

УДК 550.34.01

Лабораторное моделирование смещений блоков горных пород: малоамплитудные быстрые движения в экспериментах на слайдер-модели разлома*

П. А. Казначеев¹, З.-Ю. Я. Майбук¹, А. В. Пономарев¹, А. В. Патонин²,
Г. А. Соболев¹, Д. В. Краюшкин^{1,3}, В. В. Кох¹

¹ Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН,

Российская Федерация, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10

² Географическая обсерватория «Борок» Института физики Земли РАН,

Российская Федерация, 152742, Ярославская область, пос. Борок, 142

³ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,

Российская Федерация, 101000, Москва, ул. Мясницкая, 20

Для цитирования: Казначеев, П. А., Майбук, З.-Ю. Я., Пономарев, А. В., Патонин, А. В., Соболев, Г. А., Краюшкин, Д. В., Кох, В. В. (2024). Лабораторное моделирование смещений блоков горных пород: малоамплитудные быстрые движения в экспериментах на слайдер-модели разлома. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 69 (2), 216–236.

<https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.201>

Экспериментальное моделирование физических процессов, связанных с разломами земной коры, важно для изучения землетрясений, горных ударов и процессов, сопровождающих разработку месторождений. Широкое распространение получили лабораторные эксперименты с исследованием прерывистого скольжения блоков горных пород друг относительно друга на слайдер-модели разлома. Оно проявляется в виде эпизодов быстрого смещения при увеличении нагрузки до критической величины. В работе исследовалась реакция модели на увеличение нагрузки до субкритической величины в условиях разного увлажнения разлома. После пяти суток увлажнения и трех серий нагружений по сигналам трехкомпонентного высокочастотного акселерометра были обнаружены малые и быстрые смещения (микросрывы), которые по величине на два порядка меньше, чем смещения при эпизодах традиционно наблюдаемого

* Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук. Исследования выполнены с привлечением оборудования ЦКП «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (Veselovskiy et al., 2022).

прерывистого скольжения. Со временем с момента остановки нагружения интервалы между событиями увеличиваются быстрее, чем по степенному закону, а величина смещения, амплитуда ускорений и импульсов акустической эмиссии плавно уменьшаются с выходом на плато. Предложены возможные качественные механизмы возникновения микросрывов, учитывающие постепенное обводнение и высыхание зоны разлома после инжекции воды. Основной гипотезой является конкурирование процессов упрочнения и разупрочнения в зоне разлома при удалении воды из разлома вследствие высыхания и действия капиллярных сил. Неравномерное распространение этих процессов по разлому может создавать предпосылки либо для небольшого линейного смещения на ограниченном участке разлома, либо для небольшого смещения с поворотом. Эти смещения проявляются как микросрывы. Общее медленное проскальзывание вдоль разлома и уменьшение сдвигового напряжения приводит к уменьшению частоты микросрывов и их характерных параметров.

Ключевые слова: лабораторное моделирование, землетрясения, разлом, инжекция флюида, ускорения, стик-слип.

1. Введение

Экспериментальное моделирование физических процессов, связанных с разломами земной коры, является важным направлением физики землетрясений и разрушений горных пород. Широкое распространение получили эксперименты с исследованием прерывистого скольжения по модельному разлому на базе так называемой слайдер-модели (Ohnaka, 2013). Такая модель состоит из двух и более блоков горной породы, прижатых друг к другу. Движение блоков происходит вдоль их контакта — модельного разлома. Обеспечивается два силовых воздействия: «боковой» поджим — нормальное к контакту блоков усилие, которое, как правило, постоянно за время одного эксперимента, и регулируемое в процессе эксперимента сдвиговое усилие. Исследование процесса скольжения блоков друг по другу, в том числе прерывистого характера (режим «stick-slip» — «стик-слип»), позволяет установить закономерности такого скольжения, что важно для понимания движения блоков горных пород по разломам (контактам) в масштабах от объемов горных выработок до очагов землетрясений.

В настоящее время различными исследователями активно изучаются факторы, влияющие на режим скольжения и относящиеся как к свойствам контакта (модельного разлома), так и к режиму нагружения. Свойства контакта определяют коэффициент трения и его эволюцию в процессе скольжения, а также уровень критических сдвиговых напряжений как условия перехода от одного режима скольжения к другому. Параметры режимов скольжения зависят от законов трения и параметров нагружения модели (Barenblatt, 1959; Sadovskiy et al., 1988; Соболев и Пономарев, 2003; Kocharyan and Ostaruchuk, 2011; Bolton et al., 2022). Исследование всего диапазона режимов скольжения важно с точки зрения моделирования событий разного иерархического уровня (Kocharyan and Ostaruchuk, 2011): от глобального (землетрясения) до промышленно-значимого (горные удары). Все подобные события представляют собой опасные геологические процессы. С точки зрения инженерной и рудной геофизики наибольший интерес представляют горные удары в шахтах и рудниках, а также процессы, возникающие в разломных зонах при разработке месторождений углеводородов.

Большое внимание исследователей сосредоточено на изучении возможных механизмов инициирования смещения по модельному разлому внешним триггерным воздействием, когда сдвиговое усилие находится на субкритическом уровне. В качестве такого триггерного воздействия могут выступать упругие импульсы (Sobolev et al., 2016), инъекция флюида в разлом (Hill and Prejean, 2009), электромагнитное воздействие (Zeigarnik et al., 2022). Реальными аналогами таких воздействий могут служить (Scholz, 2019) соответственно сейсмические волны от удаленных землетрясений, прорыв водоносного или нефтяного горизонта в разлом, воздействие магнитосферно-индуцированных токов. При этом величина триггерного воздействия может быть существенно меньше основных наблюдаемых величин, например энергия инициирующего упругого импульса может быть на порядки меньше величины запасенной упругой энергии (Sobolev et al., 2016).

В настоящей работе исследовалась реакция модели на триггерное воздействие в виде инъекции воды в зону разлома при субкритической нагрузке, когда модель близка к возникновению прерывистого скольжения. Сделана попытка проанализировать обнаруженные малые и быстрые смещения в слайдер-модели, которые по величине на два порядка меньше, чем основные смещения, наблюдаемые в тех же экспериментах при прерывистом скольжении.

2. Методика

Лабораторная экспериментальная установка состояла из нагружающей системы и слайдер-модели и представляет собой развитие ранее созданной в ИФЗ РАН установки (Sobolev et al., 2016). Нагружающая система представляла собой рычажный пресс с соотношением плеч 1 : 100, с грузами и регулирующим домкратом на нагружающем плече и позволяла достигать предельной нагрузки до 200 кН. Усилие с рычажного пресса передавалось через пружинный динамометр малой жесткости типа ДОСМ-3-5, что обеспечивало «мягкое» нагружение и возможность точного измерения усилия до 50 кН. Благодаря «мягкому» нагружению жесткость нагружающей системы определяется известной жесткостью динамометра $5.6 \cdot 10^6$ Н/м, которая на порядок меньше жесткости самого рычажного пресса. В этом случае упругая энергия, накапливаемая в нагружающей системе за этап нагружения, больше, а процесс передачи потенциальной энергии нагружающей системы в кинетическую энергию движущегося блока имеет более плавный характер.

Слайдер-модель представляла собой два блока горной породы (мелкозернистый гранит), прижатых друг к другу с помощью стягивающего приспособления, чем обеспечивалось нормальное давление на контакте (рис. 1). Величина нормального усилия оценивалась приблизительно по данным динамометрического ключа и составила около 30 кН. Блоки вырезались из единого куска горной породы. Контактующие поверхности блоков перед экспериментом были тщательно зашлифованы с использованием полировального порошка Al_2O_3 размером частиц 1–2 мкм и со смачиванием водой. Шлифование производилось одним блоком по другому и было прекращено, когда стало видно, что оно идет по всей контактирующей поверхности. Таким образом, блоки были максимально «притерты» друг к другу. Межблочное пространство ничем не заполнялось.

