

Об изучении зеркал скольжения в очагах палеоземлетрясений в Прибайкалье и Монголии

В.В. Ружич, В.Б. Савельева

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. В работе представлены некоторые результаты изучения собранных в экспедициях разнообразных образцов зеркал скольжения, взятых в Прибайкалье и Монголии из разновозрастных сейсмодислокаций, в том числе из глубинных сегментов зон сейсмоактивных разломов, эксгумированных на земную поверхность. С применением методов петрофизического изучения процессов гидротермально-метасоматического преобразования истертого вещества горных пород в зеркалах скольжения проводился анализ петрохимических и термодинамических процессов в очагах палеоземлетрясений, происходивших сотни миллионов лет назад в глубинных сегментах разломов. Также представлены данные натурных и лабораторных экспериментов, проведенных с целью изучения механизмов образования зеркал скольжения и тектонических псевдотахилитов, возникших при фрикционном разогреве горных пород в моменты высокоскоростных смещений в разломах. Анализ совокупности полученных новых сведений указывает на то, что всестороннее изучение зеркал скольжения позволяет дополнить существующие представления о сейсмогеологических условиях возникновения очагов палеоземлетрясений в глубинных сегментах активных разломов, а также способствует созданию новых моделей очагов землетрясений и разработке методов прогноза землетрясений. В прикладном аспекте полученные фундаментальные результаты приобретают важное значение для оценок сейсмической опасности и разработки новых методов для ее снижения.

Ключевые слова: эксгумированные очаги землетрясений, зеркала скольжения, псевдотахилиты, механизмы возникновения зеркал скольжения.

On the study of slickensides in the foci of paleoearthquakes in the Baikal region and Mongolia

V.V. Ruzhich, V.B. Savelyeva

Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. The paper presents some results of studying various samples of slip surfaces collected during expeditions, taken in the Baikal region and Mongolia from seismic dislocations of different ages, including from deep segments of seismically active fault zones exhumed to the earth's surface. Using methods of petrophysical study of the processes of hydrothermal-metasomatic transformation of abraded rock matter in slip surfaces, an analysis of petrochemical and thermodynamic processes in the foci of paleoearthquakes that occurred hundreds of millions of years ago in the deep segments of faults was carried out. Also presented are data from field and laboratory experiments conducted to study the mechanisms of formation of slip surfaces and tectonic pseudotachylytes that arose during frictional heating of rocks at moments of high-speed displacements in faults. An analysis of the totality of the new information obtained indicates that a comprehensive study of slip surfaces makes it possible to supplement existing ideas about the seismogeological conditions of the occurrence of paleoearthquake foci in the deep segments of active faults, and also contributes to the creation of new models of earthquake foci and the development of earthquake prediction methods. In the applied aspect, the obtained fundamental results become important for assessing seismic hazard and developing new methods for its reduction.

Keywords: *exhumed earthquake foci, slickensides, pseudotachylytes, mechanisms of formation of slickensides.*

Введение

В настоящее время при решении мировой проблемы, касающейся обеспечения сейсмической безопасности, усилия многих исследователей сосредоточены преимущественно на обработке и анализе неполных сейсмологических сведений и результатов кратковременных и упрощенных лабораторных экспериментов. При ограниченной значимости имеющихся сведений необходимо привлечение дополнительных результатов всестороннего геолого-геофизического изучения глубинных процессов деструкции в литосферной оболочке Земли для дальнейшего продвижения при решении проблем обеспечения сейсмической безопасности. В предлагаемой работе уделено внимание изучению зеркал скольжения, возникающих в разломах в моменты землетрясений для того, чтобы более предметно изучать тектонофизические механизмы возникновения очагов землетрясений в глубинных сегментах разломов.

Зеркалами скольжения принято называть плоскости, по которым возникает скольжение крыльев разрывных нарушений, осложненные неровностями, бороздами скольжения и уступами (Геологический словарь, 2010). Традиционный интерес к зеркалам скольжения у геологов в большинстве случаев связан с реконструкциями напряженно-деформированного состояния массивов горных пород в расширенном пространственно-временном диапазоне (Ребецкий и др., 2017). Однако в последние десятилетия значительно возрастает интерес к изучению зеркал скольжения в зонах разломов в связи с открывающимися новыми техническими возможностями получения новой информации о еще малоизвестных внутрикоровых физико-химических и геомеханических процессах в

высоконапряженных глубинных сегментах разломов, в зонах которых происходит зарождение очагов опасных землетрясений (Громин, 1970; Уткин, 1980; Ружич, Рязанов, 1977; Ружич, 1989). Также выяснилось, что по зеркалам скольжения есть возможность изучать глубинные сегменты разломов, ставших доступными на земной поверхности в результате процессов эксгумации, связанной с процессами длительной денудации верхних горизонтов земной коры (Ружич, 1997, 2009; Савельева, Ружич, 2017). Отсюда весьма актуальное значение приобретает тематика исследований в области геомеханических процессов, возникающих при жестком контактном взаимодействии и разрушении многочисленных неровностей в тектонических разломах. Выясняется, что образцы зеркал скольжения, взятые из эксгумированных глубинных сегментов разломов, содержат информацию о тектонофизических условиях возникновения очагов землетрясений в труднодоступных глубинах земной коры. Ниже рассмотрены некоторые результаты геолого-геофизического изучения зеркал скольжения, а также данные проведения лабораторных и натуральных экспериментов на природных объектах с целью выяснения условий возникновения косейсмических режимов скольжения в глубинных сегментах разломов.

Приповерхностные зеркала скольжения

Такие зеркала фиксируются в сейсмодислокациях, которые возникли при современных и исторических землетрясениях. Пример современного зеркала скольжения, возникшего на земной поверхности в сейсмодислокации при землетрясении в Японии, приведен на рис. 1.



Рис. 1. Зеркало скольжения, возникшее в сейсмодислокации на земной поверхности при одном из разрушительных землетрясений в Японии 17.01.1995. Кобе, $M=7.3$. Снимок получен от японского сейсмогеолога И. Кинугасы.

