

УДК 550.34; 539.37

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИНИЦИИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОДВИЖЕК ПО РАЗЛОМАМ, СОДЕРЖАЩИХ КОНТАКТНЫЕ ПЯТНА. ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

© 2023 г. Г. А. Гридин^{1, 2, *}, А. А. Остапчук^{1, 2, **}¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

*E-mail: gagridin@gmail.com

**E-mail: ostapchuk.aa@phystech.edu

В настоящей работе рассмотрены закономерности сдвигового деформирования модельных разломов, содержащих контактные пятна различного вещественного состава. В качестве геоматериала, слагающего контактные пятна, были использованы измельченные образцы кварцитов и амфиболитов, отобранных на эксгумированных на дневную поверхность сейсмогенном и асейсмичном участках Приморского разлома Байкальской рифтовой зоны. Показано, что вещественный состав не влияет на закономерности накопления деформаций. В ходе увеличения сдвигового усилия в окрестности контактного пятна формируется «запертая» область, где фиксируется дефицит деформаций. При реализации накопленных на модельном разломе деформаций вещественный состав имеет радикальное влияние. На кварц содержащих контактных пятнах со свойством скоростного разупрочнения реализуются динамические подвижки, которые сопровождаются излучением колебаний в диапазоне частот от 1 Гц до 80 кГц. В то же время при подвижке по амфибол содержащему контактному пятну со свойством скоростного упрочнения регистрируются только колебания в диапазоне частот 20–80 кГц, колебания с частотой менее 10 кГц не выявлены. Показано, что вследствие динамических подвижек происходят микроструктурные изменения геоматериала контактных пятен. В плоскости скольжения происходит неравномерное истирание минералов, а также вторичное минералообразование. В результате быстрых динамических подвижек по кварц содержащим контактным пятнам фиксируются высокотемпературные фазовые превращения кварца в тридимит при температуре $\sim 700^\circ\text{C}$.

Ключевые слова: медленные землетрясения, скоростное упрочнение, микроструктурные изменения, лабораторный эксперимент, сейсмоакустическая эмиссия.

Для цитирования: Гридин Г.А., Остапчук А.А. Закономерности инициирования динамических подвижек по разломам, содержащих контактные пятна. Лабораторный эксперимент // Динамические процессы в геосферах. 2023. Т. 15. № 4. С. 15–24. http://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_4_15

Введение

Понимание закономерностей зарождения и реализации различных режимов скольжения по разломам является неотъемлемой частью исследований при разработке методов снижения сейсмической опасности. При разработке месторождений полезных ископаемых интенсификация воздействия на среду приводит к активизации сейсмо-деформационных процессов, что в условиях небольшой глубины залегания гипоцентров может приводить к крупным экономическим потерям даже при средних землетрясениях с магнитудой 3–4 [Trutnevye, Azevedo, 2018].

При деформировании на берегах разломов на любом иерархическом уровне формируется пространственно-неоднородное напряженное состояние, а именно, области локализации напряжений, так называемые контактные пятна, и относительно разгруженные области. В ходе длительной

эволюции в разгруженных областях активно протекают метасоматические процессы – происходит замещение сильных минеральных фаз слабыми, а также порода приобретает свойство скоростного упрочнения; в зонах контактных пятен фрикционное сопротивление остается высоким, а порода имеет свойство скоростного разупрочнения [Collettini et al., 2019; Kocharyan, 2021]. Площадь контактных пятен составляет порядка 20–30% от площади поверхности скольжения разлома [Ostapchuk et al., 2022]. Взаимное расположение участков разлома с различными фрикционными свойствами определяет весь ход развития сейсмогенного разрыва и закономерности скольжения вдоль разлома [Kocharyan et al., 2021]. Косейсмический разрыв всегда стартует на границе контактных пятен, а в зонах скоростного упрочнения между контактными пятнами скорость разрыва быстро снижается. Если размер зоны со свойством скоростного упрочнения достаточно велик, то происходит остановка разрыва. Характерный размер контактных пятен в среднем в 1.5–3 раза меньше длины косейсмического разрыва [Кочарян, Кишкина, 2020].

Основной задачей проведения лабораторных исследований по моделированию скольжения по разлому является поиск основных физических механизмов, обуславливающих развитие деформационных процессов в разломных зонах. В лабораторных экспериментах могут быть изучены, чаще по отдельности, многие аспекты процесса подготовки и реализации подвижек по разломам: законы трения, фрикционный износ и динамометаморфическое преобразование пород, особенности излучения упругих колебаний. В настоящей работе рассмотрены особенности реализации подвижек вдоль модельных разломов, содержащих контактные пятна с разным вещественным составом, а также исследованы импульсы, сопровождающие подвижки по разломам. В качестве геоматериала, слагающего контактные пятна, были использованы образцы горных пород, отобранные с ядра сейсмогенного и асейсмического сегментов Приморского разлома Байкальской рифтовой зоны.