На блоках установлены датчики следующих величин (рис. 1):

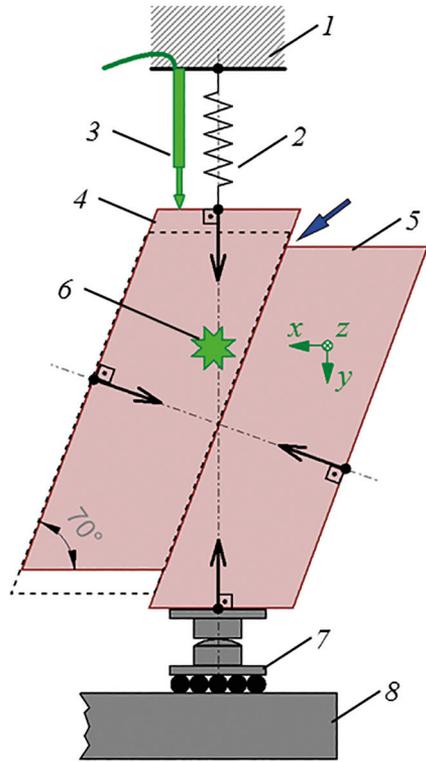


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — часть станины пресса; 2 — пружинный датчик силы (динамометр); 3 — датчик смещения верхнего блока относительно станины пресса; 4 и 5 — верхний и нижний блоки горной породы, вместе составляющие слайдер-модель; 6 — трехкомпонентный акселерометр; 7 — блок нагружающей системы, обеспечивающий равномерную передачу усилия с рычага пресса; 8 — часть рычага пресса. Крупными черными стрелками показаны внешние силы, приложенные к слайдер-модели; пунктиром условно показан контур верхнего блока после смещения; синей стрелкой показано место инъекции флюида

— датчик смещения на основе дифференциального трансформатора (LVDT — Linear Variable Differential Transformer), измеряющий смещение верхнего блока относительно неподвижной части пресса, с чувствительностью 1.5 мВ/мкм и полосой пропускания до 200 Гц;

— датчик силы, измеряющий основное усилие, прикладываемое прессом к слайдер-модели и определяющее сдвиговое усилие на контакте, на основе пружинного динамометра ДОСМ-3-5 и отдельного LVDT-датчика, с итоговой чувствительностью 0.266 мВ/Н и полосой пропускания до 200 Гц;

— трехкомпонентный пьезоэлектрический акселерометр ВТК3 с усилителем заряда УТК2, измеряющий ускорения движения верхнего блока, с чувствительностью около 7.5 мВ/(м/с²) и полосой пропускания 5–7000 Гц;

— пьезоэлектрические датчики смещения блоков друг относительно друга самостоятельного изготовления, предназначенные для детектирования начала смещения блоков (на рис. 1 не показаны);

— датчики акустической эмиссии GT300 чувствительностью 50 дБ относительно 1 В/(м/с) и полосой пропускания 100–800 кГц (на рис. 1 не показаны).

Нагружение производилось путем опускания домкрата (на рис. 1 не показан), т. е. увеличения нагрузки на нагружающем плече рычага пресса до достижения кратковременных быстрых (порядка единиц миллисекунд) смещений блоков друг относительно друга большой амплитуды (порядка сотен микрометров),

сопровождающихся большим сбросом основного нагружающего усилия (порядка тысяч ньютонов). Далее для краткости такие смещения называются большими срывами.

На основе серии таких больших срывов определялось критическое приращение нагрузки, после которой возникал срыв. Кроме того, одно или несколько предварительных нагружений с возникновением большого срыва обеспечивало обновление контактирующих поверхностей после паузы, следовавшей за предыдущими экспериментами. За счет нескольких эпизодов смещения образовывались новые контактные пятна, в которых сцепление между блоками наиболее велико, — так называемые «асперити» (Kocharyan and Ostapchuk, 2011). При этом разрушались старые контактные пятна, которые обусловлены взаимодействием контактирующих поверхностей и прочность которых зависит от времени выдерживания, химической активности минералов и др. После серии больших срывов нагрузка увеличивалась на 80–90 % от критического приращения (субкритическая нагрузка) и осуществлялось наблюдение за моделью.

При субкритической нагрузке могло осуществляться триггерное воздействие — добавление флюида (воды) в верхнюю часть контакта блоков. Для этого непосредственно в начале контакта блоков (посередине верхней линии их соприкосновения) было сделано углубление-лунка (высверлено отверстие в материале блоков) объемом около 0.5 мл. Для предотвращения растекания воды и смачивания ею поверхности блоков вокруг лунки был сделан сплошной валик из гидрофобного мягкого материала (пластилин). Инъекция воды проводилась путем заполнения лунки водой в объеме около 0.5 мл. По наблюдениям, скорость ухода воды из лунки внутрь модельного разлома оценивается в 0.05–0.15 мл/час. Вода могла уходить значительно быстрее при больших срывах. Визуально контролировалось отсутствие растекания воды по верхней поверхности блоков. Кроме того, контрольное наблюдение за водой в цилиндрической емкости, находившейся рядом с моделью и имевшей сопоставимый диаметр, показало, что высыхание воды непосредственно в самой лунке за то же время незначительно. Вода могла доливаться в лунку для поддержания влажного состояния разлома.

После этого системы регистрации переводились в режим долговременного мониторинга (до нескольких суток). Часть сигналов отображалась в процессе регистрации и позволяла оценивать динамику процесса, но основной массив данных обрабатывался после завершения эксперимента.

Если в процессе эксперимента не наблюдались аномальные изменения и сигналы, могли производиться повторные циклы нагружения после инъекции воды, которые обеспечивали обновление условий контакта уже во влажном состоянии.

3. Результаты экспериментов

В рассматриваемом эксперименте последовательность нагружений и инъекции воды, а также наблюдений за сигналами отражена в табл. 1. Пример изменения основного усилия и смещения верхнего блока в процессе эксперимента показан на рис. 2. Благодаря серии больших срывов достигается стабильная разница основного усилия между срывами, величины сброса усилия и величины смещения блока при срыве, что говорит о повторяемости условий срывов. Параметры больших

Таблица 1. Этапы эксперимента и их характеристика

№	Время	Характеристика этапа
1а	Первые сутки, первый час	Одно нагружение до одного большого срыва. Практически сразу (спустя несколько минут) нагружение до субкритической нагрузки и инициирующее воздействие — инъекция воды объемом около 0.5 мл
1б	Первые сутки, первый-второй часы	Выжидание и наблюдение: аномальных сигналов не обнаружено
1в	Первые сутки, второй час	Одно нагружение до большого срыва для обновления контакта
1г	Первые сутки, второй-третий часы	Выжидание и наблюдение: аномальных сигналов не обнаружено
2а	Первые сутки, четвертый час	Вода из лунки ушла внутрь модельного разлома, поэтому добавлено еще 0.5 мл — контакт поддерживается во влажном состоянии. Серия из четырех нагружений до больших срывов для обновления контакта; во время серии добавили еще 0.5 мл воды взамен ушедшей. Нагружение до субкритической нагрузки
2б	Первые сутки, пятый час — пятые сутки, первый час	Выжидание и наблюдение: аномальных сигналов не обнаружено. В процессе наблюдения вода доливалась порциями по 0.5 мл взамен ушедшей, всего два раза, на вторые и третьи сутки
3а	Пятые сутки, третий час	Серия из четырех нагружений до больших срывов для обновления контакта. Нагружение до субкритической нагрузки
3б	Пятые сутки, четвертый час — одиннадцатые сутки, двадцатый час	Выжидание и наблюдение: обнаружено 25 аномальных сигналов (микросрывы)

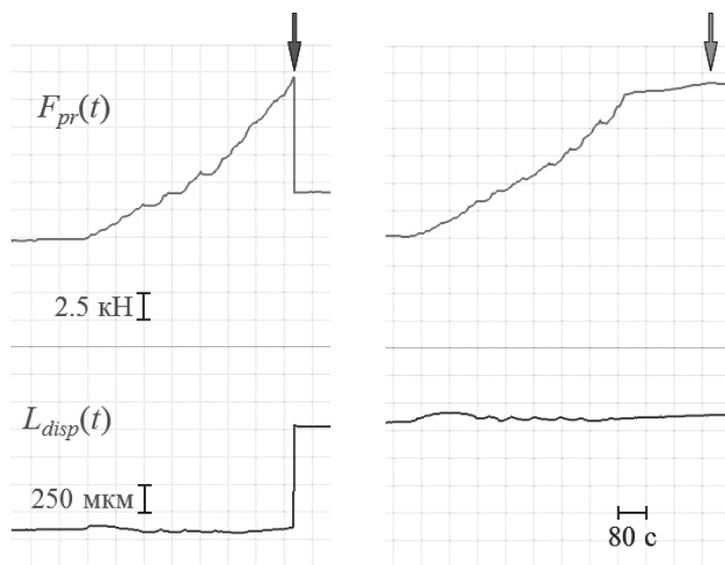


Рис. 2. Пример изменения во времени основного усилия пресса $F_{pr}(t)$ и смещения верхнего блока $L_{disp}(t)$ в процессе большого срыва (слева), момент срыва показан стрелкой; и в процессе нагружения до субкритической нагрузки (справа), момент окончательной остановки нагружения показан стрелкой

