

УДК 550.34,539.37

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БЛОКОВ СКАЛЬНОЙ ПОРОДЫ МЕТРОВОГО МАСШТАБА. МЕТОДИКА И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

© 2022 г. Г. Г. Кочарян¹, А. А. Остапчук^{1, *}, Д. В. Павлов¹, Г. А. Гридин¹,
К. Г. Морозова¹, J. Hongwen², И. А. Пантелеев³

¹Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

²Китайский горно-технологический университет, г. Сюйчжоу, Китай

³Институт механики сплошных сред УрО РАН, ПФИЦ УрО РАН, г. Пермь, Россия

*E-mail: ostapchuk.aa@idg.ras.ru

Поступила в редакцию 17.02.2022 г.

После доработки 09.03.2022 г.

Принята к публикации 09.03.2022 г.

В статье представлена новая, уникальная для России лабораторная установка метрового масштаба, созданная в ИДГ РАН для исследования закономерностей развития различных режимов скольжения по нарушениям сплошности массива горных пород. Описана методика проведения экспериментов и приведены результаты первых серий опытов, направленных на изучение особенностей формирования различных режимов скольжения нарушений сплошности массива горных пород. Лабораторный разлом представлял собой нагруженный контакт двух блоков длиной 75 см, изготовленных из диабазы. Разлом заполнялся гранулированным материалом. Нормальные напряжения на разломе могут достигать 10 МПа. Изменение вещественного состава заполнителя разлома и скорости его нагружения позволило реализовать широкий спектр режимов скольжения: скольжение с постоянной скоростью, регулярное прерывистое скольжение, аperiodические акты медленного проскальзывания. Показано, что вариация скорости нагружения может приводить к существенному изменению режима скольжения. В ходе экспериментов при небольшом нормальном давлении, равном 2 МПа, было зафиксировано интенсивное фрикционное дробление гранул заполнителя, а при высокоамплитудном прерывистом скольжении, кроме того, выявлены структурные фазовые превращения зерен кварца, соответствующие локальному повышению температуры до 700°C. Очерчен возможный круг задач для моделирования на подобных установках деформационных процессов, происходящих в зонах сейсмогенных разломов – предсейсмическая стадия неупругого поведения зоны магистрального разрыва при критическом уровне напряжений.

Ключевые слова: тектонический разлом, землетрясение, лабораторный эксперимент, акустическая эмиссия.

DOI: 10.31857/S0002333722060060

ВВЕДЕНИЕ

Многие деформационные процессы в земной коре представляют собой динамический разрыв или скольжение по уже существующим разломам, трещинам, литологическим границам в массиве горных пород [Садовский и др., 1987; Scholz, 2019; и др.]. К подобным событиям относятся не только тектонические землетрясения, но и обрушения склонов, крупные горные удары и землетрясения, инициированные техногенной деятельностью. При этом, согласно современным представлениям, центральная часть сейсмогенных разломов включает сильно локализованные слои сдвига, по которым происходит основная часть как косейсмических, так и более медленных перемещений

[Кочарян, 2016]. В этой связи различными группами исследователей значительное внимание уделяется изучению особенностей сопротивления сдвигу контактов блоков скальной породы и тонких слоев геоматериалов в лабораторных и численных экспериментах [Кочарян, 2021].

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. Поиск физических механизмов, определяющих закономерности скольжения разлома и объясняющих нелинейные процессы эволюции на разных масштабных уровнях, является

чрезвычайно сложной задачей, которая на сегодняшний день не может быть решена ни в лаборатории, ни численно [Кочарян, 2021]. Постановки лабораторных и численных экспериментов, как правило, до предела упрощены, что вызывает часто обоснованные сомнения в возможности экстраполяции получаемых результатов на природу. Однако справедливые, подчас, сомнения в корректности моделирования, иногда приводят к “экстремистскому” выводу о бессмысленности проведения лабораторных исследований: “... десятилетия наблюдательных данных по предвестникам и исследований геологической среды дают доказательную базу для безусловного игнорирования лабораторных представлений о сейсмическом процессе” [Гуфельд, 2019]. Подобные возражения исходят из ошибочного, по нашему мнению, представления о том, что лабораторные эксперименты непременно есть форма масштабного моделирования. На наш взгляд, экспериментальные работы в геомеханике разломных зон следует рассматривать, скорее как исследования фундаментальных закономерностей процесса деформирования контактов между блоками скальной породы, в том числе содержащих заполнитель. Полученные в таких экспериментах результаты могут быть использованы для продвижения в понимании отдельных составляющих процессов, гипотетически происходящих на сейсмогенных глубинах, детали которых, практически недоступны для непосредственного наблюдения.