Fig. 1. A slip mirror that arose in a seismic dislocation on the earth's surface during one of the destructive earthquakes in Japan on January 17, 1995, Kobe, $M=7.3$. The photo is obtained from Japanese seismogeologist I. Kinugasa.

На фото можно видеть, что в разрывном нарушении типа взбросо-сдвига уже была пластичная глинка трения, оставшаяся от более ранней по возрасту сейсмогенной подвижки. На слое глинки трения запечатлены новые штрихи скольжения. Направление смещений и амплитуд по косейсмическому разрыву легко установить по смещению маркеров, которыми являются кромки раз-

рыва. Однако только по штрихам скольжения на зеркале подобное определение было бы затруднено. Более масштабные зеркала скольжения на земной поверхности в мезозойских глинистых осадках были особенно наглядно представлены при Гоби-Алтайском землетрясении 04.12.1957 ($M=8.1$; рис. 2.) (Солоненко, 1960).



Рис. 2. Косейсмические разрывы Гоби-Алтайского 11-балльного землетрясения 4.12.1957. ($M=8.1$). *a* – фото сегмента взбросо-свиговой сейсмодислокации и характерные присдвиговые оперяющие разрывы; *б* – зеркало скольжения в Долиноозерском разломе в урочище Хутусудж на юге Монголии (фото В.П. Солоненко, 1958 г.).

Fig. 2. Coseismic ruptures of the Gobi-Altai earthquake, 11-magnitude earthquake of December 4, 1957 ($M = 8.1$). *a* – photo of a segment of a reverse-fault seismic dislocation and character-

strike feathering faults; б – slip mirror in the Dolinozersky fault in the Khutusudzh tract in Southern Mongolia (photo by V.P. Solonenko, 1958).

На представленном участке сейсмодислокации протяженностью 257 км, возникшей в моменты этого разрушительного землетрясения, была задокументирована плоскость смещения с амплитудой 3.5 м в суглинистых толщах палеозоя. По свежим следам при обследовании на ней были обнаружены штрихи скольжения с волнообразной левосторонней взбросо-сдвиговой траекторией. Направление движений было установлено по смещениям естественных природных маркеров в виде почвенного слоя и русел временных водотоков. В приповерхностных зеркалах скольжения нет многих сведений о глубинных процессах подготовки землетрясений, поэтому важное значение приобретает изучение более информативных глубинных зеркал скольжения.

Глубинные зеркала скольжения

К глубинному типу зеркал скольжения относятся те, что возникли в недрах земной

коры в прошедшие эпохи сеймотектонических активизаций и стали доступными для визуального изучения в эксгумированных зонах разломов. Наш повышенный интерес к подобным зеркалам скольжения заключался в том, что они являются поисковыми признаками при выявлении косейсмических разрывов из очагов палеоземлетрясений, которые происходили в моменты быстрого проскальзывания и при повышенных давлениях и температурах. При определенных термодинамических РТ-условиях и повышенных скоростях скольжения (десятки и сотни см/с) на поверхности трещин достигается фрикционный разогрев до температуры плавления минералов горной породы и возникают псевдотахилиты (рис 3). На зеркалах скольжения следы плавления остаются в виде пленочного покрытия (Ружич, 2009; Wang et al., 2015).



Рис. 3. Псевдотахилит из зоны Приморского разлома в горном массиве на берегу оз. Байкал, в районе п. Куяда.

Fig. 3. Pseudotachylite from the Primorsky fault zone in a mountain range on the shore of Lake Baikal near the Kuyada village.

Следы подобных процессов нередко сохраняются сотни миллионов лет после высокотемпературных физико-химических преобразований вещества горных пород. Выявленные псевдотахилиты изучались в зонах Приморского разлома Прибай-

каля среди милонитизированных гранитов и гранодиоритов, где они слагали тонкие ветвящиеся прожилки шириной 1–5 мм в милонитизированной массе (Савельева, Ружич, 2017). Судя по шлифам, в них практически полностью из-

менено исходное состояние вещества из-за проявленного сильнейшего катаклаза, милонитизации и метасоматоза. Сочетание зеркал скольжения со следами стекловатого пленочного покрытия рассматриваются как надежный поисковый критерий для выявления глубинных палеосейсмодислокаций (Bucher, Frey, 1994; Spray, 2010; Wang et al., 2015; Савельева, Ружич, 2017). Подобные

образования на поверхности зеркал скольжения были выявлены в эксгумированных очагах палеоземлетрясений зон Болнайского и Долиноозерского разломов в Монголии (Ружич, 1989, 1997). Ниже показан изученный образец глубинного зеркала скольжения, взятого в зоне Долиноозерского разлома в пустыне Гобийского Алтая (рис. 4).

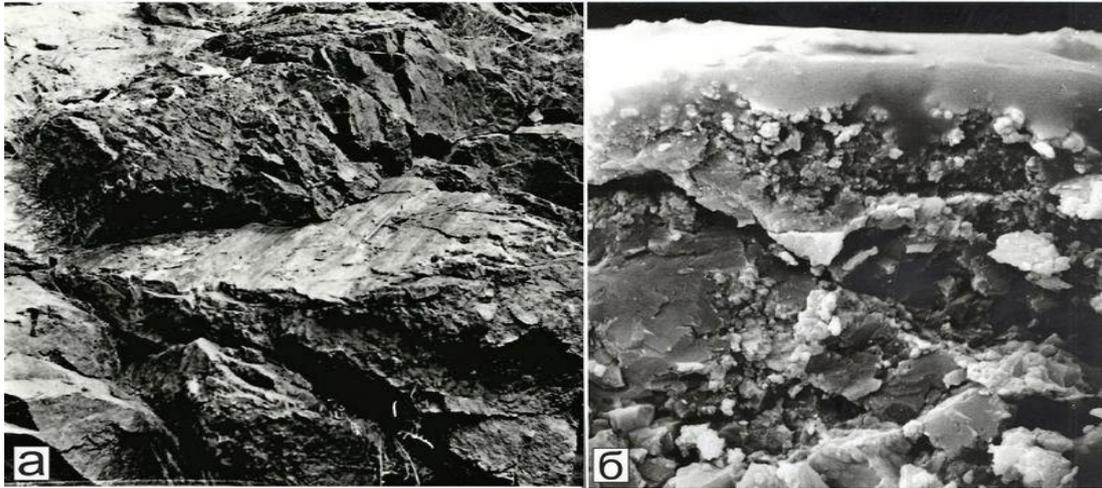


Рис. 4. Поверхность глубинного зеркала скольжения с пленкой остеклования в зоне Долиноозерского разлома, возникшего в среднем палеозое на сейсмофокальных глубинах океанической земной коры (а) и снимок этой пленки остеклования, полученный с применением электронного микроскопа (б).