Таблица 2. Параметры больших срывов в серии нагружений на пятые сутки

Метка большого срыва в серии	Абсолютная величина усилия перед срывом, $F_{pr}(t)$, Н	Величина смещения верхнего блока при срыве, ΔL_{disp} , мкм	Величина сброшенного усилия при срыве, $\Delta F_{pr}(t)$, Н	Разность между усилием перед текущим срывом и усилием после предыдущего срыва, Н
3а-1	22 239	896	9973	–
3а-2	22 230	948	10 027	9963
3а-3	23 376	947	10 747	11 532
3а-4	24 981	928	10 671	11 992
Остановка при субкритической нагрузке	24 060	–	–	9749

срывов для серии, проведенной на пятые сутки непосредственно до обнаружения аномальных сигналов, приведены в табл. 2.

В качестве флюида для инъекции в разлом выступала водопроводная вода, очищенная от примесей в мембранном фильтре. Суммарный объем инжектированной воды составил около 2.5–3 мл.

После серии больших срывов на пятые сутки основное усилие было увеличено до субкритического уровня, на величину около 85 % от критического приращения. Непосредственно после остановки нагружения были обнаружены эпизоды быстрых, очень малых смещений порядка единиц микрометров и сбросом нагрузки порядка единиц ньютонов, условно названные микросрывами. Микросрывы были обнаружены в процессе обработки данных, сначала по сигналам акселерометра, где представляли собой всплески ускорения амплитудой до 15 м/с^2 .

Из анализа данных по ускорению (рис. 3) прослеживается нарастание тангенциальной, параллельной плоскости контакта составляющей ускорения a_τ в начале

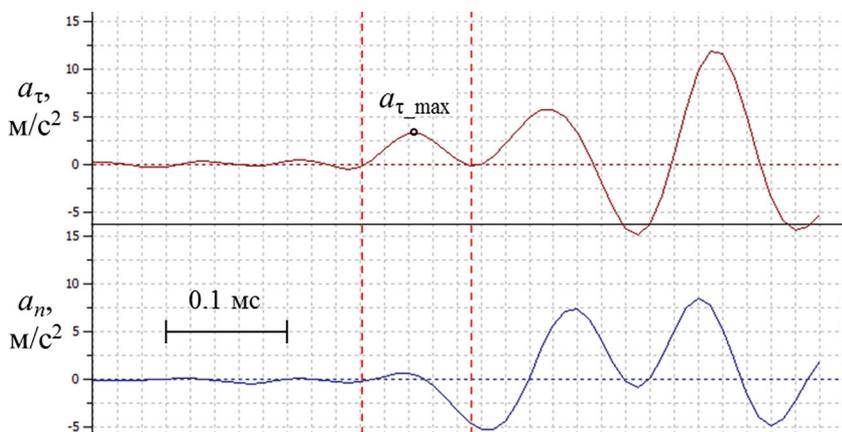


Рис. 3. Пример сигнала акселерометра в эпизоде микросрыва: сверху и внизу соответственно тангенциальная (параллельная к контакту блоков) a_τ и нормальная (перпендикулярная к контакту) a_n составляющие ускорения. Красными штриховыми линиями обозначен предполагаемый интервал непосредственно самого микросрыва, для него отмечен первый максимум (амплитуда) тангенциального ускорения a_{τ_max}

микросрыва. Это говорит о том, что движение верхнего блока при микросрыве начинается вдоль контакта. Позже изменяется нормальная составляющая ускорения a_n и продолжает изменяться a_τ , которая через некоторое время снижается до нуля. Вероятнее всего, изменение a_n в процессе микросрыва связано с распрямлением пружины при сбросе нагрузки, поскольку при этом двигается вся слайдер-модель и системы отсчета, связанные с верхним или нижним блоком, являются неинерциальными. Предположительно, интервал первой вариации a_τ от нуля до нуля является непосредственно самим движением верхнего блока по контакту.

Дальше изменение a_n и a_τ продолжается. По всей видимости, в нагружающей установке возникает колебательный процесс, инициированный микросрывом как импульсным воздействием. Колебательный процесс продолжается около 0.1–0.2 с (на рис. 3 не показано), при этом отчетливо наблюдается постепенный переход с высоких на низкие частоты колебаний, вплоть до частоты около 100 Гц.

Всего за время регистрации после последней остановки нагружения на субкритической нагрузке (пятые сутки), составившее около 580 000 с, или семь дней, по сводным данным всех датчиков было обнаружено 25 микросрывов. В процессе обработки были определены параметры микросрывов, аналогичные параметрам больших срывов, было проанализировано их изменение.

Чем больше времени проходило с момента остановки нагружения, тем все реже и реже возникали микросрывы. Зависимость интервала между микросрывами dT от времени, которое прошло с момента остановки нагружения, показана на рис. 4 в билогарифмическом масштабе, по данным об ускорениях и акустической эмиссии. Для начального и конечного этапа кривой даны степенные аппроксимации, из сравнения с которыми видно, что dT увеличивается быстрее степенной зависимости.

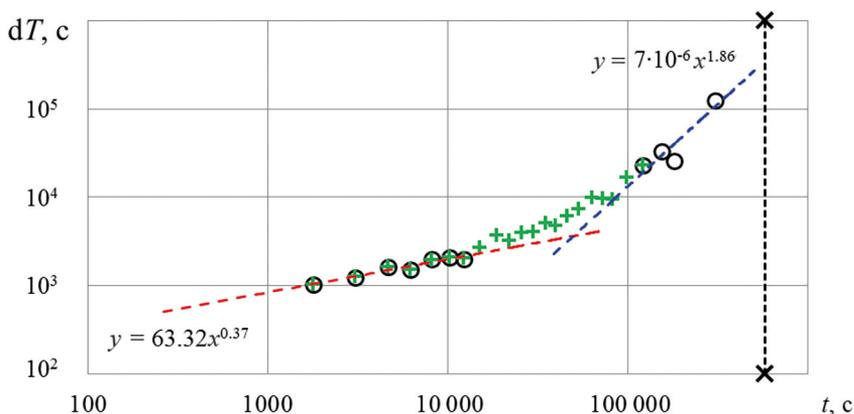


Рис. 4. Изменение интервалов времени dT (вертикальная ось, секунды) между микросрывами в зависимости от времени (горизонтальная ось, секунды), прошедшего с момента остановки нагружения. Черные кружки без заливки — данные об ускорениях; маленькие зеленые крестики — данные об акустической эмиссии; красная и синяя штриховые линии — степенные аппроксимации начального и конечного участков данных. Здесь и на рис. 5 и 7: большими черными крестиками и пунктирной линией отмечен момент окончания регистрации, данные по ускорениям в промежутке между 11 000 и 110 000 секунд отсутствуют из-за сбоя регистрации