Методика проведения экспериментов

Эксперименты проводились на установке двухосного нагружения РАМА, созданной в лаборатории Деформационных процессов в земной коре ИДГ РАН (рис. 1). Подробное описание установки представлено в [Кочарян и др., 2022]. Модельный разлом представляет собой контакт шероховатых поверхностей блоков диабазы и имеет размер 750×120 мм². В ходе эксперимента блоки под действием нормального и сдвигового усилий скользят друг относительно друга. Нормальное усилие создавалось 4 домкратами J_s и составляло 2 МПа. Сдвиговое усилие создавалось домкратом J_n , шток 8 (рис. 1а) которого выдвигался с постоянной скоростью 25 мкм/с.

В ходе эксперимента относительное перемещение блоков контролировалось системой из 5 лазерных датчиков перемещения D , которые располагались вдоль всей длины модельного разлома, как показано на рис. 1а. Смещение блоков измерялось с точностью 0.15 мкм в диапазоне частот 0–5 кГц. Для регистрации упругих колебаний, излучаемых в процессе эксперимента, на верхней свободной поверхности были установлены датчики Brüel&Kjaer 4344 (B) (рабочий диапазон частот 0–10 кГц) и Vallen Systeme VS-30-V (V) (рабочий диапазон частот 20–80 кГц) с предусилителем Vallen Systeme АЕР5 с усилением 34 дБ. Все датчики крепились на поверхности блоков на парафиновую смазку, обеспечивающую удовлетворительный акустический контакт.

Важным этапом подготовки экспериментов являлось создание контактного пятна на бортах модельного разлома. Для этого в промежутке между блоками диабазы вставлялся лист фторопласта толщиной 4 мм. В середине фторопластового листа был вырезан эллипс с размерами полуосей 5 и 10 см (рис. 1б). Относительная площадь контактного пятна составляла 17% от площади модельного разлома. Затем пустота в листе фторопласта заполнялась смесью цемента и перетертого мелкодисперсного природного материала (отношение по массе цемента, природного материала и воды составляло 1:1:0.4). После заполнения нормальное напряжение на модельном разломе повышалось до 2 МПа, и образец оставался под нагрузкой 18 ч для сцементирования контактного пятна. В качестве природных материалов использовались раздробленный кварцит со свойством скоростного

