{см}^{-1}$



**Рис. 3.** Спектр затухания инфракрасного излучения в объеме образца



**Рис. 4.** Спектры затухания инфракрасного излучения поверхностного слоя зеркала (1) и объема (2) образца в областях 1280–1780  $\text{cm}^{-1}$  (а) и 1750–3800  $\text{cm}^{-1}$  (б)

Узкий пик 3360  $\text{cm}^{-1}$  приписан молекулам воды, участвующим в образовании водородных связей с атомами кислорода, входящими в состав эпидота [Langer, Raith, 1974].

Изложенное выше свидетельствует, что зеркало скольжения содержит эпидот и следы диопсида. Кроме этого в объеме образца содержатся альбит, кварц и карбонат. Объем и поверхность зеркала содержат воду, молекулы которой связаны между собой и с эпидотом водородными связями. Одной из главных задач было определение химического строения нанокристаллов в породе, что не удается сделать методами электронной микроскопии, в связи с чем последняя не применялась в настоящем исследовании.

Надо отметить, что исследуемое зеркало скольжения неопределенно долгое время находилось в приповерхностных условиях, что привело к изменению его строения под влиянием внешних факторов. На это указывают, например, отмечаемые следы органических соединений как в самом зеркале, так и в породе под ним. Вероятно, эти соединения были привнесены по трещинам инфильтрационными водами.

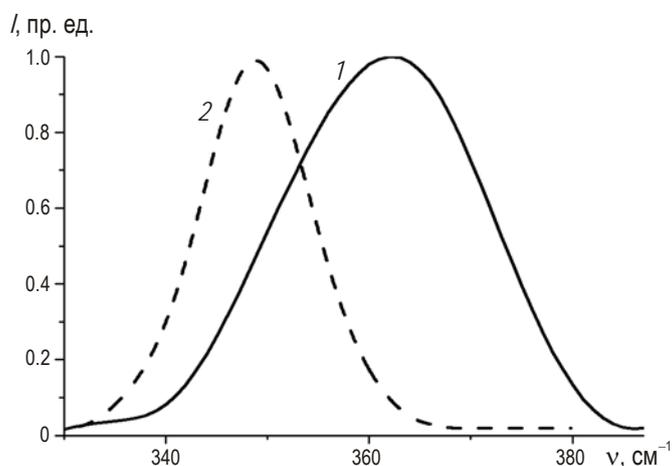
Как говорилось выше, поверхностные слои зеркала скольжения содержат в основном эпидот, который присутствует и в объеме образца. Микроструктурные, минералогические и геохимические исследования показывают [Mitterpergher, Pennacchioni, Di Toro, 2009], что этот минерал может быть продуктом размола горной породы при температурах от 250 до 320  $^{\circ}\text{C}$  и давлении до 1 килобара [Terry et al., 1968; Poli, Schmidt, 2004; Kirkpatrick et al., 2012; Yardley, 1989; Guilbert, Park, 1986; Добрецов и др.,

1971; Коробов, 1992]. Это не исключает возможности существования эпидота в земной коре и в более высоком температурном диапазоне. Действительно, в исследованном нами образце обнаружены следы диопсида, альбита, кварца и карбоната – минералов, принимавших участие в образовании эпидота.

### Нанокристаллы в зеркале скольжения и внутренние напряжения в них

Было проведено сравнение рамановских спектров поверхностных слоев зеркала скольжения и макрокристалла эпидота. Оказалось, что все полосы в спектре поверхностного слоя зеркала смещены относительно их положения в спектре макрокристалла; кроме того, они неоднородно уширены.

В качестве примера на рис. 5 показана полоса  $349.9 \text{ см}^{-1}$ . Видно, что в спектре зеркала частота ее максимума увеличена на  $12.6 \text{ см}^{-1}$ ; одновременно она уширена в сторону низких частот.



**Рис. 5.** Полоса  $349.9 \text{ см}^{-1}$  в рамановских спектрах поверхностных слоев зеркала скольжения образца (1) и макрокристалла эпидота (2)

Известно [Ipatova, Maradudin, Wallis, 1967; Madelung, 1972], что полосы в спектре макрокристаллов имеют симметричную дисперсионную форму, описываемую выражением

$$\varepsilon''(\nu) = \frac{\varepsilon_0'' (\Gamma/2)^2}{(\nu_0 - \nu)^2 + (\Gamma/2)^2}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0''$  – мнимая часть диэлектрической проницаемости в максимуме полосы;  $\Gamma$  – ее ширина (на половине  $\varepsilon_0''$ ).