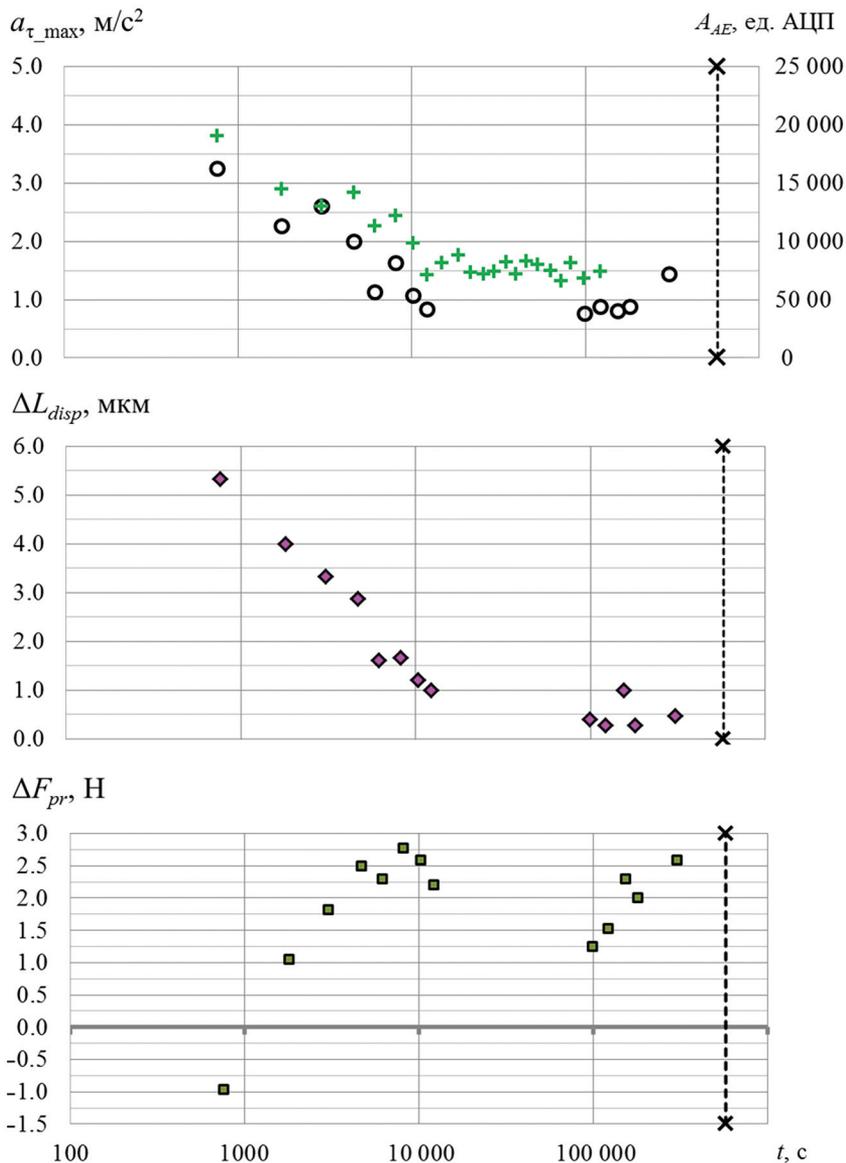


Рис. 5. Изменение характерных параметров микросрывов со временем с момента остановки нагружения: сверху — амплитуда тангенциального ускорения $a_{\tau_{max}}$ (черные кружки) и амплитуда импульсов акустической эмиссии A_{AE} (зеленые крестики); посередине — смещение ΔL_{disp} ; внизу — сброшенное усилие ΔF_{pr}

Величина смещения блоков ΔL_{disp} и амплитуда тангенциального ускорения $a_{\tau_{max}}$ демонстрируют спад и выход на относительно стабильный уровень со временем, амплитуда импульсов акустической эмиссии A_{AE} спадает похожим образом (рис. 5). Величина сброшенного усилия ΔF_{pr} изменяется по-другому — сначала увеличивается, а затем, возможно, выходит на некоторый постоянный уровень. Определение характера ее изменения затруднено из-за пропуска данных.

4. Обсуждение результатов

Для уточнения природы микросрывов было проведено сравнение эволюции вектора ускорений при больших срывах и микросрывах на основе исходных зарегистрированных данных (рис. 6) по компонентам a_x и a_y вектора ускорения.

Из сравнения эволюции векторов ускорения, показанных на рис. 6, следует, что начальные движения и при больших срывах, и при микросрывах происходят в том же квадранте, куда проецируется плоскость разлома. В случае микросрыва вектор ускорения при первом максимуме оказывается почти параллелен плоскости разлома с учетом погрешности измерений. В случае большого срыва отклонение вектора ускорения от плоскости разлома больше. Это может быть связано с тем, что величина сбрасываемого усилия при большом срыве велика. Сброс усилия связан

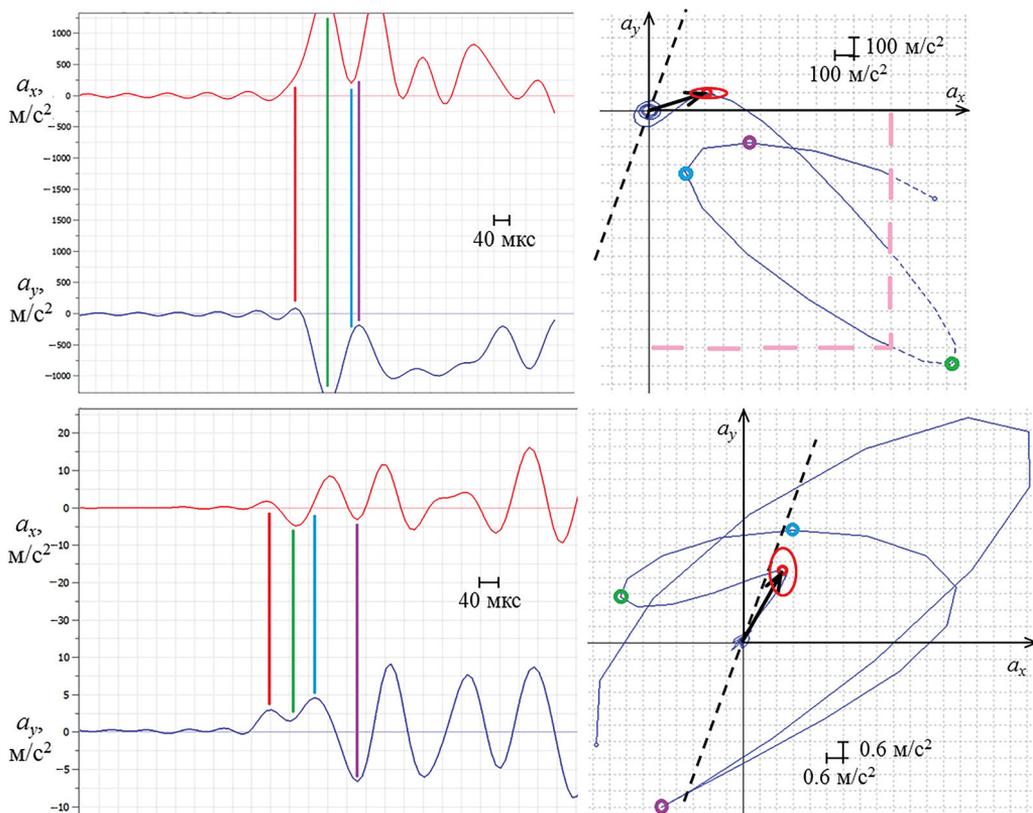


Рис. 6. Графики изменения исходных зарегистрированных компонент a_x и a_y вектора ускорения около начала срывов (слева) и эволюция вектора ускорения (справа), при больших срывах (вверху) и микросрывах (внизу). Жирными цветными вертикальными сплошными линиями на графиках отмечены моменты времени, соответствующие цветным кружкам на кривой эволюции; жирной черной штриховой линией отмечена проекция разлома в систему координат акселерометра. Жирной стрелкой показан вектор ускорения в момент первого максимума a_x , красный эллипс — разброс конца вектора ускорения из-за погрешности коэффициента преобразования акселерометра и его поперечной чувствительности. Для большого срыва розовой штриховой линией показан уровень насыщения сигнала акселерометра, за пределами которого кривая ускорения была восстановлена приблизительно и поэтому показана пунктиром

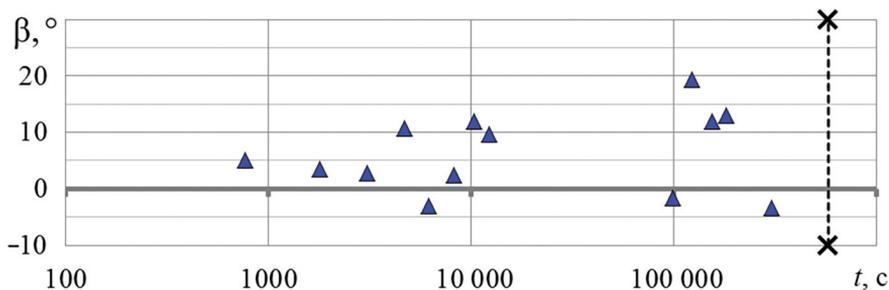


Рис. 7. Угол β , отсчитываемый от вектора ускорения к проекции плоскости разлома против часовой стрелки и определяемый при первом максимуме тангенциального ускорения a_{t_max} , для всех микросрывов в зависимости от времени с момента остановки нагружения

с распрямлением пружины, что приводит всю слайдер-модель в субвертикальное движение (см. рис. 1). К вектору ускорения, обусловленному движением верхнего блока по разлому, добавляется вектор ускорения, связанный с субвертикальным движением всей слайдер-модели из-за распрямления пружины. Это эквивалентно утверждению, что ни для верхнего, ни для нижнего блока слайдер-модели нельзя ввести инерциальную систему координат. Из-за этого однозначная интерпретация эволюции вектора ускорения для большого срыва затруднена, поскольку для восстановления полного движения необходимы данные как минимум о векторе ускорений нижнего блока.