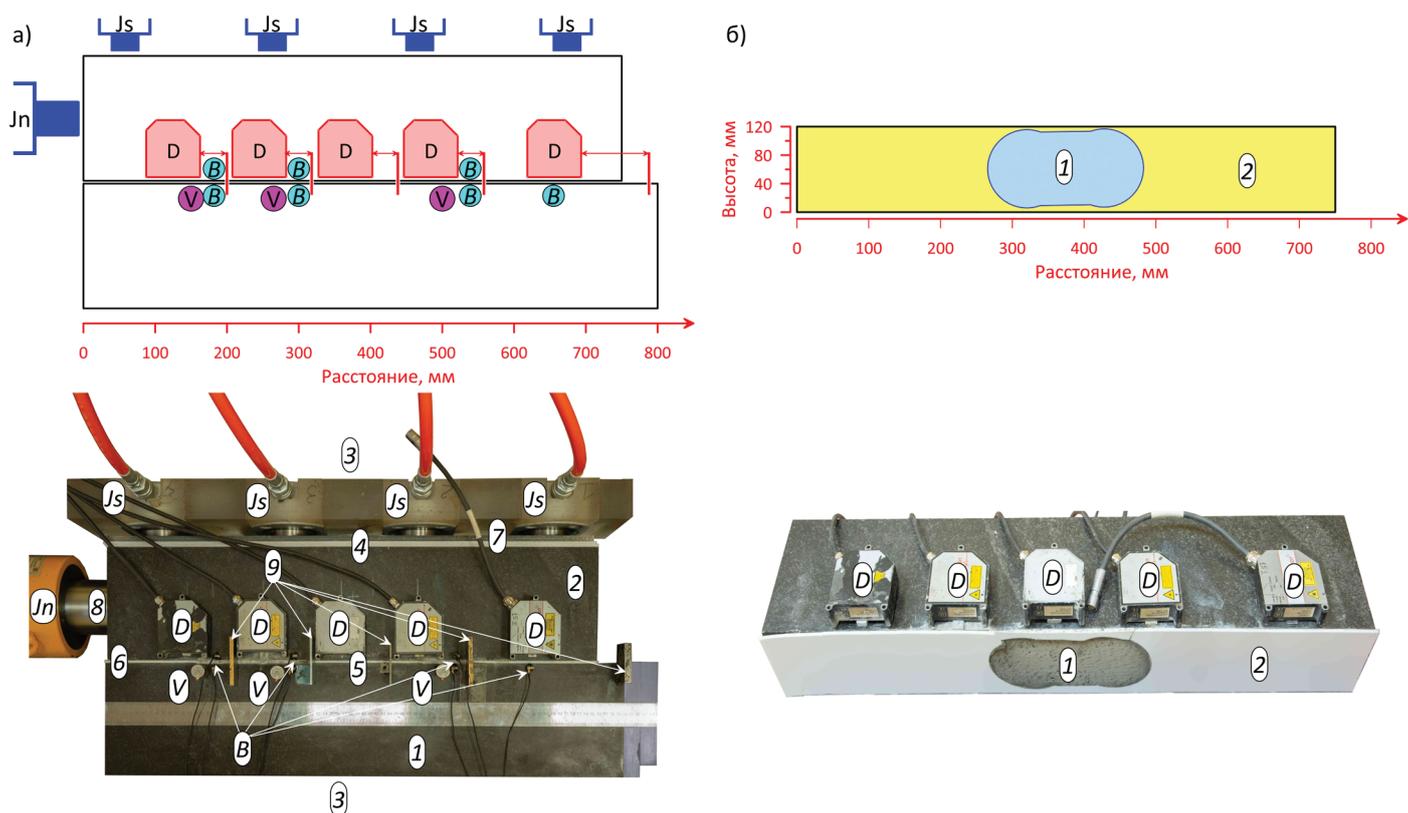


Рис. 1. Экспериментальный стенд RAMA: а – схема проведения экспериментов и фото (вид сверху): 1 – неподвижный блок, 2 – подвижный блок, 3 – стальная рама, 4 – интерфейс низкого трения, 5 – модельный «асперити», 6 – лист фторопласта между скальными блоками, 7 – стальная пластина, 8 – шток домкрата, 9 – мишени датчиков перемещения, J_n , J_s – домкраты, создающие нормальное и сдвиговое усилие, D – лазерные датчики перемещения, B – акселерометры, V – датчики акустической эмиссии; б – схема и фото конфигурации плоскости разломной зоны: 1 – контактное пятно, 2 – фторопласт

разупрочнения и амфиболит со свойством скоростного упрочнения. Размер частиц раздробленной породы брался в соотношении 30 на 70% с размерами 100–160 мкм и 160–250 мкм соответственно. Образцы горных пород были отобраны на эксгумированных на дневную поверхность сейсмогенных участках Приморского разлома Байкальской рифтовой зоны [Свидетельство..., 2023].

Результаты

Механическое поведение модельных разломов, содержащих контактные пятна с различным составом, имеют схожий вид. На рис. 2 представлены закономерности изменения механических параметров модельного разлома в процессе нагружения.

Конфигурация модельного разлома, содержащего участок повышенной прочности – контактное пятно, обуславливает особенности накопления относительного перемещения вдоль линии разлома. В окрестности контактного пятна формируется «запертый» участок, на котором относительное смещение берегов разлома происходит с заметно меньшей скоростью. Над контактным пятном скорость относительного смещения составляет 0.1 мкм/с, вдали от пятна – 0.8 мкм/с. Низкая скорость накопления перемещений наблюдается вплоть до момента времени 88.3 с, когда удельное сопротивление сдвигу достигает 0.44 (94% от максимума). При $t = 88.3$ с скорость относительного смещения в окрестности пятна резко возрастает до 5 мкм/с, вдали от пятна – до 4 мкм/с. В момент времени $t = 91.5$ с инициируется динамическая подвижка, при которой наблюдается резкое снижение коэффициента трения на 0.09 и максимальная скорость относительного смещения достигает 1.2 мм/с.

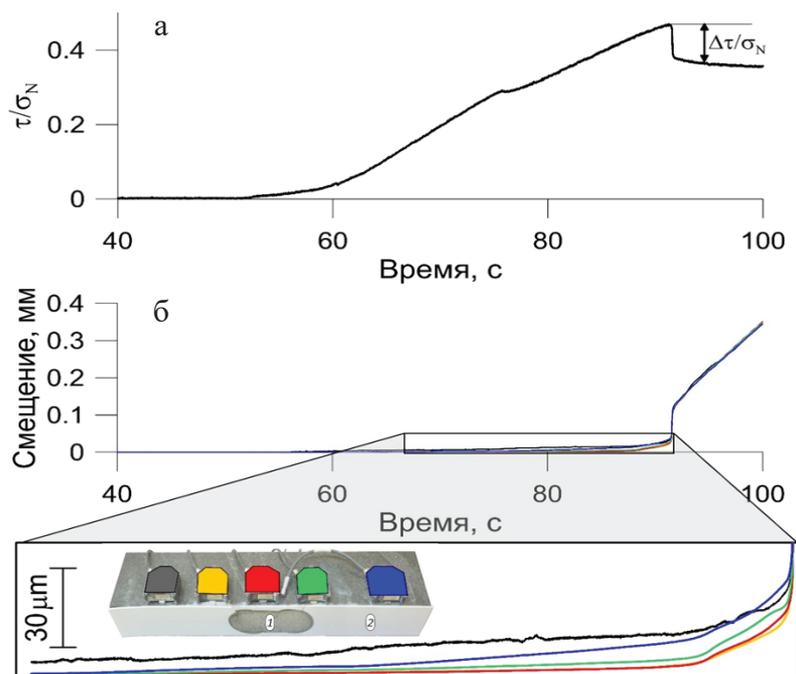


Рис. 2. Эволюция состояния модельного разлома с амфибол содержащим контактным пятном. а – закономерности изменения во времени удельного сопротивления сдвигу (τ/σ_N); б – относительное смещение берегов разлома. На врезке увеличен временной интервал 65–92 с. Цвет линий соответствует цвету датчиков, расположенных вдоль линии разлома

Аналогичные закономерности механического поведения наблюдаются на разломе с кварц содержащим контактным пятном. Параметры динамических событий, реализованных на разломах с различными типами контактных пятен, представлены в табл. 1. Можно видеть, что разломы с разными пятнами имеют близкую фрикционную прочность, при этом скорость подвижки в 4 раза выше на разломе с кварц содержащим контактным пятном. Также для событий был оценен скалярный сейсмический момент M_0 , реализованный в ходе подвижки, согласно соотношению [Адушкин и др., 2016]:

$$M_0 = \sum GS_i U_i, \quad (1)$$

где G – модуль сдвига блоков, U_i – амплитуда смещения сегмента разлома, зафиксированная лазерными датчиками перемещения, S_i – площадь сегмента разлома.