При проведении лабораторных экспериментов могут, чаще по отдельности, быть воспроизведены многие составляющие комплексных физических явлений, сопровождающих процессы подготовки и эволюции скольжения по тектоническому разлому. Упомянем лишь некоторые из них. Закономерности прерывистого скольжения [Deiterich, 1979; Marone, 1998; и др.], износ поверхности скольжения [Chen et al., 2013; 2020; и др.], фрикционное плавление [Di Toro et al., 2006; 2011; и др.], макроскопический подъем температуры и присущий эффект скоростного разупрочнения [Noda, 2008], термальное разложение минералов [Brantut et al., 2008; и др.], образование силикагеля [Kirkpatrick et al., 2013], неоминерализация поверхности скольжения на уровне нанокристаллов [Соболев и др., 2016; Веттегрень и др., 2018] и многие другие.

Новое важное направление, которое появилось в лабораторном эксперименте относительно недавно, это моделирование в лабораторных и численных экспериментах всего спектра процессов скольжения — крипа, событий медленного скольжения, невулканического тремора, динамических разрывов с разной скоростью распространения [Kocharyan et al., 2017; Das, 2015; и др.]. Ряд экспериментальных исследований ориентирован на изучение закономерностей распространения

разрыва [McLaskey, Yamashita, 2017; Wu, McLaskey, 2019; и др.], моделируя ситуацию, в которой контактная область остается по существу запертой (скорость скольжения < 10 нм/с) перед внезапными эпизодами нестабильного скольжения (> 0.1 м/с) [Chang et al., 2012; McLaskey et al., 2015].

В течение многих лет малые размеры образцов сильно ограничивали возможности экспериментаторов как в части постановки опытов, так и в части проведения измерений. В последние годы стали появляться крупномасштабные экспериментальные стенды, в которых модельный разлом представляет собой контакт между поверхностями блоков скальной породы метрового масштаба. Подобные установки позволяют в деталях изучить процессы зарождения, инициации, распространения, а в некоторых случаях и остановки разрыва. Большие размеры позволяют исследовать пространственно-временные закономерности эволюции напряженно-деформированного состояния системы блок-разлом. Так, на построенной в 2018 г. установке в Корнельском университете (США) было показано, что разрыв, зарождающийся в процессе медленного крипа, по достижению определенной критической величины сдвига L_c может трансформироваться в динамическое скольжение. Данный механизм зарождения лежит в основе “скоростной каскадной” модели инициации землетрясения [McLaskey, 2019]. Форшоковая активность, наблюдаемая перед актами динамических срывов, обусловлена постепенным разрушением контактных пятен на поверхности блоков, свойства и пространственное расположение которых контролируется шероховатостью поверхностей блоков [Selvadurai, Glaser, 2017; Yamashita et al., 2018]. Авторы работы [Ke et al., 2020] предположили, что основной причиной остановки разрыва на модельном разломе является его неоднородное напряженное состояние, связанное, в том числе и с гетерогенностью поверхности контакта.