В случае микросрыва величина сбрасываемого усилия намного меньше (по порядкам — 1 Н против 10 000 Н), поэтому распрямление пружины приводит к менее интенсивным субвертикальным движениям. С целью проверки для всех микросрывов был определен угол β , отсчитываемый от вектора ускорения к проекции плоскости разлома против часовой стрелки (рис. 7) и определяемый при первом максимуме ускорения a_{t_max} . Из анализа рис. 7 следует, что угол остается в пределах от -5 до $+20^\circ$, это может быть практически полностью объяснено погрешностью измерений и наличием небольшого субвертикального движения.

Для проверки связи микросрывов с инъекцией воды и влажным состоянием разлома был проведен отдельный контрольный эксперимент с нагружением до субкритического усилия и без инъекции воды. Для этого установка без изменения конфигурации после вышеописанного эксперимента была выдержана в течение пяти месяцев для высыхания инжектированной воды. Затем была проведена серия из двух больших срывов, чтобы восстановить свойства контакта до состояния, близкого к исходному эксперименту, поскольку время выдерживания было сопоставимо со временем, за которое коэффициент трения может возрасти на значительную величину, в частности, для контактирующих гранитных блоков (Dieterich, 1972). После этого усилие было увеличено на 80–90 % от величины критического приращения, нагружение остановлено и система регистрации оставлена на мониторинг. Уровень основного усилия при последнем большом срыве составил около 21 500 Н, уровень усилия при остановке нагружения — около 21 000 Н, что сопоставимо с уровнями усилия в исходном эксперименте (см. табл. 1).

В контрольном эксперименте по результатам более 75 000 с регистрации ускорений, усилий и деформации не было обнаружено сигналов, похожих на сигналы

при микросрывах. Отдельно по данным регистрации событий акустической эмиссии продолжительностью около 14 дней также не было обнаружено значительных сигналов, сопоставимых по уровню с первыми шестью сигналами в исходном эксперименте (см. рис. 5). Для сравнения отметим, что на третьем этапе исходного эксперимента первый микросрыв возник спустя 760 с после увеличения нагрузки до субкритического уровня.

Более подробный анализ данных исходного эксперимента до третьего этапа тоже не обнаружил никаких сигналов, похожих на микросрывы. Таким образом, можно сделать осторожный вывод, что, скорее всего, микросрывы не наблюдаются на неувлажненном, недостаточно увлажненном или находящемся в процессе увлажнения разломе, при сопоставимых уровнях усилий.

Попробуем сопоставить результаты нашего эксперимента с данными других авторов. Для этого выделим важные особенности микросрывов.

1. Микросрывы наблюдались только при субкритической нагрузке на предварительно (в течение четырех предшествующих суток) увлажненном разломе и после серии нагружений для «обновления» контакта. В отдельном эксперименте при субкритической нагрузке и при сухом контакте микросрывы не были обнаружены. Также микросрывы не были обнаружены в начале процесса увлажнения разлома.

2. Микросрывы характеризуются очень малыми значениями сброшенного усилия (порядка 1 Н) и смещения (порядка 1 мкм).

3. Движение при микросрывах начинается в плоскости, близкой к плоскости модельного разлома.

4. Амплитуды ускорения вдоль контакта при микросрыве и большом срыве различаются на четыре порядка (первые единицы против более чем тысячи метров на секунды в квадрате), то же самое относится к величине сбрасываемого усилия (единицы против десятка тысяч ньютонов).

Отметим, что ранее в экспериментах на предыдущей версии установки (Sobolev et al., 2016), несколько отличающейся по своему устройству и используемым регистрирующим системам, тоже наблюдалось два типа разномасштабных движений — большие и малые подвижки. Иницирующим воздействием в экспериментах (Sobolev et al., 2016) были удары шариком. Большие подвижки характеризовались сбросом механического напряжения до исходного уровня, что соответствует большим срывам, наблюдаемым в настоящем эксперименте (см. табл. 2). Малые подвижки сопровождалась уменьшением напряжений на 5–8 %. Прямое сравнение сбрасываемых напряжений показывает, что малые подвижки не могут быть отождествлены с микросрывами. Последние характеризуются величиной сбрасываемых напряжений в 0.01–0.03 % от напряжений, сбрасываемых при больших срывах.

С другой стороны, иницирующие воздействия в экспериментах (Sobolev et al., 2016) и настоящем эксперименте принципиально отличаются. Удар шариком приводит к возбуждению упругого импульса в блоке горной породы, который воздействует на разлом очень непродолжительное время (единицы-десятки миллисекунд). Инъекция флюида-воды приводит к обводнению сначала верхней части разлома, а затем просачиванию воды по доступным каналам вдоль всего разлома вниз, за счет гравитации и капиллярных сил. После прекращения инъекции вода начинает выходить на боковые и нижнюю грани разлома и высыхать. Эти процессы длятся значительно дольше и качественно изменяют свойства разлома.

Анализ опубликованных работ других авторов по экспериментам на слайдер-моделях показывает, что существуют разные типы движений, реализуемые за счет разных режимов нагружения и зависящие от свойств контакта. В основном выделяют медленные малоамплитудные и быстрые высокоамплитудные движения (Кочарян, 2016; Bolton et al., 2022). При этом мало- и высокоамплитудные движения различают по пиковой (амплитудной) скорости движения. В лабораторных экспериментах на симметричной слайдер-модели, с симметричным нормальным нагружением и строго перпендикулярным сдвиговым нагружением (Bolton et al., 2022), срывы (события скольжения — «слип», «slip») группируются вдоль одной кривой на диаграмме зависимости сброшенного усилия от пиковой скорости движения. Кривая — монотонно нарастающая, и в билогарифмическом масштабе она близка к прямой линии. Границу между «тихими» (медленными) и «громкими» (быстрыми) движениями авторы (Bolton et al., 2022) сообразно (Leeman et al., 2016) проводят на уровне пиковой скорости 1 мм/с.

Качественное приложение такой диаграммы к нашим результатам приводит к противоположной зависимости: наблюдаемые нами микросрывы короче по длительности, но меньше по амплитудам, чем большие срывы. С другой стороны, результаты наших экспериментов по микросрывам не могут быть напрямую переложены на похожую диаграмму. Первое отличие — мы измеряли ускорение, а не скорость движения, что затрудняет сравнение. Другими словами, малая длительность движения не является признаком большой пиковой скорости движения, что важно понимать при рассмотрении «быстрых» и «медленных» движений в публикациях.

Мы попытались оценить скорости движений в наших экспериментах путем численного интегрирования составляющей ускорения вдоль контакта исходя из выражения

$$v_{\tau} = \int a_{\tau}(t) dt, \quad (1)$$

где v_{τ} — скорость движения вдоль контакта.

Но надежную оценку скорости получить не удалось, поскольку численное интегрирование является неустойчивой операцией. Для микросрывов шумовая составляющая сигнала ускорения приводила к большой ошибке интегрирования, а для больших срывов наличие участка насыщения сигнала приводило к невозможности восстановления скорости после начала насыщения и, соответственно, определения пиковой скорости.

Второе отличие заключается в том, что в (Bolton et al., 2022) проводится пересчет сброшенного усилия от величины приложенной силы к величине сброшенных сдвиговых механических напряжений. В нашем случае мы не можем с уверенностью утверждать, что при микросрыве в движение приходит весь верхний блок. Во всяком случае, это движение не может быть представлено как простое движение в виде параллельного переноса. У вектора ускорения во время микросрыва имеется ненулевая z -составляющая, которая по амплитуде превышает погрешность, вносимую поперечной чувствительностью акселерометра (5 %).