Fig. 4. Deep slip surface with a vitrification film in the Dolinoozersky fault zone, which appeared in the Middle Paleozoic at seismofocal depths of the oceanic crust (a) and photo obtained using an electron microscope of this vitrification film with (b).

Поверхность осложнена штрихами скольжения, уступами и остеклованным пленочным покрытием в глубинных горизонтах земной при существовавших там РТ-условиях (Ружич, 1997). Подобного типа признаки можно увидеть на рис. 5, на котором в виде аншлифа представлен очень информативный образец древнего глубинного зеркала скольжения из этой же зоны Долиноозерского разлома. В данном образце представлены свидетельства двух палеосейсмологических событий, запечатленные после произошедших в далеком прошлом. После денудации верх-

него слоя земной коры на дневной поверхности стали доступными для геолого-геофизического изучения глубинные зеркала. Вверху образца виден тонкий слой коричневой пленки стекла. Ниже располагаются два различных желтых слоя кварц-эпидотовой гидротермальной минерализации, произошедшей в моменты инъекции флюидов в образовавшуюся полость трещины с вакуумом при двух эпизодах вскрытия косей-смического разрыва. Минерализация сходного состава заполняет и другие разновозрастные опережающие трещины растяжения.

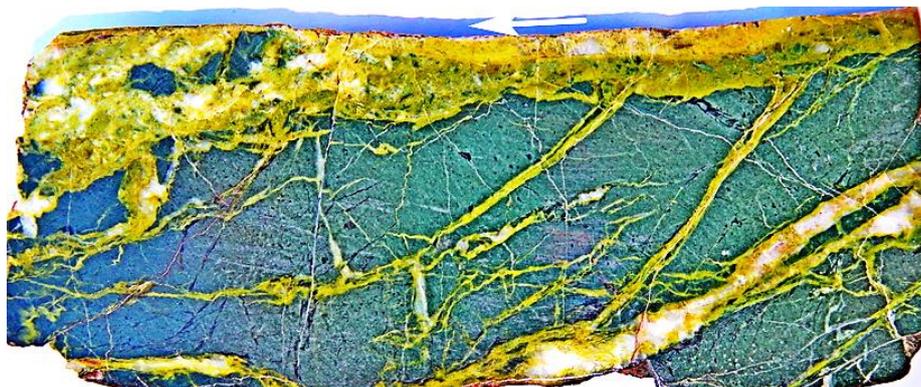


Рис.5. Аншлиф древнего глубинного зеркала скольжения, взятого из эксгумированного сегмента Долиноозерского разлома (пояснения в тексте).

Fig. 5. Polished section of an ancient deep slip surface taken from an exhumed segment of the Dolinozersky fault (explanations in the text).

Подобные инъекции флюидов в вакуумное пространство открывшихся полостей трещин происходили на сейсмофокальных глубинах земной коры при повышенном всестороннем давлении. Вероятно, флюиды с высокой скоростью проникали в освобожденное вакуумное пространство трещин в моменты косейсмического проскальзывания при землетрясениях и оставили осадок. В слое минерализации сохранились обломки разрушаемых неровностей породы, увлеченные потоками флюидов, быстро заполнявших вакуумированную полость косейсмического разрыва. Согласно существующим петрохимическим моделям, такие явления, имели место при РТ-условиях, соответствующих зеленосланцевой фазе метаморфизма на сейсмофокальном горизонте земной коры в интервале глубин 8–20 км (Савельева, Ружич, 2017). Детальное петрохимическое изучение глубинных зеркал скольжения позволяет судить о важных деталях РТ-условий формирования косейсмических разрывов в недрах земной коры при неизменном участии флюидов (Ружич и др., 2018). Белая стрелка вверху рис. 5 указывает направление смещений, происходивших по гладкой поверхности зеркала в сторону открытых углов падения оперяющих трещин. Следует обратить внимание на то, что установленное направление смещения по трещине происходило в сторону угла падения трещин оперения. Подобное условие согласуется с рассмотренным механизмом трещинообразова-

ния при сдвиге в глубинных зеркалах скольжения. По нему можно определять направленность смещений по разрывам в сторону именно против уступов, которые в действительности не существуют при сомкнутом состоянии двух сторон зеркала скольжения и потому не могут препятствовать скольжению по плоскости зеркала.

На рис. 6 представлен аншлиф другой части рассматриваемого зеркала скольжения. На нем отчетливо видны уступы, возникшие в результате обламывания заостренных окончаний горной породы в местах сочленения оперяющих трещин растяжения с плоскостью скольжения. Большой стрелкой указано направление смещений, происходивших по зеркалу против уступов и открытых углов падения оперяющих трещин. На данном образце хорошо видны уступы, возникшие при обламывании остроугольных кромок треугольных выступов образца в местах соединения оперяющих трещин с поверхностью скольжения. На рис. 6 б мелкими стрелками указаны небольшие оперяющие трещины отрыва. Они свидетельствуют о проявлении типичного механизма и сдвиговой деформации растяжения, возникающего при смещении в направлении, указанном крупными стрелками, то есть именно «против шерсти». При разъеме зеркала нередко мелкие обломки кончиков горной породы остаются на противоположной части зеркала или теряются при откалывании образцов.