Известно, что на любом иерархическом уровне — от образцов горной породы до крупнейших разломов — в области скольжения выделяются особые зоны локальных контактов неровностей [Scholz, 2019], так называемые, “*asperities*” [Kanamori, Stewart, 1978]. Согласно результатам сейсмологических и геодезических наблюдений, в очаге крупных землетрясений происходит динамическое разрушение фрикционного контакта на одном или нескольких контактных пятнах. Согласно развиваемым в настоящее время представлениям, “*asperities*” и области между ними могут обладать разными фрикционными свойствами, соответственно разупрочнения и упрочнения при сдвиге [Noda et al., 2013; Kocharyan, Kishkina 2021; и др.]. Пространственная гетерогенность фрикционных свойств интерфейса разлома играет, вероятно, первостепенную роль в определении

спектра режимов скольжения, реализующихся на разломе [Collettini et al., 2019; Vuijze et al., 2021; Bedford et al., 2022]. Лабораторные эксперименты на образцах достаточно большого масштаба с контролируемой шероховатостью способны внести определенную ясность в этот вопрос.

В настоящей статье представлена новая, уникальная для России лабораторная установка метрового масштаба, созданная в ИДГ РАН для исследования закономерностей развития различных режимов скольжения по нарушениям сплошности массива горных пород, а также приведены результаты первых экспериментов, направленных на изучение особенностей формирования различных режимов скольжения разломов с близкими значениями фрикционной прочности.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальный стенд представляет собой установку двухосного нагружения, состоящую из стальной несущей рамы, гидравлической системы приложения нагрузки и двух контактирующих блоков (рис. 1 – схема установки). Несущая рама (R) включает 13 стальных листов, прижатых вертикальными струбцинами к стальной раме высотой 0.7 м. Стальные листы имеют размер $1500 \times 1000 \text{ мм}^2$ и толщину 10 мм, внутренний вырез – $1200 \times 460 \text{ мм}^2$. На нижний стальной лист уложены домкраты. Четыре домкрата КВТ ДН50П16 (J_v) создают нормальное усилие. Максимальное усилие на каждом из домкратов составляет 50 т. Домкраты вставлены в специальное устройство, которое обеспечивает центровку системы нагружения. Один домкрат TOR ДУ ННУУ 100150 (J_r), расположенный с торца, создает сдвиговую нагрузку. Максимальное усилие на домкрате 100 т, ход штока домкрата составляет 150 мм. Давление в домкратах для приложения нормального усилия задается гидравлическим насосом КВТ ПМН-7012 (максимальное давление 700 бар) через распределительный гидравлический кран. Давление в домкрате для приложения сдвигового усилия создается насосной станцией ООО “Гидросфера” (максимальное давление 700 бар), которая позволяет регулировать скорость подачи штока домкрата в пределах от 30 до 500 мкм/с.

Основу экспериментальной установки составляют два блока скальной породы или модельного материала размерами (Д × Ш × В): $800 \times 175 \times 120 \text{ мм}^3$ (B1, рис. 1) и $750 \times 175 \times 120 \text{ мм}^3$ (B2). Модельный разлом представляет собой контакт шероховатых поверхностей блоков и имеет размер $750 \times 120 \text{ мм}^2$. В описываемой серии испытаний использовались блоки из диабаз.

При исследовании фрикционного взаимодействия бывает важным учесть топографию контактирующих поверхностей. Параметры шероховатости блоков измерялись лазерным профилометром вдоль профилей, параллельных действию сдвигового усилия. В качестве профилометра использовался датчик перемещений MicroEpsilon ILD2220-10 с точностью определения высоты поверхности 0.15 мкм. Результаты измерений приведены на рис. 2а. Можно видеть, что поверхности блоков характеризуются волнистостью с длиной волны 25–30 см и фрактальной шероховатостью на масштабе характерных размеров 10 мкм–5 мм. Для 1D-профиля, обладающего фрактальной структурой, присуща масштабная инвариантность: $h(\lambda x) = \lambda^H h(x)$, где H – скейлинговый параметр Херста. Параметр Херста может быть оценен на основе преобразования Фурье по зависимости спектральной плотности мощности высоты шероховатости P от волнового числа k (рис. 2б). Если поверхность по латерали характеризуется фрактальной структурой, то зависимость спектральной плотности мощности от волнового вектора имеет вид: $P(k) \sim k^{1-2H}$ [Candela et al., 2009]. Показатель Херста H для шероховатости поверхности блоков составляет 0.3–0.4.