Таблица 1.

Параметры событий динамического проскальзывания на разломах с различными контактными пятнами и скейлинговый параметр b -value

Тип	τ_{\max}/σ_N	$\Delta\tau/\sigma_N$	V_{\max} , мм/с	M_{lab} , Н·м	b -value
1	0.47	0.09	1.2	$3.7 \cdot 10^6$	1.09
2	0.54	0.15	5.1	$5.6 \cdot 10^6$	0.91

Примечание: 1 – амфибол содержащее контактное пятно, 2 – кварц содержащее контактное пятно.

В ходе нагружения относительное смещение берегов разлома сопровождается излучением упругих колебаний. На стадии подготовки динамической подвижки импульсы регистрируются только датчиками акустической эмиссии (АЭ) (20–80 кГц). Наблюдаются импульсы различной волновой формы, а их статистика АЭ описывается степенным законом (рис. 3):

$$p \sim A^{-b}, \quad (2)$$

где A , дБ – амплитуда АЭ. Скейлинговый параметр b -value существенно отличается для разломов с различными типами контактных пятен. Для модельного разлома с амфибол содержащим контактным пятном, характеризующимся свойством скоростного упрочнения, значение b -value значительно выше (табл. 1).

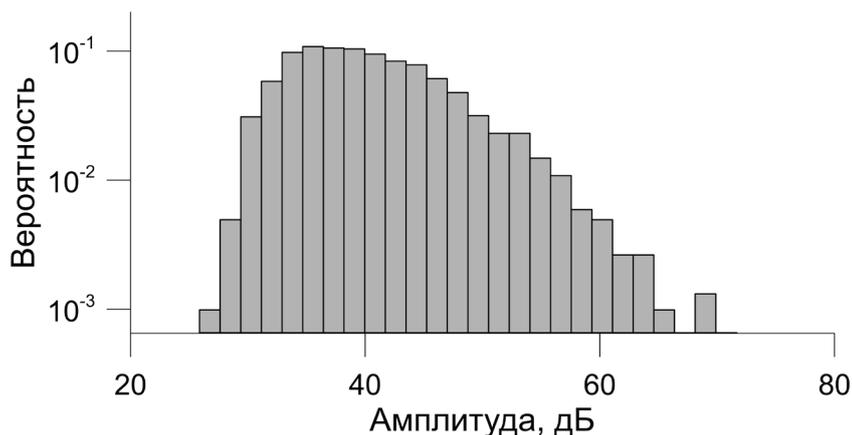


Рис. 3. Статистика АЭ, зарегистрированной на стадии подготовки динамической подвижки на разломе с амфибол содержащим контактным пятном

Различный вещественный состав и, следовательно, фрикционные свойства контактных пятен могут оказать существенное влияние на излучение упругих колебаний при реализации динамической подвижки по разлому. На рис. 4 представлены волновые формы импульсов в различных диапазонах частот, которые сопровождают реализацию динамических подвижек.