Анализ работ по деформационным измерениям на реальных разломах показывает, что существуют пульсационные деформации на разломах (Кузьмин, 1996), характеризующиеся высокой амплитудой (порядка 10^{-5} в год), кратким временем проявления, пространственной локализацией и знакопеременностью. Эти

аномалии наблюдались в разломных зонах как сейсмоактивных, так и асейсмичных регионов. Авторы работ (Kuzmin, 2004) предполагают, что накопленная потенциальная энергия деформации вследствие действия тектонических и гравитационных напряжений реализуется попеременно в виде сейсмических событий и пульсационных деформаций.

С данных позиций возникает возможность рассматривать большие срывы в наших экспериментах как сейсмические события, а микросрывы — как проявления пульсационных процессов. Но провести однозначную аналогию нельзя, поскольку соотношения между некоторыми характерными параметрами микросрывов и больших срывов не соответствуют соотношениям параметров между пульсационными деформациями и сейсмическими событиями. В частности, длительность микросрывов (доли миллисекунд) на порядок меньше длительности большого срыва (единицы миллисекунд), а длительность пульсационных деформаций, оцениваемая в месяцы (Kuzmin, 2004), наоборот, на несколько порядков больше длительности сейсмических событий, оцениваемой в секунды-минуты (Кочарян, 2016).

С другой стороны, точная пространственно-временная структура пульсационных деформаций пока не определена, поскольку такая задача требует подробной сети геодезических наблюдений с расстояниями между пунктами порядка сотен метров и частой регистрацией данных (Кузьмин, 2018). Вполне возможно, что такие деформации сосредоточены на малых участках разломов и более скоротечны.

Важной аналогией с процессами, наблюдаемыми или предполагаемыми на реальных разломах, является изменение свойств разлома в нашем эксперименте. В (Kuzmin, 2004) показано, что локальные деформационные аномалии могут формироваться не только вследствие изменения тектонических напряжений, но и вследствие изменения жесткости разлома. В данном случае разлом выступает как параметрический усилитель — внешние силы обеспечивают накопление внутренней упругой энергии, а вариации параметров разлома, прежде всего его жесткости, резко усиливаются и проявляются в деформационных аномалиях (Kuzmin, 2004). Этому полностью соответствует модель в нашем эксперименте — инъекция флюида изменила жесткость разлома по сравнению с сухим состоянием. При перераспределении и последующем высыхании воды возникают небольшие по величине пространственные вариации жесткости. Эти малые вариации при субкритическом уровне сдвиговых напряжений, когда весь разлом находится в состоянии, близком к нестабильности, могут индуцировать появление аномально больших деформационных аномалий, возможно, локального характера.

На основе результатов наших экспериментов и сравнения с работами других авторов можно предложить следующую модель возникновения микросрывов. Первоначально инъекция воды при субкритической нагрузке не приводит к микросрывам (первые сутки, первый час эксперимента, см. табл. 1). Релаксация напряжения вследствие медленного плавного скольжения по разлому (Кочарян, 2016) происходит быстрее, чем вода успевает попасть в еще не обводненные области разлома и повлиять на режим скольжения. Даже последующее «обновление» контакта проведением серии нагружений до четырех больших срывов (первые сутки, четвертый час эксперимента, см. табл. 1) не приводит к возникновению микросрывов при субкритической нагрузке. Только обводнение большой области разлома и «обновление» контакта серией нагружений приводит к появлению микросрывов (пятое

сутки, третий час эксперимента, см. табл. 1). Визуальные наблюдения в это время показали, что есть выход воды на уровне половины длины разлома с одной из сторон слайдер-модели. Таким образом, определяющим условием для возникновения микросрывов является обводнение большей части поверхности разлома.

Известно, что инъекция воды в приразломную зону может приводить к возрастанию слабой сейсмичности в окрестностях разлома, что обозначается как индуцированная сейсмичность (Scholz, 2019). При этом наблюдается миграция сейсмичности вдоль разлома, что напрямую связывается с миграцией флюида тоже вдоль разлома. Прямое действие флюида наблюдается при его принудительном закачивании в приразломную зону, а это приводит к повышению порового давления, смещению кругов на диаграмме Кулона — Мора к началу координат и уменьшению прочности. Косвенное действие связывается с пороупругим эффектом, при котором закачка или откачка флюида из приразломной зоны, обладающей повышенной пористостью и проницаемостью, приводит к возникновению пороупругих напряжений (Scholz, 2019).

В нашем случае нет прямого повышения порового давления, но остается возможность пороупругого эффекта и следующей из него дилатансии частично разрушенной горной породы в разломной зоне. Дилатансия приводит к увеличению объема этой породы и увеличению нормальных напряжений, что в теории должно приводить к увеличению нормальных напряжений и прочности разлома. Причем для гранита этот эффект более значим, чем, например, для корунда (Кочарян, 2016). Таким образом, вследствие пороупругого эффекта из-за увлажнения разлома можно ожидать увеличения его прочности или, точнее, увеличения сопротивления сдвигу, т. е. повышению критических сдвиговых напряжений.

Рассмотрим этап эксперимента из серии четырех нагружений до больших срывов на первые стуки, четвертый час, когда вода, предположительно, еще очень слабо смочила разлом. В табл. 3 приведены данные по этой серии (аналогично табл. 2). Из сравнения приведенных в табл. 2 и 3 данных видно, что абсолютная величина усилия перед срывом для слабо обводненного на первые сутки разлома меньше, чем для более обводненного на пятые сутки (в среднем 16.5 кН против 23.3 кН). Это может говорить о возросшей прочности разлома. Кроме того, из сравнения следует, что для более обводненного разлома больше величина смещения и сбрасываемого усилия.

Таблица 3. Параметры больших срывов в серии нагружений на первые сутки

Метка большого срыва в серии	Абсолютная величина усилия перед срывом, $F_{pr}(t)$, Н	Величина смещения верхнего блока при срыве, ΔL_{disp} мкм	Величина сброшенного усилия при срыве, $\Delta F_{pr}(t)$, Н	Разность между усилием перед текущим срывом и усилием после предыдущего срыва, Н
2а-1	14 595	471	3991	–
2а-2	16 912	630	5634	6308
2а-3	17 753	636	5862	6475
2а-4	16 654	426	4036	4763
Остановка при субкритической нагрузке	17 077	–	–	4459

С другой стороны, кроме упрочнения разлома, вода может оказывать противоположное действие вследствие химических процессов, связанных с растворением минералов и уменьшением коэффициента трения контактирующих поверхностей блоков. В частности, в (Бернштейн, 1987) показано, что происходят реакции механически стимулированного гидролиза и разрушение напряженных силикатов при накоплении разрывов Si-O-Si связей на поверхности зерен кварца в присутствии молекул воды, что приводит к уменьшению коэффициента трения на контакте. В нашем эксперименте таких реакций можно ожидать, во-первых, при первичном смачивании водой сухой области разлома и, во-вторых, при «обновлении» разлома после большого срыва, когда старые контактные пятна могут становиться доступными для смачивания водой. Соответственно, в эти же периоды может наблюдаться уменьшение критических сдвиговых напряжений.

Современные представления о строении разломных зон опираются на неравномерное распределение прочности по поверхности разлома (Кочарян, 2016). Основными зонами «концентрации прочности» являются соприкасающиеся неровности контактирующих поверхностей блоков, называемые также контактными пятнами, или «асперити» (*asperity*) (Kanamori and Stewart, 1978; Gridin et al., 2023).

Учитывая конкурирующий характер процессов дилатансионного упрочнения и гидролизного разупрочнения при увлажнении и высыхании контакта, можно предположить, что эти процессы будут по-разному проявляться в разных областях разлома. Может сложиться ситуация, когда изменение распределения прочности по разлому приведет к возникновению локально разупрочненного участка, для которого сдвиговое напряжение превысит критическое. В этом случае возможны три варианта дальнейшего развития. Первый — соседние, более прочные контактные пятна примут на себя сдвиговое напряжение, а на разупрочненном участке произойдет медленное смещение. Второй — упругой деформации части блока горной породы рядом с разупрочненным участком окажется достаточно для инициирования быстрого локального линейного смещения разлома (смещения на ограниченном участке разлома). Третий — из-за неравномерности распределения прочности в поперечном направлении (перпендикулярном, см. рис. 1) возникнет вращающий момент сил и произойдет быстрое движение с поворотом вокруг наиболее прочной области разлома.