Именно такую дисперсионную форму имеет полоса  $349.9 \text{ см}^{-1}$  в спектре макрокристалла эпидота (см. рис. 5). Механизм, приводящий к дисперсионной форме полос, обусловлен нелинейностью сил межатомного взаимодействия, которая вызывает обмен энергией между различными модами колебаний кристаллической решетки и биения их амплитуды [Ipatova, Maradudin, Wallis, 1967]. В результате взаимодействия света с колебанием переменной амплитуды в спектре  $\varepsilon''(\nu)$  появляется полоса, имеющая дисперсионную форму и ширину  $\Gamma=1/S\tau$ , где  $S$  – скорость света. Однако в рамановском спектре поверхностного слоя зеркала скольжения толщиной  $\sim 30 \text{ нм}$ , как уже упоминалось выше, частота максимума полосы смещена и асимметрично уширена в сторону низких частот.

Асимметричное уширение полос вызвано рассеянием фононов на границах нанокристаллов в горных породах [Соболев и др., 2011; Веттегрень и др., 2011; Кулик и др., 2011]. Рассеяние вызывает нарушение правил отбора по импульсу:  $|q_0| \approx 0$ , где  $|q_0|$  – абсолютная величина волнового вектора фонона. Поэтому в спектре  $\varepsilon''(\nu)$  проявляются полосы, соответствующие фононам, для которых  $|q_0| > 0$ . Они налагаются на полосу, соответствующую фононам, для которых  $|q_0| \approx 0$ , в результате чего “суммарная” полоса становится асимметричной.

В работах [Tiong et al., 1984; Richter, Wang, Ley, 1981; Соболев, 2011, 2012; Веттегрень и др., 2011; Кулик и др., 2011] показано, как можно оценить размеры нанокристаллов, анализируя форму полосы. Этот метод требует знания зависимости частоты колебаний от волнового вектора. Для эпидота такие данные в литературе отсутствуют, в связи с чем размеры его нанокристаллов оценить невозможно.

Смещение частоты колебаний  $\Delta\nu = \nu_\varepsilon - \nu_0$  ( $\nu_\varepsilon$  и  $\nu_0$  – частоты колебаний деформированной и недеформированной кристаллических решеток) вызвано деформацией  $\varepsilon = \Delta V/V$  ( $V$  – объем,  $\Delta V$  – его изменение) кристаллической решетки. Согласно [Madelung, 1972], величина смещения  $\Delta\nu$  связана с деформацией выражением

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} = -G\varepsilon, \quad (2)$$

где  $G$  – параметр Грюнайзена. К сожалению, значение параметра  $G$  для полосы  $349.9 \text{ см}^{-1}$  неизвестно, вследствие чего рассчитать величину деформации невозможно. Обычно  $G < 0$  [Madelung, 1972], поэтому увеличение частоты колебаний может означать, что нанокристаллы эпидота сжаты.

Приведенные выше результаты свидетельствуют, что поверхностный слой зеркала скольжения состоит из окруженных водой нанокристаллов эпидота. Образование такого слоя должно приводить к резкому уменьшению силы трения между блоками [Di Toro et al., 2011] и к неустойчивости скольжения. При больших скоростях перемещения (выше скорости пластической деформации) тело разрушается хрупко и образуется зеркальная зона. Для перемещения необходимо преодолевать стопоры, связанные с тем, что контактирующие поверхности породы не гладкие. Когда “высота” некоторых стопоров становится слишком большой, скорость трения должна резко падать, что воспринимается как “залипание”. Процесс носит название “stick-slip” [Brace, Byerlee, 1966].

### Выводы

Исследовано зеркало скольжения на поверхности образца из сейсмодислокации в зоне Гоби-Алтайского землетрясения 1957 г.

С применением методов рамановской и инфракрасной спектроскопии установлено, что поверхностный слой зеркала скольжения состоит главным образом из деформированных нанокристаллов эпидота.

Возникновение слоя такого рода может быть причиной уменьшения коэффициента трения и неустойчивой динамической подвижки типа “stick-slip”.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 130500010).