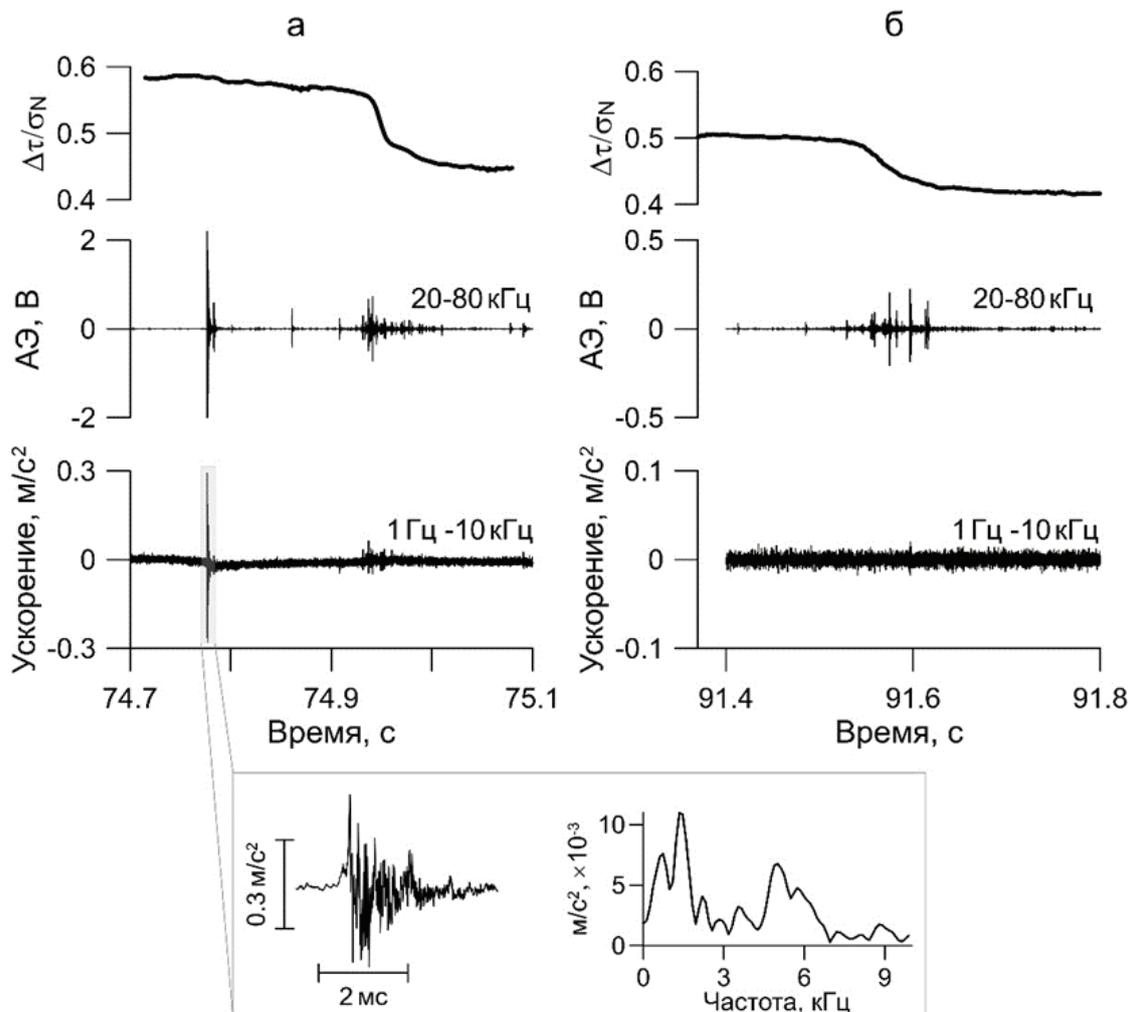


Рис. 4. Упругие колебания, зарегистрированные при инициировании динамических подвижек для кварц (а) и амфибол (б) содержащих контактных пятен; представлены закономерности изменения во времени удельного сопротивления сдвигу при динамической подвижке. На врезке внизу представлен импульс, зарегистрированный в диапазоне частот 1 Гц–10 кГц при динамической подвижке по кварц содержащему контактному пятну, и его амплитудный спектр

При подвижке по амфибол содержащему контактному пятну регистрируются только высокочастотные колебания в диапазоне 20–80 кГц, в диапазоне частот менее 10 кГц колебания не фиксируются. Длительность «роя» импульсов акустической эмиссии сопоставима с длительностью подвижки. При подвижке по кварц содержащему контактному пятну колебания регистрируются во всем диапазоне частот. В области частот 1 Гц–10 кГц колебания длительностью 2 мс фиксируются в начальный момент снижения удельного сопротивления сдвигу, в частотной области 20–80 кГц в этот момент фиксируется импульс максимальной амплитуды. В дальнейшем скольжение по контактному пятну сопровождается излучением только колебаний в диапазоне частот 20–80 кГц.

Динамические подвижки по модельному разлому могут приводить к микроструктурным изменениям геоматериала, слагающего контактные пятна, а также вторичному минералообразованию. Для выявления микроструктурных изменений геоматериала и минеральных преобразований в нем было изучено вещество в зоне контакта до и после эксперимента. Для этого перед экспериментом из готовой смеси цемента и перетертого мелкодисперсного природного материала выделялась область для проведения петрографического описания, изучения минерального состава с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и синхронного термического анализа (СТА). После эксперимента из модельного разлома извлекалось контактное пятно и повторялись вышеописанные исследования в контактной зоне.