Последние два варианта (локальное линейное смещение по разлому и смещение с поворотом) могут проявиться именно как микросрывы. Это является основной гипотезой возникновения микросрывов:

- при высыхании разлома неравномерно на его площади происходят конкурирующие процессы разупрочнения и упрочнения;
- происходит перераспределение напряжений между контактными пятнами;
- возникают локальные условия для быстрого локального линейного смещения разлома или быстрого смещения с поворотом, которые проявляются как микросрывы;

- падение сдвигового усилия из-за медленного скольжения происходит быстрее, чем возникновение условий для микросрывов, в результате чего интервалы между ними увеличиваются, а амплитуды характерных сигналов уменьшаются.

Если верна гипотеза о микросрывах как смещениях на ограниченном участке разлома или как смещениях с поворотом, то появляется возможность

моделирования разномасштабных движений по разлому на одной и той же слайдер-модели. В этой концепции большие срывы являются аналогами сильных тектонических землетрясений, и слайдер-модель моделирует ограниченный активный участок сейсмогенного разлома, по всей длине которого происходит смещение. Микросрывы являются аналогами слабых землетрясений, являющихся фоновыми землетрясениями или землетрясениями форшоковой или афтершоковой последовательностей, а слайдер-модель моделирует весь сейсмогенный разлом, на ограниченном участке которого происходит активизация и смещение бортов разлома друг относительно друга.

Микросрывы, вероятно, смогут также моделировать горные удары, происходящие на выработанных обнажениях тектонических разломов в шахтах и горных выработках. Локальная активизация участка разлома может быть связана в том числе с самим процессом выработки, когда происходит перераспределение напряжений в объеме горных пород вблизи разлома. В этом случае дальнейшее изучение микросрывов важно для понимания природы и способов предупреждения горных ударов.

Для проверки предложенной гипотезы необходимы дополнительные эксперименты. Во-первых, необходимо отслеживание пространственного развития движения вдоль разлома при микросрывах. Во-вторых, при больших срывах и микросрывах амплитуды ускорений различаются на два порядка и более; также различаются характерные времена изменения ускорений. Поэтому необходимо комбинирование разных акселерометров на разные частотные и амплитудные диапазоны. В-третьих, необходимо учесть возможные процессы упрочнения и разупрочнения в процессе увлажнения и высыхания разлома. В-четвертых, остается небольшая вероятность существования неучтенных факторов, и микросрывы могут быть связаны с процессами в установке, а не с движением вдоль модельного разлома. Для исключения этого необходимы независимые измерения ускорений движений обоих блоков относительно инерциальной системы координат. Все перечисленные соображения не могут быть проверены в текущей конфигурации установки и требуют ее модификации, что является направлением дальнейших исследований авторов при планировании и подготовке новых экспериментов.

5. Выводы

В работе исследованы процессы на лабораторной модели сейсмогенного разлома — контакта двух блоков горной породы (слайдер-модель) при сдвиговой субкритической нагрузке, близкой к возникновению быстрого большого смещения по разлому (большого срыва). После нагружения до субкритической нагрузки производилась инъекция флюида (воды) в верхнюю часть разлома, изначально находившегося в сухом состоянии, а затем производился мониторинг аномальных сигналов. Если аномальных сигналов обнаружено не было, производилось новое нагружение для обновления контакта блоков и начинался новый этап мониторинга. Вода добавлялась в верхнюю часть разлома взамен ушедшей, для поддержания разлома в увлажненном состоянии.

Всего было три этапа нагружения с последующим мониторингом сигналов; длительность мониторинга для каждого из них составила последовательно 1 час,

3 суток и 7 суток. На третьем этапе после нагружения до субкритической нагрузки были обнаружены малые движения по контакту (микросрывы), которые по величине смещений на два порядка меньше, чем традиционно наблюдаемые большие срывы. Сделана попытка проанализировать изменение основных измеряемых величин. Обнаружено, что со временем интервалы между микросрывами увеличиваются быстрее, чем по степенному закону, а амплитуда ускорений, смещений и импульсов акустической эмиссии спадает с выходом на плато.

Основной гипотезой является инициирование микросрывов из-за образования локально разупрочненных зон разлома при его высыхании. При этом, вероятно, неравномерно по разлому конкурируют процессы разупрочнения и упрочнения. Локализации разупрочненных зон способствует наличие контактных пятен и изменение их параметров в процессе высыхания разлома и при микросрывах. Медленное скольжение по разлому уменьшает общее сдвиговое напряжение на разломе и, следовательно, частоту возникновения микросрывов, а также уменьшает амплитуды характеризующих сигналов.

Литература

- Бернштейн, В. А. (1987). *Механогидролитические процессы и прочность твердых тел*. Л.: Наука.
- Кузьмин, Ю. О. (1996). Современные суперинтенсивные деформации земной поверхности в зонах платформенных разломов. *Геологическое изучение и использование недр*, 4, 43–53.
- Кузьмин, Ю. О. (2018). Современные аномальные деформации земной поверхности в зонах разломов: сдвиг или раздвиг? *Геодинамика и тектонофизика*, 9 (3), 967–987. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0379>
- Кочарян, Г. Г. (2016). *Геомеханика разломов*. М.: ГЕОС.
- Соболев, Г. А. и Пономарев, А. В. (2003). *Физика землетрясений и предвестники*. М.: Наука.
- Barenblatt, G. (1959). Concerning equilibrium cracks forming during brittle fracture. The stability of isolated cracks. Relationships with energetic theories. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 23, 1273–1282. [https://doi.org/10.1016/0021-8928\(59\)90130-3](https://doi.org/10.1016/0021-8928(59)90130-3)
- Bolton, D. C., Shreedharan, S., McLaskey, G. C., Rivière, J., Shokouhi, P., Trugman, D. T., Marone, C. (2022). The high-frequency signature of slow and fast laboratory earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127, e2022JB024170. <https://doi.org/10.1029/2022JB024170>
- Dieterich, J. H. (1972). Time-dependent friction in rocks. *Journal of Geophysical Research*, 77, 3690–3697.
- Gridin, G. A., Kocharyan, G. G., Morozova, K. G., Novikova, E. V., Ostapchuk, A. A., Pavlov, D. V. (2023). Evolution of Sliding Along a Heterogeneous Fault. A Large-Scale Laboratory Experiment. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 59 (3), 460–467.
- Hill, D. P. and Prejean, S. G. (2009). Dynamic Triggering. In: H. Kanamori, ed., *Geophysical treatise, earthquake seismology*. Amsterdam: Elsevier, 257–291.
- Kanamori, H. and Stewart, G. S. (1978). Seismological aspects of the Guatemala Earthquake of February 4, 1976. *Journal of Geophysical Research*, 83, 3427–3434.
- Kocharyan, G. G. and Ostapchuk, A. A. (2011). Variations in rupture zone stiffness during a seismic cycle. *Doklady Earth Sciences*, 441 (1), 1591–1594. <https://doi.org/10.1134/S1028334X11110250>
- Kuzmin, Yu. O. (2004). Recent geodynamics of fault zones. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 40 (10), 868–882.
- Leeman, J. R., Saffer, D. M., Scuderi, M. M., Marone, C. (2016). Laboratory observations of slow earthquakes and the spectrum of tectonic fault slip modes. *Nature Communications*, 7 (1), 1–6. <https://doi.org/10.1038/ncomms11104>
- Ohnaka, M. (2013). *The physics of rock failure and earthquakes*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Sadovskiy, M. A., Kocharyan, G. G., Rodionov, V. N. (1988). Mechanics of a rock body with block structure. *Transactions (Doklady) of the USSR Academy of Sciences. Earth Science Sections*, 302 (5), 20–22.
- Scholz, C. (2019). *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316681473>

- Sobolev, G. A., Ponomarev A. V., Maibuk Y. Y. (2016). Initiation of unstable slips–microearthquakes by elastic impulses. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 52 (5), 674–691. <https://doi.org/10.1134/S106935131605013X>
- Veselovskiy, R. V., Dubinya, N. V., Ponomarev, A. V., Fokin, I. V., Patonin, A. V., Pasenko, A. M., Fetisova, A. M., Matveev, M. A., Afinogenova, N. A., Rud'ko, D. V., Chistyakova, A. V. (2022). Shared research facilities “Petrophysics, geomechanics and paleomagnetism” of the Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS. *Geodynamics & Tectonophysics*, 13 (2), 0579. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0579>
- Zeigarnik, V. A., Novikov, V. A., Bogomolov, L. M. (2022). Electromagnetic Earthquake Triggering: Field Observations, Laboratory Experiments, and Physical Mechanisms. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 58 (1), 30–58. <https://doi.org/10.1134/S1069351322010104>

Статья поступила в редакцию 3 ноября 2023 г.
Статья рекомендована к печати 15 февраля 2024 г.