В ходе экспериментов модельный разлом заполнялся слоем гранулированного материала (G), в качестве которого использовались кварцевый песок с размером зерен 0.2–0.315 мм, кварцевый песок, увлажненный глицерином (0.025% по массе), смесь кварцевого песка и каолиновой глины, гранитная крошка с размером зерен 0.4–1.2 мм. Толщина слоя составляла 4 мм. Отдельные эксперименты проводились без заполнителя.

В ходе экспериментов нормальное и сдвиговое усилия прикладывались к блоку B2. Для снятия “паразитных” касательных усилий между домкратами нормальной нагрузки, и поверхности блока B2 размещались два листа фторопласта толщиной по 4 мм (Т на рис. 1). Сдвиговое усилие прикладывалось к блоку B2 через специальную металлическую вставку. Нормальное и сдвиговое усилия контролировались малогабаритными датчиками давления NAT_8252 (F, рис. 1) с частотой дискретизации 10 Гц. Перемещение берегов модельного разлома контролировалось лазерными датчиками (L_x , L_y , рис. 1) MicroEpsilon ILD2220-10 с точностью 0.15 мкм и датчиком ILD2300-100 с точностью 1 мкм и частотой дискретизации 20 кГц. Относительное смещение блоков измерялось в двух направлениях – вдоль границы между блоками (направление ОХ, сдвиговая компонента) и по нормали к ней (направление ОУ, нормальная компонента) (рис. 1). На свободной верхней поверхности блоков размещались также датчики акустической эмиссии и акселерометры (S, рис. 1). Для регистрации излучаемых в процессе сдвига упру-