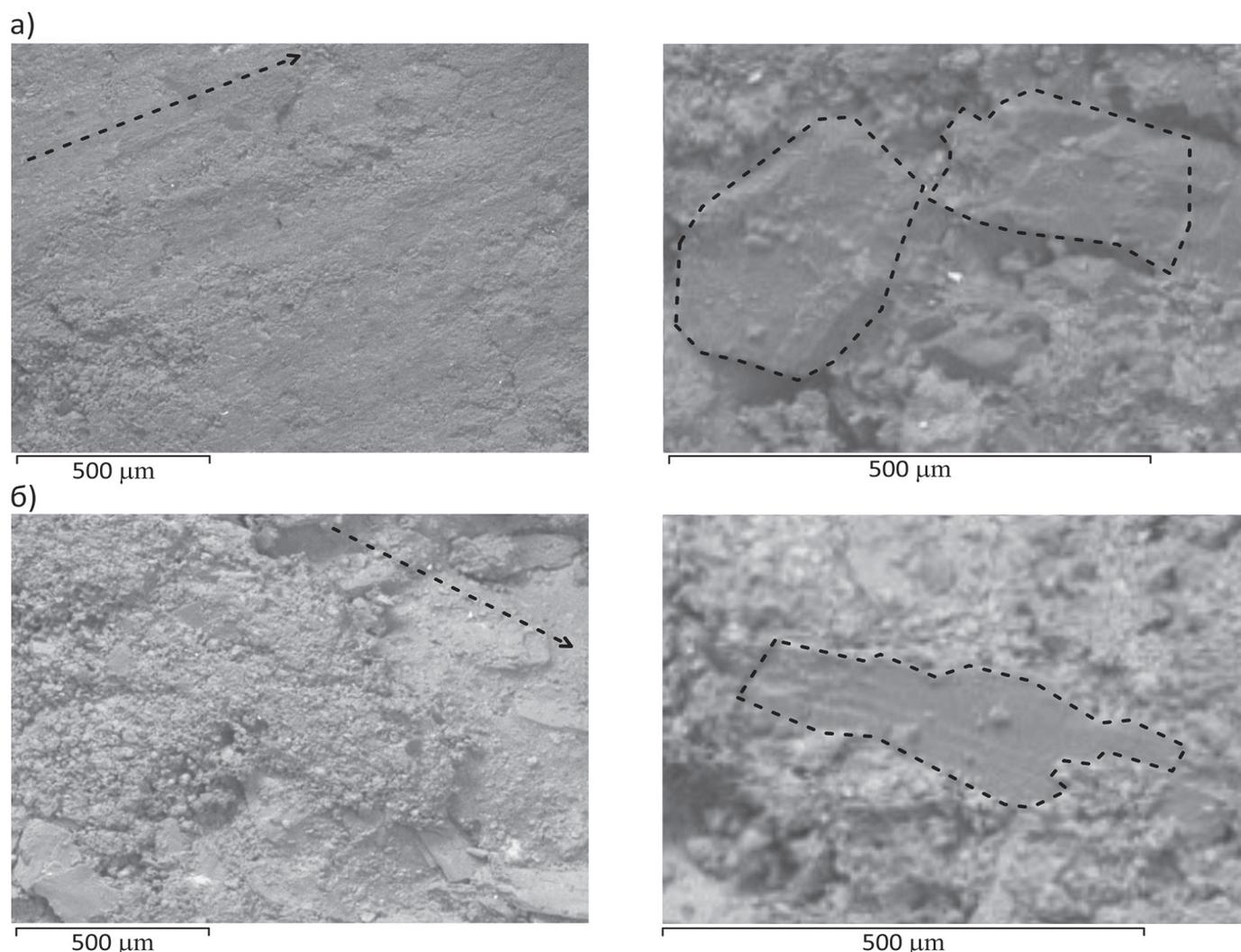


Рис. 5. Фотографии плоскости скольжения контактных пятен после эксперимента: а – кварц содержащее контактное пятно, б – амфибол содержащее контактное пятно. Пунктирными линиями показаны направления подвижек; пунктирным контуром выделены кристаллы с признаками смещений по ним

В результате сравнения полученных данных в рамках СЭМ были выявлены области «зеркал скольжения», определен локальный химический состав образца в этих участках, и определены минеральные преобразования, произошедшие в образце вследствие подвижки. В рамках СТА была выполнена синхронная регистрация изменения массы образца геоматериала и количества подводимого тепла при нагревании. Сравнение кривых нагревания образцов до и после эксперимента позволяет предположить о возможных фазовых превращениях вещества.

На рис. 5 представлены изображения поверхностей скольжения контактных пятен после эксперимента. Заметно неравномерное распределение кристаллического кварца в породе, часть которого перетирается в плоскости зеркала скольжения вместе с полевыми шпатами и карбонатами, а остальная часть остается в виде очаговых скоплений кристаллов. По данным СТА в результате динамической подвижки во время эксперимента часть кварца исходного образца переходит в другую структурную форму при температурах $\sim 700^\circ\text{C}$. Наблюдается образование новой модификации кварца – тридимита. Кроме того, в результате эксперимента вдоль плоскости скольжения отмечаются редкие листочки серицита, по всей вероятности, образовавшегося в результате преобразования полевых шпатов.

Для амфибол содержащего контактного пятна отмечается частичное незначительное замещение амфибола хлоритом и биотитом, но, вследствие слишком малого временного интервала динамического воздействия, этот процесс не нашел своего продолжения, он фиксируется только в редких краевых частях зерен амфибола. В плоскости скольжения истирание минералов происходит неравномерно, вследствие их различного кристаллического строения. Пластинчатые минералы, такие как амфиболы, дольше сохраняют форму, поскольку внутри отдельных слоев кристалла существуют более сильные межмолекулярные связи, а минеральные агрегаты, состоящие из кварца, быстрее разрушаются.

Заключение

В рамках проведенных экспериментов было исследовано влияние вещественного состава контактных пятен, который определяет их фрикционные свойства, на закономерности развития и реализации динамических подвижек по модельному разлому. Постановка экспериментов, когда на разломе сформирована зона повышенной прочности со свойством скоростного разупрочнения, ограниченная областью со свойством скоростного упрочнения, соответствует упрощенной современной модели тектонического разлома [Kanamori, Stewart, 1978; Collettini et al., 2019], которая широко используется для интерпретации результатов сейсмических и геодезических наблюдений [Scholz, 2019].