## Литература

- Веттегрень В.И., Мамалимов Р.И., Соболев Г.А., Киреевкова С.М., Морозов Ю.А., Смутьская А.И.* ИК-спектроскопическое изучение нанокристаллов кварца, образовавшихся при интенсивном дроблении гетерогенного материала (гранита) // *Физика твердого тела*. 2011. Т. 53, вып. 12. С.2371–2375.
- Геологический словарь. В трех томах. Изд. третье, перераб. и доп. / Гл. ред. О.В. Петров. Т. 1. А–Й. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2010. 432 с.
- Добрецов Н.Л., Кочкин Ю.Н., Кривенко А.П., Кутолин В.А.* Породообразующие пироксены. М.: Наука, 1971. 454 с.
- Ельяшевич М.А.* Атомная и молекулярная спектроскопия. М.: Эдиториал УРСС, 2001. 896 с.
- Коробов А.Д.* Особенности развития регрессивной смектитизации в пропилитах современных островодужных систем (о. Итуруп, Курилы) // *Вулканизм в структурах Земли и различных геодинамических обстановках*. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 1992. С.70–71.
- Кулик В.Б., Соболев Г.А., Веттегрень В.И., Киреевкова С.М.* Изучение нанокристаллов в горных породах, подверженных естественным и искусственным механическим и термическим воздействиям // *Физика Земли*. 2011. № 11. С.19–24.
- Ружич В.В.* Геологический подход к изучению очагов палеоземлетрясений // *Экспериментальные и численные методы в физике очага землетрясения*. М.: Наука, 1989. С.68–78.
- Ружич В.В.* О геологическом выявлении палеочаговых зон сильных землетрясений в местах глубоких денудационных срезов // *Физические и сейсмогеологические основы прогнозирования разрушения горных пород*. М.: Наука, 1992. С.10–14.
- Соболев Г.А., Геншафт Ю.С., Киреевкова С.М., Морозов Ю.А., Смутьская А.И., Веттегрень В.И., Кулик В.Б.* Исследование влияния высокого давления и температуры на свойства нанокристаллов в горных породах методом рамановской спектроскопии // *Физика Земли*. 2011. № 6. С.3–12.
- Соболев Г.А., Киреевкова С.М., Морозов Ю.А., Смутьская А.И., Веттегрень В.И., Кулик В.Б., Мамалимов Р.И.* Исследование нанокристаллов в зоне динамической подвижки // *Физика Земли*. 2012. № 9/10. С.17–25.
- Соболев Г.А., Веттегрень В.И., Ружич В.В., Иванова Л. А., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П.* Исследование нанокристаллов в образце зеркала скольжения // *Вулканология и сейсмология*. 2015. № 3. С.1–12.
- Born M., Wolf E.* Principles of optics. Second Ed. Oxford: Pergamon press, 1964. 856 p.
- Brace W.F., Byerlee J. D.* Stick-slip as a mechanism for earthquake // *Science*. 1966. V. 153. P.990–992.
- Coker D.F., Reimers J.R., Watts R.O.* The Infrared Absorption Spectrum of Water // *Aust. J. Phys.* 1982. V. 35. P.623–638.
- Di Toro G., Goldsby D.L., Tullis T.E.* Friction falls towards zero in quartz rock as slip velocity approaches seismic rates // *Nature*. 2004. V. 427. P.436–439.
- Di Toro G., Hirose T., Nielsen S., Pennacchioni G., Shimamoto T.* Natural and experimental evidence of melt lubrication of faults during earthquakes // *Science*. 2006. V. 311. P.647–649.
- Di Toro G., Han R., Hirose T., De Paola N., Nielsen S., Mizoguchi K., Ferri F., Cocco M., Shimamoto T.* Fault lubrication during earthquakes // *Nature. Res. Lett.* 2011. V. 471. P.494–498.
- Guilbert J.M., Park C.F.* The Geology of Ore Deposits. N.Y.: Freeman and Company, 1986. 985 p.
- Han R., Shimamoto T., Lee Y., Ando J.* Granular nanoparticles lubricate faults during seismic – slip // *Geology*. 2011. V. 39, N 6. P.599–602.
- Hirose T., Shimamoto T.* Growth of molten zone as a mechanism of slip weakening of simulated faults in gabbro during frictional melting // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. B05202.
- Huang E., Chen C.H., Huang T., Lin E.H., Xu Ji-An.* Raman spectroscopic characteristics of Mg-Fe-Ca pyroxenes // *American Mineralogist*. 2000. V. 85. P.473–479.
- Fialko Y., Khazan Y.* Fusion by earthquake fault friction: Stic or slip? // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. B12407.
- Ipatova I.P., Maradudin A.A., Wallis R.F.* The temperature dependence of the width of the fundamental lattice-vibrations absorption peak in ionic crystal. II. Approximate numerical results // *Phys. Rev.* 1967. V. 155, N 3. P.882–895.