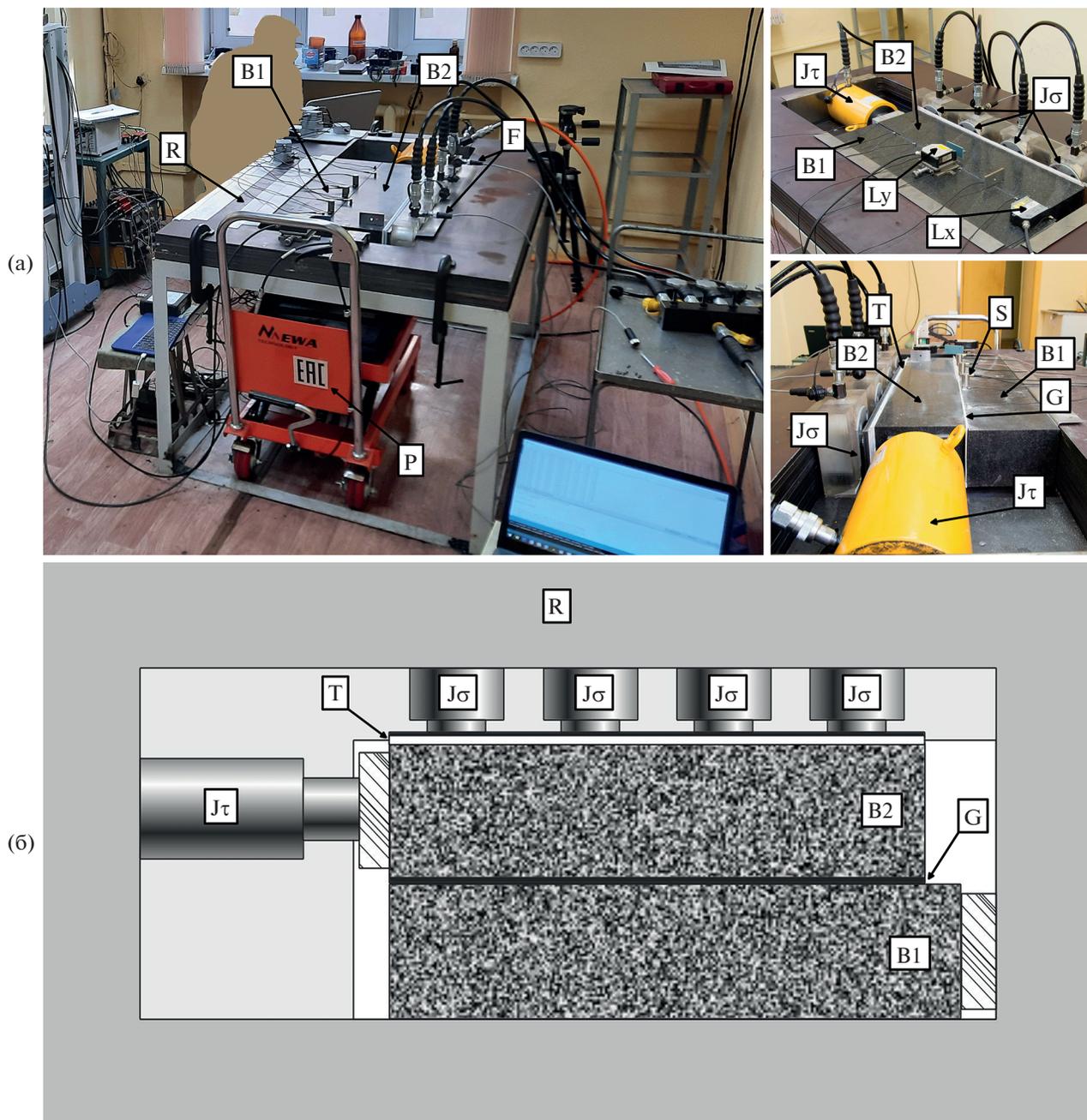


Рис. 1. Вид экспериментальной установки (а) и ее принципиальная схема (б): R – несущая рама; B1, B2 – блоки; G – слой гранулированного материала; Jτ, Jσ – нагружающие домкраты; T – листы фторопласта; Lx, Ly – лазерные датчики перемещения; F – датчики силы; S – преобразователи АЭ; P – подвижная платформа.

гих колебаний использовались акселерометры Briel & Kjaer (B&K) 4344 (рабочий диапазон частот 0–20 кГц), датчики акустической эмиссии (АЭ) Vallon Systeme VS30-V (рабочий диапазон частот 25–80 кГц) и датчики АЭ Vallon Systeme AE104A (рабочий диапазон частот 100–400 кГц) (рис. 1, рис. 2а). Смонтированная на экспериментальной установке система регистрации упругих колебаний является уникальной по контролируе-

мому частотному диапазону, превышающему пять порядков по величине. Все датчики крепились на поверхности блоков на парафиновую смазку, обеспечивающую удовлетворительный акустический контакт. Для проверки качества акустического контакта датчиков и блоков перед началом каждого эксперимента использовался источник Су-Нильсена [Sause, 2011].