Макроскопически разломные зоны характеризуются систематическим изменением свойств разлома вдоль простирания [Ружич и др., 2024]. В процессе нагружения в зонах повышенной прочности формируются «запертые» участки, где накапливается дефицит относительного перемещения берегов. В лабораторных экспериментах, в условиях близких к квазистатическому нагружению, вещественный состав контактных пятен не имел существенного влияния на закономерности накопления дефицита перемещения. Увеличение дефицита перемещения наблюдается на протяжении всей стадии нагружения и отчетливо проявляется в различии скоростей смещения различных сегментов разлома. На заключительной стадии эволюции в области контактного пятна фиксируется ускоренный предсейсмический кризис, который частично компенсирует дефицит перемещения и является надежным индикатором подготовки динамической подвижки. Полная ликвидация дефицита наблюдается только после реализации подвижки.

На стадии нагружения различие вещественного состава проявляется в статистике АЭ. Так, для амфибол содержащего контактного пятна скейлинговый параметр *b-value* имеет существенно большие значения, чем для кварц содержащего. Это значит, что на пятнах со свойством скоростного упрочнения существенно выше доля низкоамплитудных импульсов АЭ и, следовательно, ниже вероятность инициирования высокоамплитудного импульса. Аналогичные закономерности при изменении структуры и фрикционных свойств материала были получены в экспериментах по сдвиговому

деформированию тонких слоев гранулированных сред [Морозова, Остапчук, 2019]. В природе пространственное изменение структурных и фрикционных свойств разлома будут сопровождаться изменением его режима скольжения [Ружич и др., 2024]. Следовательно, в природе следует ожидать, что изменение режима скольжения вдоль простирания разлома должно коррелировать с изменением скейлингового параметра *b-value* [Vorobieva et al., 2016].

Поиск корреляций между режимом скольжения по разлому и регистрируемыми сейсмическим и акустическим колебаниями требует проведения синхронного и высокоточного геодезического и сейсмологического мониторинга. В рамках выполненных лабораторных исследований удалось показать, что определяющее значение для закономерностей инициирования динамических подвижек играют фрикционные свойства контактных пятен. Если деформирование контактных пятен всегда сопровождается излучением высокочастотных импульсов, то реализация динамической подвижки по контактным пятнам со свойством скоростного упрочнения будет «тихой», без излучения низкочастотного импульса. В природе данные «тихие подвижки» аналогичны рою слабой сейсмичности, сопровождающей события медленного скольжения [Peng, Gombert, 2010; Frank et al., 2016].

В природе инициирование, развитие и остановка динамического скольжения определяется процессами, протекающими в разломных зонах на различных масштабных уровнях от контактов отдельных зерен ($\sim 10^{-6}$ м) до размеров тектонических плит ($\sim 10^6$ м). На всех масштабных уровнях прослеживается дифференциация вещества, слагающего исследуемый объект, коррелирующая с режимом скольжения [Kocharyan, 2021]. В ходе экспериментов удалось продемонстрировать, что преобразование вещества в зонах формирования динамических подвижек существенно зависит от интенсивности деформаций и режима скольжения. Действительно, в качестве основных признаков древних косейсмических разрывных нарушений, эксгумированных на дневную поверхность, обычно используют ультракатакластический характер переработки породы, зеркала скольжения и фрикционный разогрев вещества горных пород в виде пленочного стекловидного покрытия зеркал скольжения, а также стрессметаморфизм с появлением новых минеральных образований [Ружич и др., 2018; 2024]. Отсутствие свидетельств реализации сейсмогенных разрывов может отчасти служить индикатором асейсмического скольжения по сегменту разлома, при этом вещество, слагающее ядро разлома, должно проявлять свойство скоростного упрочнения. Медленные землетрясения фиксируются на сегментах, сложенных глинистыми минералами, включая смектиты, которые проявляют свойство скоростного упрочнения [Saffer, Wallace, 2015; Bürgmann, 2018]. Следовательно, полученные в ходе лабораторных экспериментов результаты показывают, что выявление структурных и физико-механических особенностей тектонических нарушений позволяет получить критические сведения о сейсмогенерирующем потенциале локальных сегментов тектонических разломов.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-27-00565).

Список литературы

Адушкин В.В., Кочарян Г.Г., Остапчук А.А. О параметрах, определяющих долю энергии, излучаемой при динамической разгрузке участка массива горных пород // Доклады Академии Наук. 2016. Т. 467. № 1. С. 86–90. <http://doi.org/10.7868/S0869565216070173>

Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б. Физическая мезомеханика очага землетрясения // Физическая мезомеханика. 2020. Т. 23. № 6. С. 9–24. <http://doi.org/10.24411/1683-805X-2020-16001>.

Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Павлов Д.В., Гридин Г.А., Морозова К.Г., Hongwen J., Пантелеев И.А. Лабораторные исследования закономерностей фрикционного взаимодействия блоков скальной породы метрового масштаба. Методика и первые результаты // Физика Земли. 2022. № 6. С. 162–174. <http://doi.org/10.31857/S0002333722060060>

Морозова К.Г., Остапчук А.А. Определение внутренней структуры модельного разлома по данным

акустической эмиссии // Современная тектонофизика. Методы и результаты: Материалы шестой молодежной тектонофизической школы-семинара (Москва, 07–12 октября 2019 г.). Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 2019. С. 163–165.

Ружич В.В., Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Шилько Е.В. Разномасштабные неоднородности в сегментах сейсмоактивных разломов и их влияние на режимы скольжения // Физическая мезомеханика. 2024. (в печати).