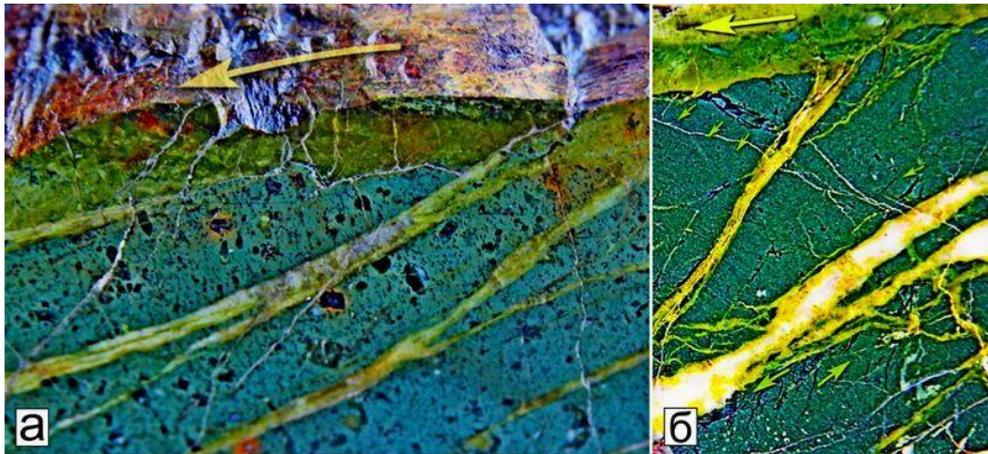


Рис. 6. Аншлиф образца древнего глубинного зеркала скольжения, взятого в зоне Долиноозерского разлома на участке эксгумированного палеочага доисторического палеоземлетрясения (а) и мелкие оперяющие трещины, отмеченные небольшими стрелками (б) (пояснения в тексте).

Fig. 6. Polished section of a sample of an ancient deep slip surface taken in the Dolinoozersky fault zone in the area of the exhumed paleo-focus of a prehistoric paleoearthquake (a) and small feathering cracks clearly visible and marked by small arrows (b) (explanations in the text).

Результаты изучения зеркал скольжения в зоне Приморского рифтогенного сброса

Далее целесообразно обратиться к более детальному описанию зеркал скольжения из

Приморского сейсмоактивного разлома, трасса которого представлена на космоснимке (рис. 7).

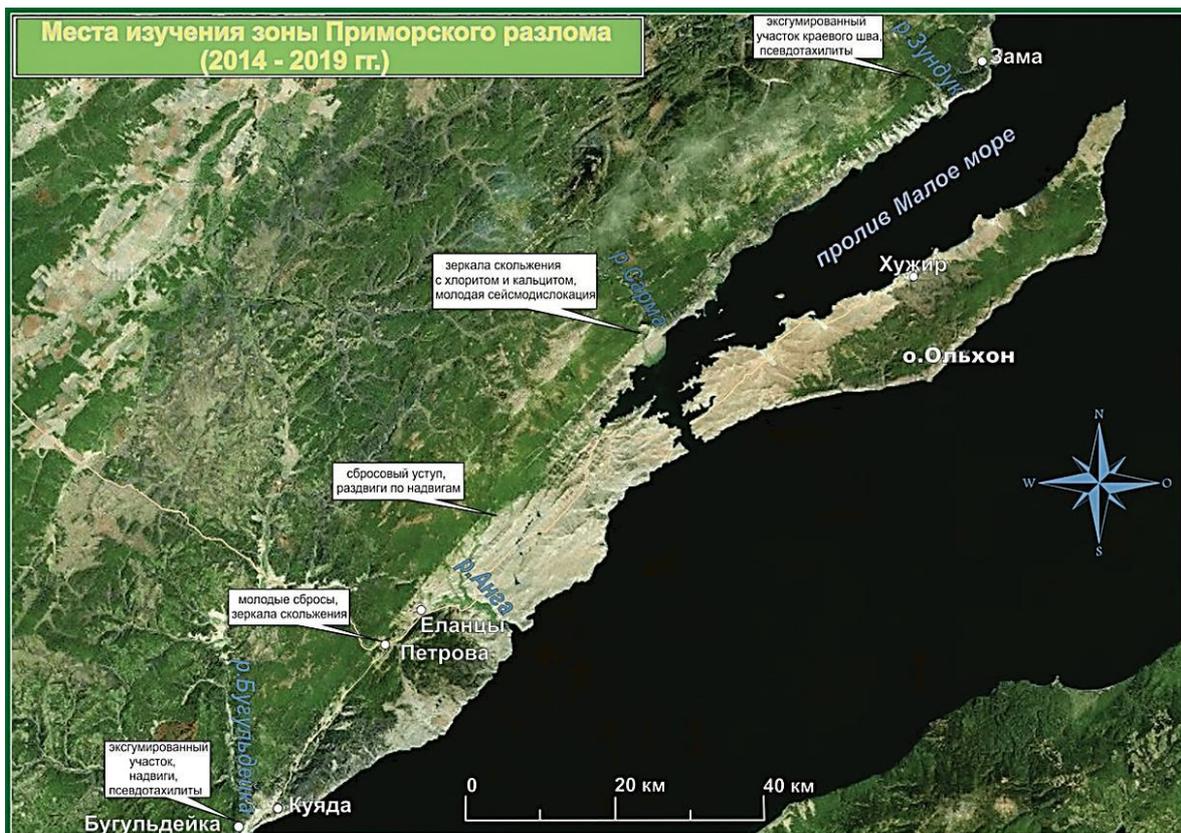


Рис. 7. Схема строения Приморского сброса, зона которого отчетливо прослеживается на космическом снимке. Прямоугольниками на схеме показаны районы, в которых проводилось детальное изучение зеркал скольжения и псевдотрахилитов.

Fig. 7. Scheme of the structure of the Primorsky fault, the zone of which is clearly visible on the satellite image. The rectangles in the diagram show the areas where a detailed study of glide mirrors and pseudotachylytes was carried out.