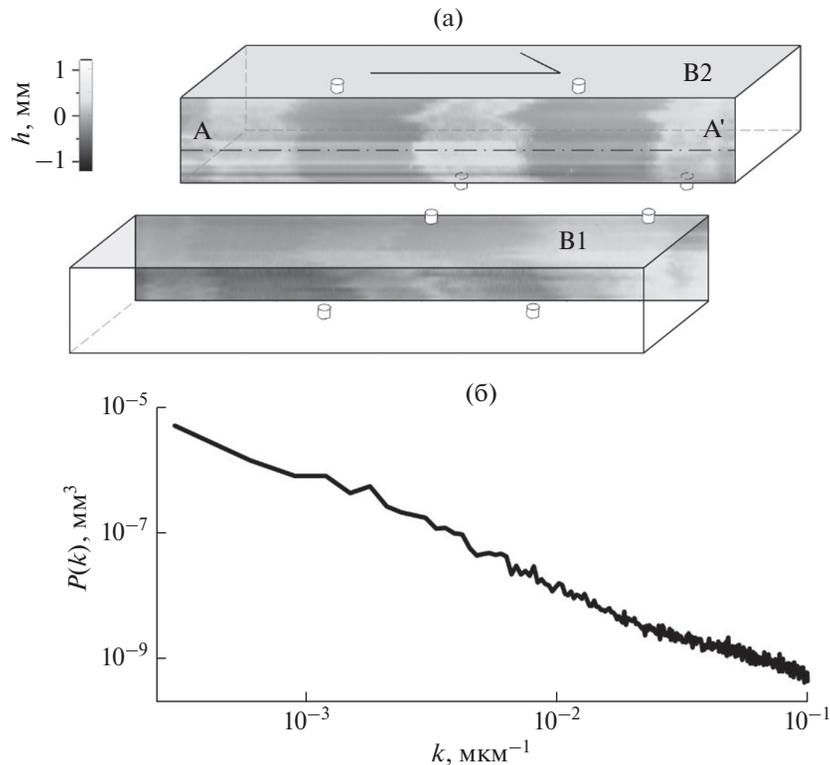


Рис. 2. Геометрия модельного разлома: (а) – представлена топография берегов модельного разлома и расположение преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ) АЕ104А, используемых для локализации источников АЭ; (б) – зависимость спектральной плотности мощности шероховатости берегов $P(k)$ от волнового числа k для профиля АА'.

Регистрация сигналов АЭ в процессе сдвигового деформирования осуществлялась с частотой дискретизации 10 МГц. Для выделения отдельных импульсов АЭ применялся информационный критерий Акаике (AIC) [Carpinteri et al., 2012; Sleeman, Eск, 1999]. Временной ряд, содержащий вступление сигнала АЭ, можно разделить на два интервала, каждому из которых соответствует определенный авторегрессионный процесс. Для двухинтервальной модели AIC рассчитывается в скользящем окне длиной N согласно соотношению [Maeda, 1985]:

$$AIC(k) = k \lg S(A[1, k]) + (N - k - 1) \lg S(A[k + 1, N]), \quad (1)$$

где: k – момент времени, разделяющий два интервала; $S(A)$ – дисперсия ряда. Момент времени, где AIC принимает минимальное значение, соответствует оптимальному разделению на интервалы и интерпретируется как момент вступления P -волны импульса АЭ.

Импульсы АЭ, зарегистрированные датчиками АЕ104А, были использованы для определения координат их источников. Для решения задачи локализации источников АЭ восемь преобразователей АЕ104А устанавливались на обоих блоках (по четыре на верхней и нижней свободных поверх-

ностях), по обе стороны от модельной разломной зоны (рис. 2а). Такое расположение преобразователей позволило реализовать трехмерную локацию источников АЭ. Регистрация импульсов АЭ осуществлялась с порогом дискриминации 37 дБ. Для определения координат источников АЭ был использован метод разности времени прихода сигнала на ПАЭ с горизонтально-слоистой скоростной моделью, параметры которой уточнялись на этапе калибровки ПАЭ.

Подготовка экспериментов проводилась следующим образом. На подвижную платформу (Р) укладываются блоки так, чтобы они были сомкнуты. После этого блоки на платформе перемещаются внутрь несущей рамы (R) таким образом, чтобы система блоки–домкраты оказалась отцентрированной. Затем между подвижным блоком В2 и домкратами нормального давления вставлялись листы фторопласта, а между блоком В1 и стальной рамой вставлялась стальная прокладка. Перед заполнением промежутка между блоками гранулированным материалом по нижней и боковой кромкам поверхностей блоков фиксировались тонкие фторопластовые полоски для того, чтобы материал не высыпался в процессе эксперимента. При заполнении щели наполнитель утрамбовывался так, чтобы одна и та же мас-