Ружич В.В., Кочарян Г.Г., Савельева В.Б., Травин А.В. О формировании очагов землетрясений в разломах на приповерхностном и глубинном уровне земной коры. Часть II. Глубинный уровень // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 1039–1061. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0383>

Свидетельство о регистрации базы данных RU 2023621889 Российская Федерация. Цифровой каталог образцов горных пород Приморского разлома / Г.А. Гридин, А.А. Остапчук, Д.В. Павлов, А.В. Григорьева, С.А. Устинов (RU) ; правообладатель ИДГ РАН – № 2023621610 ; заявл. 01.06.2023 ; опубл. 07.06.2023.

Bürgmann R. The geophysics, geology and mechanics of slow fault slip // Earth and Planetary Science Letters. 2018. Vol. 495. P. 112–134. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.062>

Collettini C., Tesei T., Scuderi M.M., Carpenter B.M., Viti C. Beyond Byerlee Friction, Weak Faults and Implications for Slip Behavior // Earth and Planetary Science Letters. 2019. Vol. 519. P. 245–263. <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.05.011>

Frank W., Shapiro N.M., Husker A., Kostoglodov V., Gusev A.A., Campillo M. The evolving interaction of low-frequency earthquakes during transient slip // Science Advances. 2016. Vol. 2 (4). <http://doi.org/10.1126/sciadv.1501616>

Kanamori H., Stewart G.S. Seismological aspects of the Guatemala earthquake of February 4, 1976 // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1978. Vol. 83 (B7). P. 3427–3434. <http://doi.org/10.1029/JB083iB07p03427>

Kocharyan G.G. Nucleation and Evolution of Sliding in Continental Fault Zones under the Action of Natural and Man-Made Factors: A State-Of-The-Art Review // Izvestiya Physics of the Solid Earth. 2021. Vol. 57 (4). P. 439–473. <http://doi.org/10.1134/S1069351321040066>

Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V. Fault Sliding Modes–Governing, Evolution and Transformation // Multiscale Biomechanics and Tribology of Inorganic and Organic Systems. Cham : Springer. 2021. p. 323–358. http://doi.org/10.1007/978-3-030-60124-9_15

Ostapchuk A.A., Polyatykin V.V., Popov M., Kocharyan G.G. Seismogenic Patches in a Tectonic Fault Interface // Frontiers in Earth Science. 2022. Vol. 10 (904814). <http://doi.org/10.3389/feart.2022.904814>

Peng Z., Gombert J. An Integrated Perspective of the Continuum between Earthquakes and Slow-Slip Phenomena // Nature Geoscience. 2010. Vol. 3. P. 599–607. <http://doi.org/10.1038/ngeo940>

Saffer D., Wallace L. The frictional, hydrologic, metamorphic and thermal habitat of shallow slow earthquakes // Nature Geoscience. 2015. Vol. 8. P. 594–600. <http://doi.org/10.1038/ngeo2490>

Scholz C.H. The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge. UK : Cambridge University Press. 2019. – 517 p. <https://doi.org/10.1017/9781316681473>

Trutnevyte E., Azevedo I. Induced seismicity hazard and risk by enhanced geothermal systems: An expert elicitation approach // Environmental Research Letters. 2018. Vol. 13 (3). P. 034004. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9eb2>

Vorobieva I., Shebalin P., Narteau C. Break of slope in earthquake size distribution and creep rate along the San Andreas Fault system // Geophysical Research Letters. 2016. Vol. 43 (13). P. 6869–6875. <http://doi.org/10.1002/2016GL069636>

REGULARITIES OF INITIATING DYNAMIC MOVEMENTS ALONG FAULTS CONTAINING CONTACT PATCHES. LABORATORY EXPERIMENT

© 2023 G. A. Gridin^{1,2,*}, A. A. Ostapchuk^{1,2,**}

¹*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia*

**E-mail: gagridin@gmail.com*

***E-mail: ostapchuk.aa@phystech.edu*

This paper considers regularities of shearing model faults containing contact patches of different composition. Samples of quartzites and amphibolites collected at the Primorsky Fault of the Baikal Rift Zone, in its seismogenic and aseismic segments exhumed to the day surface, were pounded and used to fill the contact patches. It is shown that the material composing the patches does not affect on regularities of accumulating deformation. During the increase of shear force, a «locked» region emerges nearby the contact patch, where a deficit of deformation is observed. The material composition has a critical effect on the release of the accumulated deformations along the model fault. Dynamic ruptures are realized on quartz-containing contact patches with velocity-weakening behaviour. They are accompanied by the emission of oscillations in the frequency range of 1 Hz to 80 kHz. Ruptures in amphibole-containing contact patches with velocity-strengthening behaviour produce oscillations in the frequency range of 20–80 kHz, oscillations with frequencies less than 10 kHz were not detected. It is shown that dynamic movements lead to microstructural changes in the geomaterial composing the contact patch. Minerals are abraded unevenly in the slip plane, the abrasion is accompanied by secondary mineral formation. High-temperature phase transformations of quartz into tridymite are detected at a temperature of ~ 700°C as a result of fast dynamic movements along quartz-containing contact patches.

Keywords: slow earthquakes, velocity-strengthening, microstructural changes, laboratory experiment, seismoacoustic emission.