Имеющиеся геологические сведения о Приморском участке коллизионного краевого шва Сибирского кратона свидетельствуют об унаследованном формировании Байкальской рифтовой впадины в миоцен-плиоценовом временном интервале и ее приуроченности к древней механически ослабленной зоне краевого шва Сибирского кратона (Ружич, 1997). С начала среднего палеозоя в результате длительного многокилометрового денудационного среза зоны краевого шва происходило постепенное приближение некогда бывших глубинных сегментов разлома к земной поверхности. К настоящему времени на дневной поверхности стали доступными для визуального изучения глубинные сегменты зоны краевого шва, в которых запечатлены косейсмические разрывы Приморского сброса с соответствующими зеркалами скольжения. Их изучение открывает доступ к изучению строения и условий зарождения очагов палеоземлетрясений в дорифтовый и, собственно, рифтогенный временные этапы сейсмотектонических активизаций.

В зоне краевого шва, в скальных обнажениях устья р. Большой Бугульдейки, были выявлены и изучались многочисленные глубинные зеркала скольжения. Среди них особый интерес привлекли зеркала с проявлениями минерального залечивания флюидами с турмалиновой минерализацией. В некоторых залеченных турмалином трещинах в дальнейшем произошли косейсмические смещения, оставившие следы в виде зеркал скольжения. Абсолютный возраст и термодинамические условия, существовавшие при палеоземлетрясениях, оценивались при изучении условий, характерных для турмалиновой минерализации. Абсолютный возраст 637 ± 42 млн лет образца турмалина из глубинной трещины был определен А.В. Травиным в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований

СО РАН, (г. Новосибирск) методом $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования (Ружич и др., 2018). В последующие периоды эволюции в раннем - среднем палеозое, после эксгумации глубинных горизонтов земной коры к поверхности происходило снижение температур и давлений в недрах земной коры от эпидот-амфиболитовой фации до фации зеленых сланцев с характерным диапазоном параметров: $T \approx 350\text{--}550$ °C и $P \approx 1.5\text{--}3.5$ кбар, которые соответствуют глубинам порядка 10–12 км. В этот период очередной сейсмотектонической активизации в косейсмических разрывах, залеченных турмалином, возникали очаги палеоземлетрясений, о чем свидетельствуют зеркала скольжения и сопутствующие им псевдотачилиты. Изотопное датирование одного из образцов псевдотачилита сейсмотектонического происхождения, проведенное А.В. Травиным, показало значение 432 ± 5 млн лет. Этот результат позволил в первом приближении увязывать возраст зеркал скольжения с завершающей стадией сейсмотектонической коллизии Ольхонского террейна с Сибирским кратоном, рассмотренной в работе (Гладкочуб и др., 2014).

Далее обратимся к оценкам температур и глубин возникновения многочисленных зеркал скольжения, возникших в период рифтогенной активизации. Отбор образцов был сделан в районе п. Петрова на двух карьерах вдоль автомобильной трассы Иркутск-Еланцы. На рис. 8 представлены зеркала скольжения, возникшие в раздробленных и перетертых гранитах Приморского комплекса. Они имеют характерные уступы и признаки наличия различных следов фрикционного плавления в виде пятен тончайшей остеклованной пленки, характерной для косейсмических разрывов.

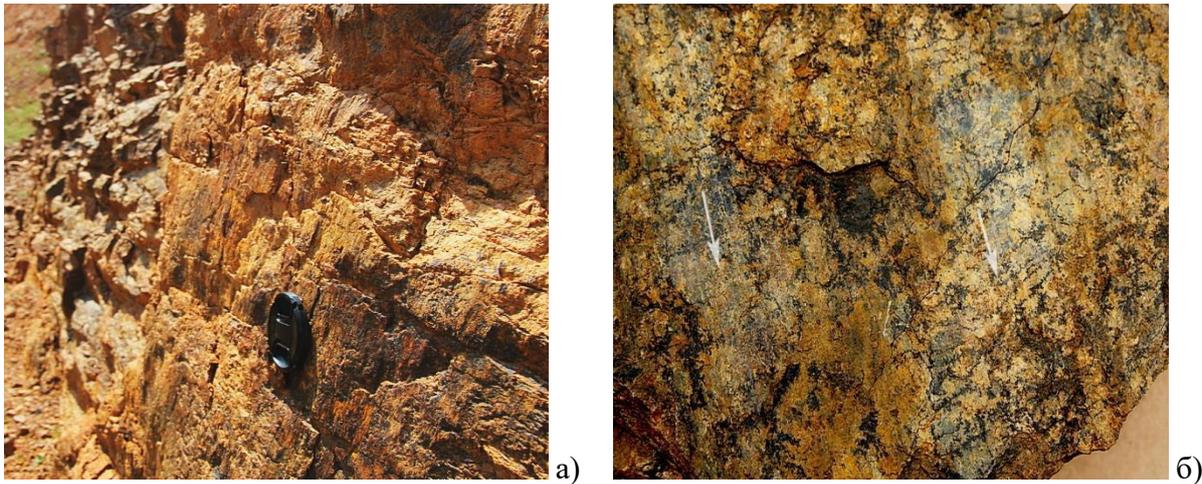


Рис. 8. Зеркало скольжения в Петровском сегменте Приморского сброса с бороздами скольжения (а) и зеркало скольжения, на котором стрелками помечены более светлые гладкие пятна (б). На фотографии (а) можно видеть, что при произошедшем рифтогенном сбросовом смещении возникли уступы, направленные в сторону скольжения навстречу уступам, вопреки «правилу» Гофера, на фотографии (б) – светлые гладкие пятна свидетельствуют о наличии тончайшей пленки остеклования.

Fig. 8. Slip surface in the segment of the Primorsky rift fault (a) and sliding mirror, on which lighter smooth spots are marked with arrows (b). On a, one can see that when a rift fault displacement occurred, most ledges were directed towards the sliding surface to meet the ledges, contrary to Gopher's "rule". On b, white smooth spots indicate presence of a thin vitrification film.

Петрохимическое изучение рифтогенных зеркал скольжения показало, что сейсмогенные деформации в обсуждаемом сегменте разлома происходили в условиях добиотитовой субфации зеленосланцевой фации при глубинных температурах порядка 300–400 °С.