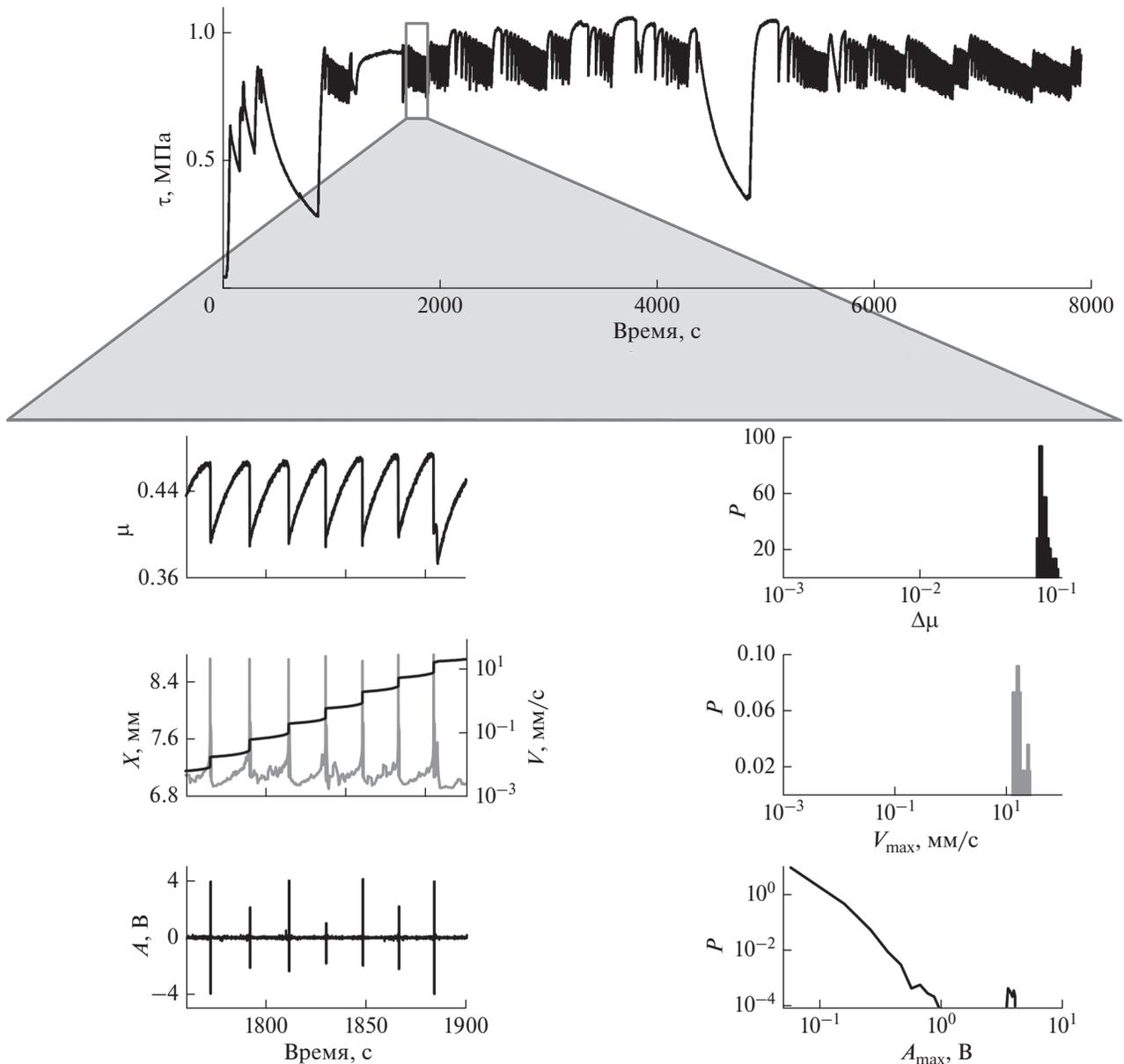


Рис. 3. Временные вариации параметров при регулярном прерывистом скольжении. Сверху представлены вариации сдвигового напряжения τ на протяжении всего эксперимента. Снижение величины τ на интервалах 400–850 с и 4400–4850 с соответствует моментам остановки сдвигового нагружения и калибровки датчиков АЭ. На врезке слева представлены вариации коэффициента трения (μ), смещения (X), скорости смещения (V), а также запись акустического сигнала (A), зарегистрированного датчиком Vallen Systeme VS30-V. На всем временном интервале скорость сдвигового нагружения составляла 10 мкм/с, нормальное давление 2 МПа. На врезке справа представлены плотность вероятности изменения коэффициента трения ($\Delta\mu$), максимальной скорости скольжения (V_{max}) и амплитуды АЭ (A_{max}) при динамических событиях на временном интервале от 1700 до 3000 с.