Контактная информация:

Казначеев Павел Александрович — p_a_k@mail.ru
Майбук Зиновий-Юрий Ярославович — rim@ifz.ru
Пonomarev Александр Вениаминович — avp@ifz.ru
Патонин Андрей Викторович — patonin_borok@mail.ru
Соболев Геннадий Александрович (1935–2024)
Крайушкин Денис Владиславович — krayushkindenv@yandex.ru
Кох Виктор Витальевич — vitya.kohh@mail.ru

Laboratory modeling of displacements of rock blocks: Low-amplitude fast movements in experiments on a slider model of fault*

P. A. Kaznacheev¹, Z.-Yu. Ya. Maibuk¹, A. V. Ponomarev¹, A. V. Patonin², G. A. Sobolev^{†1}, D. V. Krayushkin^{1,3}, V. V. Kohh¹

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,
10, ul. Bol'shaya Gruzinskaya, Moscow, 123242, Russian Federation

² Geographical Observatory “Borok” of the Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,
142, pos. Borok, Yaroslavl'skaya obl., 152742, Russian Federation

³ HSE University,
20, ul. Myasnitskaya, Moscow, 101000, Russian Federation

For citation: Kaznacheev, P. A., Maibuk, Z.-Yu. Ya., Ponomarev, A. V., Patonin, A. V., Sobolev, G. A., Krayushkin, D. V., Kohh, V. V. (2024). Laboratory modeling of displacements of rock blocks: Low-amplitude fast movements in experiments on a slider model of fault. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 69 (2), 216–236. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.201> (In Russian)

Experimental modeling of physical processes associated with faults of the Earth's crust is important for studying earthquakes, rock burst and processes accompanying the deposit development. Laboratory experiments with the study of stick-slip sliding of rock blocks

*The study was carried out within the state assignment of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. The research was carried out using the equipment of the Shared Research Facilities Center “Petrophysics, geomechanics and paleomagnetism” IPE RAS (Veselovskiy et al., 2022).

relative to each other on a fault slider model have become widespread. Stick-slip sliding manifests itself in the form of episodes of rapid displacement when load increases to a critical value. The paper investigated the reaction of the model under conditions of different fault humidity after increasing load to a subcritical value. After five days of fault wetting and three series of loads, small and fast displacements (microstick-slips) were detected by signals of a three-component high-frequency accelerometer. Microstick-slips are two orders of magnitude smaller than displacements during episodes of the traditionally observed stick-slip. After time has elapsed since the loading stopped, intervals between microstick-slips increase faster than according to the power law. Magnitude of displacement, amplitude of accelerations and pulses of acoustic emission gradually decreases with reaching the plateau. Possible qualitative mechanisms of the occurrence of microstick-slips are proposed, taking into account the gradual wetting and drying of the fault zone after water injection. The main hypothesis is competition of hardening and softening processes in the fault zone during the removal of water from the fault due to drying and action of capillary forces. Uneven propagation of these processes along the fault can create prerequisites for either small linear displacement on a limited section of the fault, or small displacement with rotation. These displacements manifest themselves as microstick-slips. General slow slippage along the fault and decrease in shear stress leads to decrease in frequency of microstick-slips and in their characteristic parameters.

Keywords: laboratory modeling, earthquakes, fault, fluid injection, acceleration, stick-slip.

References

- Barenblatt, G. (1959). Concerning equilibrium cracks forming during brittle fracture. The stability of isolated cracks. Relationships with energetic theories. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 23, 1273–1282. [https://doi.org/10.1016/0021-8928\(59\)90130-3](https://doi.org/10.1016/0021-8928(59)90130-3)
- Bernshitejn, V. A. (1987). *Mechano-hydrolytic Processes and Strength of Solids*. Leningrad: Nauka Publ. (In Russian)
- Bolton, D. C., Shreedharan, S., McLaskey, G. C., Rivière, J., Shokouhi, P., Trugman, D. T., Marone, C. (2022). The high-frequency signature of slow and fast laboratory earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127, e2022JB024170. <https://doi.org/10.1029/2022JB024170>
- Dieterich, J. H. (1972). Time-dependent friction in rocks. *Journal of Geophysical Research*, 77, 3690–3697.
- Hill, D. P. and Prejean, S. G. (2009) Dynamic Triggering. In: H. Kanamori, ed., *Geophysical treatise, earthquake seismology*. Amsterdam: Elsevier, 257–291.
- Kocharyan, G. G. (2016). *Geomechanics of Faults*. Moscow: GEOS Publ. (In Russian)
- Kocharyan, G. G. and Ostapchuk, A. A. (2011). Variations in rupture zone stiffness during a seismic cycle. *Doklady Earth Sciences*, 441 (1), 1591–1594. <https://doi.org/10.1134/S1028334X11110250>
- Kuzmin, Yu. O. (1996). Recent Superintensive Deformations of the Earth's Surface in the Platform Fault Zones. *Geologicheskoe izuchenie i ispol'zovanie neдр*, 4, 43–53. (In Russian)
- Kuzmin, Yu. O. (2004). Recent geodynamics of fault zones. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 40 (10), 868–882.
- Kuzmin, Yu. O. (2018). Recent anomalous deformation of the ground surface in fault zones: Shear or tensile faulting? *Geodynamics & Tectonophysics*, 9 (3), 967–987. (In Russian). <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0379>
- Leeman, J. R., Saffer, D. M., Scuderi, M. M., Marone, C. (2016). Laboratory observations of slow earthquakes and the spectrum of tectonic fault slip modes. *Nature Communications*, 7 (1), 1–6. <https://doi.org/10.1038/ncomms11104>
- Ohnaka, M. (2013). *The physics of rock failure and earthquakes*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Sadovskiy, M. A., Kocharyan, G. G., Rodionov, V. N. (1988). Mechanics of a rock body with block structure. *Doklady of the USSR Academy of Sciences. Earth Science Sections*, 302 (5), 20–22.
- Scholz, C. (2019). *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316681473>
- Sobolev, G. A. and Ponomarev, A. V. (2003). *Earthquake physics and precursors*. Moscow: Nauka Publ. (In Russian)

- Sobolev, G. A., Ponomarev A. V., Maibuk, Y. Y. (2016). Initiation of unstable slips-microearthquakes by elastic impulses. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2016, 52 (5), 674–691. <https://doi.org/10.1134/S106935131605013X>
- Veselovskiy, R. V., Dubinya, N. V., Ponomarev, A. V., Fokin, I. V., Patonin, A. V., Pasenko, A. M., Fetisova, A. M., Matveev, M. A., Afinogenova, N. A., Rud'ko, D. V., Chistyakova, A. V. (2022). Shared research facilities “Petrophysics, geomechanics and paleomagnetism” of the Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS. *Geodynamics & Tectonophysics*, 13 (2), 0579. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0579>
- Zeigarnik, V. A., Novikov, V. A., Bogomolov, L. M. (2022). Electromagnetic Earthquake Triggering: Field Observations, Laboratory Experiments, and Physical Mechanisms. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 58 (1), 30–58. <https://doi.org/10.1134/S1069351322010104>

Received: November 3, 2023

Accepted: February 15, 2024

Authors' information:

Pavel A. Kaznacheev — p_a_k@mail.ru

Zinovii-Yurii Ya. Maibuk — rim@ifz.ru

Alexander V. Ponomarev — avp@ifz.ru

Andrei V. Patonin — patonin_borok@mail.ru

Gennadii A. Sobolev (1935–2024)

Denis V. Krayushkin — krayushkindenv@yandex.ru

Viktor V. Kohh — vitya.kohh@mail.ru