О механизмах образования зеркал скольжения на разных глубинах

Физико-механические условия возникновения зеркал скольжения в приповерхност-

ных условиях при небольших давлениях, температурах и скоростях скольжения, воспроизводились в упрощенном виде посредством проведения натуральных физико-механических испытаний на плоскости Ангарского разлома с его естественными неровностями (Ostapchuk et al., 2019). Для этого использовалась армированная бетонная плита весом 0.65 тонны, установленная на реальной плоскости скольжения в сегменте Ангарского разлома с уклоном 42° (рис. 9).



Рис. 9 Экспериментальная установка для моделирования механизмов возникновения источников генерации сейсмических импульсов и зеркал скольжения с бетонной плитой, скользящей по неровностям одной из плоскостей Ангарского разлома (п. Листвянка) (а) и зеркало скольжения, возникшее при срезании неровностей (б). На фотографии б стрелка указывает направление движения плиты.

Fig. 9. An experimental setup for modeling the mechanisms of occurrence of sources of generation of seismic impulses and slip mirrors with a concrete slab sliding along the irregularities of one of the planes of the Angara fault (Listvyanka village) (a) and a slip mirror that appeared when cutting off the irregularities (b). In photograph b, the arrow indicates the direction of movement of the plate.

Экспериментально было показано, что вблизи земной поверхности возникновение зеркал скольжения происходит вследствие перемещений тяжелой плиты со срезанием ее торцевой кромкой реальных неровностей на плоскости разлома. Установленные на плите полевые сейсмические станции и датчики смещений синхронно фиксировали всплески сейсмической эмиссии, характеризующие механическое взаимодействие скользящей плиты с неровностями.

Также для изучения механизма образования зеркал скольжения проводились испытания с использованием сервоуправляемого пресса. На рис. 10 показан способ разрушения керна, содержащего залеченную кальцием природную трещину. Можно видеть естественные неровности в трещине, на которых при сдвиговом смещении образовались штрихи скольжения новообразованного зеркала. При его возникновении регистрировались пакеты сейсмоакустических импульсов, типичные для для микроземлетрясений.



Рис. 10. (а) Образец керна с минерализованной трещиной, которая при сжатии на прессе была вскрыта в момент сдвига на существовавших ранее неровностях, что привело к возникновению зеркал скольжения белого цвета с характерной штриховкой (они указаны черными стрелками) и (б) простейшая модель возникновения зеркал скольжения при механическом контактом взаимодействии неровностей в моменты смещения берегов трещины (место контактного взаимодействия отмечено прямоугольником).

Fig. 10. Core sample with a mineralized crack, which, when compressed in a press, was opened at the moment of shear on pre-existing irregularities, which led to the appearance of white slip mirrors with characteristic shading (they are indicated by black arrows) (a) and a simplest model of the appearance of slip mirrors during mechanical contact interaction of irregularities at moment of displacement of the crack faces (the place of contact interaction is marked with a rectangle) (b).

Однако в эксперименте весьма сложно воспроизвести в совокупности все геологические РТ-условия, характерные для процессов трения длительностью в сотни-тысячи лет в глубинных сегментах разломов до проявления кратковременной финальной фазы сильного землетрясения (Ружич, 1997). Наряду с подобными испытаниями, также проводились технически более сложные ла-

бораторные эксперименты для выяснения механизмов возникновения псевдотахилитов в условиях еще близких к геологическим, то есть при высоких скоростях смещений, порядка 1–2 м/с, типичных для косейсмических разрывов (Yao et al., 2023).

В Институте физики земли РАН специалистами было детально изучено строение поверхности древнего глубинного зеркала

скольжения, взятого нами на глубине 650 м со дна сверхглубокого карьера «Удачный», через который проходит зона Вилуйского разлома. Судя по минеральному покрытию поверхности зеркала скольжения установлено, что оно образовалось при температуре $T=350\text{--}450\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении $P=200\text{--}400\text{ МПа}$ (на глубине 5–8 км). В результате анализа данных, полученных методами инфракрасной и рамановской спектроскопии, в частности, было установлено, что поверхностный слой зеркала скольжения толщиной $\sim 10\text{ мкм}$ состоит из нанокристаллов кварца и альбита. Основным механизмом преобразования породы на наноуровне является динамометаморфизм в зоне разлома, вызвавший измельчение как первичного вещества, так и гидротермально-метасоматических новообразований кальцита и кварца. Установлено, что их кристаллическая решетка сжата на величину $\approx 0.6\%$, а величина эффективного напряжения сжатия решетки нанокристалла кварца составляла 0.23 ГПа. Все исследованные слои зеркала скольжения насыщены водой, которая находится в крупных пузырьках и порах (Соболев и др., 2015). Таким образом, при изучении строения зеркал скольжения на наноуровне было показано, что при сильнейшем трении на зеркалах может происходить возникновение тончайших водонасыщенных слоев, что способствует запуску высокоскоростного косейсмического скольжения (DiToro et al, 2006; Соболев и др., 2012, 2015).

Обсуждение результатов и выводы

Проведенный петрофизический анализ условий возникновения зеркал скольжения и псевдотахилитов в зонах Главного Саянского и Приморского разломов позволяет судить о процессах подготовки землетрясений на глубинных уровнях существования зеленосланцевой или эпидот-амфиболитовой фаций метаморфизма. В настоящее время в Прибайкалье и Монголии сейсмофокальный горизонт в земной коре располагается в сходных условиях.

Разрабатываемые в России и за рубежом новые методологические подходы позволяют более объективно оценивать следующие

трибологические параметры внутрикоревой подготовки очагов палеоземлетрясений: температуры, давления, наличие флюидов разного состава в залечивании косейсмических разрывов и другие (Ruzhich, Kocharyan, 2017; Кочарян и др., 2015; Кочарян, 2021).

Проведенное изучение механизмов возникновения уступов на зеркалах скольжения подтвердило ошибочность использования «правила» австрийского геолога Гофера (Höfer's rule), нередко применяемого при попытках реконструкции палеотектонических полей напряжений. Оно основано на чувствительности кожи рук и ощущении «гладкости скольжения» поверхности зеркала. Достоверность такого «правила» вызывает недоумение. Оно уже справедливо критиковалась многими упомянутыми выше геологами. Применение данного подхода во многих случаях привело к ошибочным результатам определения направленности осей сжатия и растяжения при реконструкциях палеотектонических полей напряжений в геоблоках земной коры (Ружич, 1997; Ребецкий и др., 2019). Для выяснения направленности смещений по глубинным зеркалам скольжения правильнее ориентироваться на расположение оперяющихся трещин, примыкающих к плоскостям зеркал скольжения. Но наиболее надежные сведения для этих целей могут быть получены путем выяснения направленности смещений в разрывах по установленным маркерам.