- Kanamori H., Anderson D. L., Heaton T.* Frictional Melting During the Rupture of the 1994 Bolivian Earthquake // *Science*. 1998. V. 279. P.839–842.
- Kirkpatrick J.D., Dobson K.J, Mark D.F., Shipton Z.K., Brodsky E.E., Stuart F.M.* The depth of pseudotachylyte formation from detailed thermochronology and constraints on coseismic stress drop variability // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117, B06406. doi: 10.1029/2011JB008846.
- Kuzmenko A.B.* Kramers-Kronig constrained variational analysis of optical spectra // *Rev. Sci. Instr.* 2005. V. 76, 083108-1-8.
- Langer K., Raith M.* Infrared Spectra of Al-Fe(III)-Epidotes and Zoisites  $Ga_{(Al_{1-p} Fe^{3+}_p)} Al_2O(OH)[Si_2O_7][SiO_4]$  // *American Mineralogist*. 1974. V. 59. P.1249–1258.
- Madelung O.* Festkörpertheorie. Berlin: Springer Verlag, 1972. 416 s.
- Makreski P., Jovanovski G., Kaitner B., Gajovic A., Biljan T.* Minerals from Macedonia. XVIII. Vibrational spectra of some sorosilicates // *Vibrational Spectroscopy*. 2007. V. 44. P.162–170.
- Mittempergher S., Pennacchioni G., Di Toro G.* The effects of fault orientation and fluid infiltration on fault rock assemblages at seismogenic depths // *J. Structural Geology*. 2009. V. 31. P.1511–1524.
- Nielsen S., Di Toro G., Hirose T., Shimamoto T.* Frictional melt and seismic slip // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. B01308.
- Poli S., Schmidt M.W.* Experimental Subsolidus Studies on Epidote Minerals // *Reviews Mineralogy and Geochem.* 2004. V. 56. P.171–195.
- Richter H., Wang Z.P., Ley L.* The one phonon Raman spectrum in microcrystalline silicon // *Solid State Commun.* 1981. V. 39. P.625–629.
- Terry E.C., Keith L.J., Muffler P., Cremer M.* Hydrothermal epidote formed in the salton sea geothermal system, California // *American Mineralogist*. 1968. V. 53. P.1635–1644.
- Tiong K.K., Amirharaj P.M., Pollak F.H., Aspness D.E.* Effects of  $As^+$  ion implantation of the Raman spectra of GaAs: "Spatial correlation" interpretation // *Applied Phys. Lett.* 1984. V. 44. P.122–128.
- Wang G.-Y., Manga M.* Earthquakes and water. Berlin – Heidelberg: Springer, 2010. 225 p.
- Yardley B.W.D.* An Introduction to Metamorphic Petrology. N.Y.: Longman, 1989. 248 p.

#### Сведения об авторах

**СОБОЛЕВ Геннадий Александрович** – доктор физико-математических наук, член-корр. РАН, заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 8(499) 254-91-41. E-mail: sobolev@ifz.ru

**ВЕТТЕГРЕНЬ Виктор Иванович** – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН. 191021, Санкт-Петербург, Политехническая улица, д. 26. Тел.: 8(812) 292-71-39. E-mail: Victor.Vettegren@mail.ioffe.ru

**КИРЕЕНКОВА Светлана Михайловна** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 8(499) 254-89-50. E-mail: ksm@ifz.ru

**РУЖИЧ Валерий Васильевич** – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН. 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128. Тел.: 8(3952) 42-27-76. E-mail: ruzhich@crust.irk.ru

**СМУЛЬСКАЯ Анна Игоревна** – старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. E-mail: anna-smulskaya@mail.ru

**МАМАЛИМОВ Рустам Исмагилович** – кандидат технических наук, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН. 191021, Санкт-Петербург, Политехническая улица, д. 26. Тел.: (812) 292-71-39. E-mail: mamalun@mail.ru

**КУЛИК Виталий Борисович** – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН. 191021, Санкт-Петербург, Политехническая улица, д. 26. E-mail: vitaly.kulik@mail.ioffe.ru

## INVESTIGATION OF SLICKENSIDE NANOCRYSTALS FROM SEISMIC DISLOCATION ZONE

G.A. Sobolev<sup>1</sup>, V.I. Vettegren<sup>2</sup>, V.V. Ruzhich<sup>3</sup>, S.M. Kireenkova<sup>1</sup>,  
A.I. Smulskaja<sup>1</sup>, R.I. Mamalimov<sup>2</sup>, V.B. Kulik<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Ioffe Institute RAS, Saint Petersburg, Russia*

<sup>3</sup> *Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the RAS, Irkutsk, Russia*

**Abstract.** The structure of the slickenside on the surface of a porphyrite specimen was studied using Raman and infrared spectroscopy. The specimen was taken from the area of the extended Gobi-Altai seismic dislocation, created as a result of a catastrophic earthquake circa 350–250 million years ago in South Mongolia, near the Orok-Noor Lake. It was discovered that the slickenside contains epidote nanocrystals and water. It is asserted that such structure of the slickenside leads to reduction of the coefficient of friction and to creation of unstable stick-slip.

**Keywords:** slickenside, dislocation, nanocrystals, coefficient of friction.