Детальное многоуровневое и многомасштабное изучение зеркал скольжения в эксгумированных сегментах сейсмоопасных разломов позволяет получать важную дополнительную информацию о трибологических режимах и механизмах подготовки очагов современных землетрясений в сегментированных участках разломов и построению адекватных моделей очагов землетрясений. Получение таких сведений необходимо для совершенствования различных видов прогноза землетрясений и разработок более эффективных способов обеспечения сейсмической безопасности.

Финансирование

Работа подготовлена в рамках государственного задания Института земной коры РАН по теме НИР «Современная геодина-

мика, механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии», № FWEF-2021-0009. Исследования проводились с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН (грант № 075-15-2021-682).

Литература

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.

Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Федоровский В.С., Мазукабзов А.М., Скляров Е.В., Лавренчук А.В., Лепехина Е.Н. Фрагмент раннепалеозойской (≈ 500 млн лет) островной дуги в структуре Ольхонского террейна (Центрально-Азиатский складчатый пояс) // ДАН – 2014. – Т. 457. – № 4. – С. 429–453.

Громин В.И. Малые структурные формы и палеореологические реконструкции (на примере Восточного Забайкалья). – Тр. Ин-та геол. и геогр. СО АН СССР. М.: Наука, 1970. С. 16–24.

Кочарян Г.Г. Возникновение и развитие процессов скольжения в зонах континентальных разломов под действием природных и техногенных факторов. Обзор современного состояния вопроса. Физика Земли. 2021. № 4. С. 3–41. DOI: 10.31857/S0002333721040062

Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Павлов Д.В., Ружич В.В., Батухтин И.В. Экспериментальное исследование различных режимов скольжения блоков по границе раздела. Часть II: Полевые эксперименты и феноменологическая модель // Физическая мезомеханика. – 2015. – Т. 18. – № 6. – С. 75–85.

Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы /; отв. редактор Ю.Г. Леонов; Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Москва: Издательство ГЕОС, 2017. 234 с.

Ребецкий Ю. Л., Маринин А.В., Л. А. Сим Л. А. Проблемы интерпретации результатов тектонофизической реконструкции палеонапряжений и возможные пути ее решения // Геология и геофизика, 2019, т. 60, № 6. С. 860—880.

Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы /; отв. редактор Ю.Г. Леонов; Институт физики Земли им. О.Ю.

Шмидта РАН. Москва: Издательство ГЕОС, 2017. 234 с.

Ружич В.В. Очаг землетрясения как объект геологического изучения // Физика Земли. 2009. № 11. С. 60–68.

Ружич В.В. Физико-механические условия формирования зеркал скольжения в зонах разломов // Геология и геофизика. 1989. № 11. С. 39–45.

Ружич В.В. Сейсмоструктурная деструкция в земной коре Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 144 с.

Ружич В.В., Рязанов Г.В. О зеркалах скольжения и механизме их образования // Механизмы формирования тектонических структур Восточной Сибири. – Новосибирск: Наука, 1977. С. 105–108.

Ружич В. В., Кочарян Г. Г., Травин А. В. (и др.) Определение РТ-условий при формировании сейсмогенных подвижек по глубинному сегменту краевого шва сибирского кратона // Доклады Академии наук. 2018. Т. 481, № 4. С. 434–437. DOI 10.31857/S086956520001774-4.

Савельева В.Б., Ружич В.В. Тектонические псевдотахилиты как свидетельство палеоземлетрясений в зонах Главного Саянского и Приморского разломов краевого шва Сибирского кратона / Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Вып. 15. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2017. С. 235–238.

Соболев Г.А., Веттегрень В.И., Ружич В.В., Иванова Л.А., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П. Исследование нанокристаллов и механизма образования зеркала скольжения // Вулканология и сейсмология. 2015, № 3. С. 3–14.

Соболев Г.А., Киреевкова С.М., Морозов Ю.А., Смольская 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.

Солоненко В.П. Гоби-Алтайское землетрясение // Геология и геофизика. 1960. №2. С. 3–27.

Уткин В.П. Сдвиговые дислокации и методика их изучения. М.: Наука, 1980. 144 с.

Bucher K., Frey M. Petrogenesis of metamorphic rocks. 6th edition complete revision of Winkler's textbook // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1994. 320 p.

Ostapchuk A.A., Pavlov D.V., Ruzhich V.V. et al. Seismic-acoustics of a block sliding along a fault // *Pure and Applied Geophysics*. 2019. P. 163–168. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02375-1>

Ruzhich V.V., Kocharyan G.G. On the structure and formation of earthquake sources in the faults located in the subsurface and deep levels of the crust. Part I. Subsurface level // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2017. Vol. 8, No. 4. P. 1021–1034. DOI:10.5800/GT-2017-8-4-0330

Spray J.G. Frictional Melting Processes in Planetary Materials: From Hypervelocity Impact to Earthquakes // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2010. Vol. 38. P. 221–254.

Wang H., Li H., Janssen C., Sun Z., Xi J. Multiple generations of pseudotachylyte in the Wenchuan Fault Zone and their influence on seismic attenuation // *Journal of Structural Geology*. 2015. Vol. 74. P. 159–171. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2015.03.007>.

Yao L., Ma S. and Di Toro G. Coseismic fault sealing and fluid pressure enhancement during earthquakes // *National Comm. Earthquake Engng.* 2023. Vol. 14. P. 1136. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36839-9>

Di Toro, G., Hirose, T., Nielsen, S., Pennacconi, G., Shimamoto, T. Natural and experimental evidence for melt lubrication of faults during earthquakes // *Science*. 2006. Vol. 311. P. 647–649.

References

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Fedorovsky V.S., Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., Lavrenchuk A.V., Lepekhina E.N. Fragment of the Early Paleozoic (\approx 500 million years) island arc in the structure of the Olkhon terrane (Central Asian fold belt) // *DAN* - 2014. - T. 457. - No. 4. - P. 429–453.

Gromin V.I. Small structural forms and paleo-rheological reconstructions (using the example of Eastern Transbaikalia). – Tr. Institute of Geol. and geogr. Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. M.: Nauka, 1970. pp. 16–24.

Kocharyan G.G. The emergence and development of sliding processes in zones of continental faults under the influence of natural and man-made factors. Review of the current state of the issue. *Physics of the Earth*. 2021. No. 4. P. 3–41. DOI: 10.31857/S0002333721040062

Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V., Ruzhich V.V., Batukhtin I.V. Experimental study of various modes of block sliding along the interface. Part II: Field experiments and phenomenological

model // *Physical mesomechanics*. – 2015. – T. 18. – No. 6. – P. 75–85.

Rebetsky Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V. From slip surfaces to tectonic stresses. Methods and algorithms /; resp. editor Yu.G. Leonov; Institute of Physics of the Earth named after. O.Yu. Schmidt RAS. Moscow: GEOS Publishing House, 2017. 234 p.

Rebetsky Yu. L., Marinin A.V., L.A. Sim L.A. Problems of interpreting the results of tectonophysical reconstruction of paleostresses and possible ways to solve it // *Geology and Geophysics*, 2019, v. 60, No. 6. P. 860–880.

Rebetsky Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V. From slip surfaces to tectonic stresses. Methods and algorithms /; resp. editor Yu.G. Leonov; Institute of Physics of the Earth named after. O.Yu. Schmidt RAS. Moscow: GEOS Publishing House, 2017. 234 p.

Ruzhich V.V. Earthquake source as an object of geological study // *Physics of the Earth*. 2009. No. 11. P. 60–68.

Ruzhich V.V. Physico-mechanical conditions for the formation of slip surfaces in fault zones // *Geology and Geophysics*. 1989. No. 11. pp. 39–45.

Ruzhich V.V. Seismotectonic destruction in the crust of the Baikal rift zone. Novosibirsk: Publishing house SB RAS, 1997. 144 p.

Ruzhich V.V., Ryazanov G.V. About slip mirrors and the mechanism of their formation // *Mechanisms of formation of tectonic structures of Eastern Siberia*. – Novosibirsk: Nauka, 1977. pp. 105–108.

Ruzhich V.V., Kocharyan G.G., Travin A.V. (et al.) Determination of PT conditions during the formation of seismogenic movements along the deep segment of the marginal suture of the Siberian craton // *Reports of the Academy of Sciences*. 2018. T. 481, No. 4. P. 434–437. DOI 10.31857/S086956520001774-4.

Savelyeva V.B., Ruzhich V.V. Tectonic pseudotachylytes as evidence of paleo-earthquakes in the zones of the Main Sayan and Primorsky faults of the marginal suture of the Siberian craton / *Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from ocean to continent): Proceedings of the meeting*. Vol. 15. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS, 2017, pp. 235–238.

Sobolev G.A., Vettegren V.I., Ruzhich V.V., Ivanova L.A., Mamalimov R.I., Shcherbakov I.P. Study of nanocrystals and the mechanism of glide

mirror formation // *Vulcanology and Seismology*. 2015, No. 3. pp. 3–14.

Sobolev G.A., Kireenkova S.M., Morozov Yu.A., Smulskaya A.I., Vettegren V.I., Kulik V.B., Mamalimov R.I. Study of nanocrystals in the zone of dynamic displacement // *Physics of the Earth*. 2012. No. 9/10. pp. 17–25.

Solonenko V.P. Gobi-Altai earthquake // *Geology and Geophysics*. 1960. No. 2. pp. 3–27.

Utkin V.P. Shear dislocations and methods for their study. M.: Nauka, 1980. 144 p.

Bucher K., Frey M. Petrogenesis of metamorphic rocks. 6th edition complete revision of Winkler's textbook // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1994. 320 p.

Ostapchuk A.A., Pavlov D.V., Ruzhich V.V. et al. Seismic-acoustics of a block sliding along a fault / *Pure and Applied Geophysics*. 2019. P. 163–168. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02375-1>

Ruzhich V.V., Kocharyan G.G. On the structure and formation of earthquake sources in the faults located in the subsurface and deep levels of the crust.

Ружич Валерий Васильевич,

*доктор геолого-минералогических наук,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
главный научный сотрудник,
email: ruzhich@crust.irk.ru.*

Ruzhich Valariy Vasilievich,

*doctor of geological and mineralogical sciences,
664033 Irkutsk, Lermontov st., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Major Researcher,
email: ruzhich@crust.irk.ru.*

Part I. Subsurface level // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2017. Vol. 8, No. 4. P. 1021–1034. DOI:10.5800/GT-2017-8-4-0330

Spray J.G. Frictional Melting Processes in Planetary Materials: From Hypervelocity Impact to Earthquakes // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2010. Vol. 38. P. 221–254.

Wang H., Li H., Janssen C., Sun Z., Xi J. generations Multiple of pseudotachylyte in the Wenchuan Fault Zone and their influence on seismic attenuation // *Journal of Structural Geology*. 2015. Vol. 74. P. 159–171. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2015.03.007>.

Yao L., Ma S. and Di Toro G. Coseismic fault sealing and fluid pressure enhancement during earthquakes // *National commune*. 2023. Vol. 14. P. 1136. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36839-9>

Di Toro, G., Hirose, T., Nielsen, S., Pennacconi, G., Shimamoto, T. Natural and experimental evidence for melt lubrication of faults during earthquakes // *Science*. 2006. Vol. 311. P. 647–649.

Савельева Валентина Борисовна,

*кандидат геолого-минералогических наук,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
старший научный сотрудник,
email: vsavel@crust.irk.ru.*

Savelyeva Valentina Borisovna,

*Candidate of geological and mineralogical sciences,
664033 Irkutsk, Lermontov st., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Senior Researcher,
email: vsavel@crust.irk.ru.*