са материала заполняла одинаковый объем межблокового контакта. Тем самым контролировалась плотность заполнителя. По окончании набивки нормальное давление увеличивалось до 1 МПа. В конце подготовки эксперимента подвижная платформа опускалась вниз, и установка была готова к работе. Далее нормальное напряжение J_n , повышалось до необходимого уровня,

включалась насосная станция и задавалась скорость движения штока домкрата (J_τ , рис. 1). В представленной серии экспериментов нормальное давление составляло 2–3 МПа. Скорость движения штока домкрата могла меняться в ходе эксперимента. Заметим, что во время эксперимента блоки удерживались в горизонтальном положении только за счет силы нормального давления.

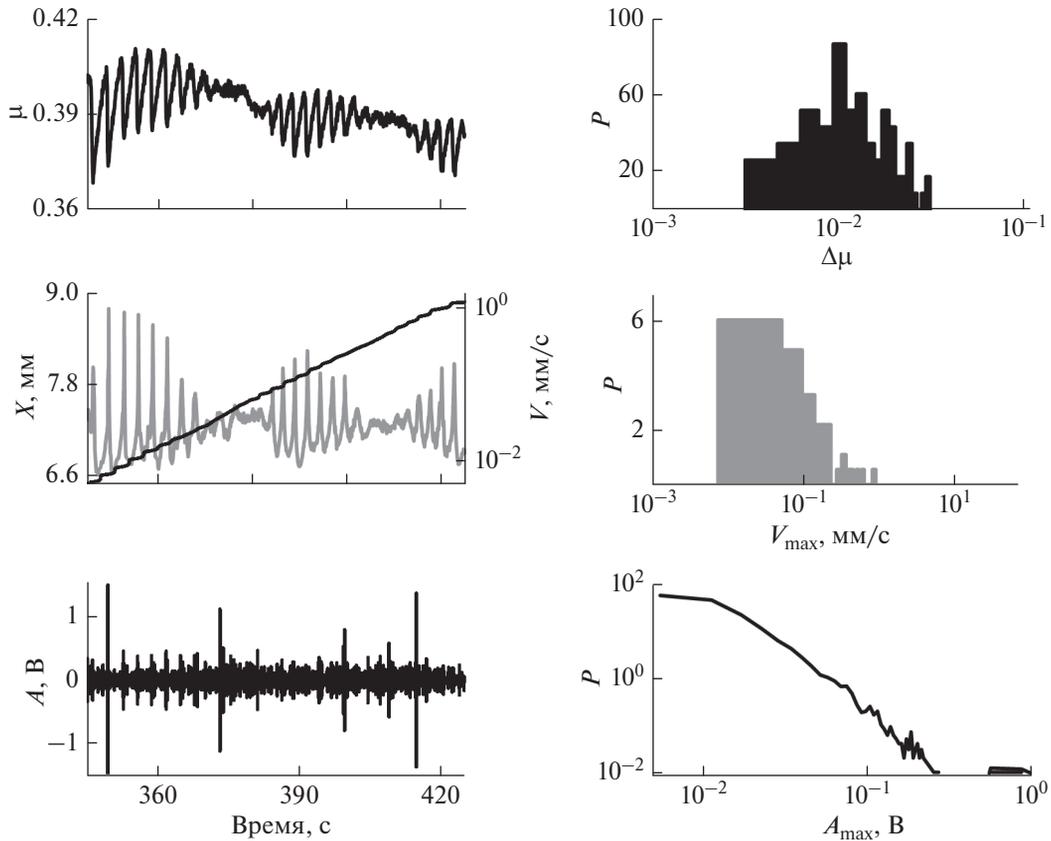


Рис. 4. Временные вариации параметров при нерегулярном режиме скольжения. Слева представлены вариации коэффициента трения (μ), смещения (X), скорости смещения (V), а также запись акустического сигнала (A), зарегистрированного датчиком Vallen Systeme VS30-V. На всем временном интервале скорость сдвигового нагружения составляла 50 мкм/с, нормальное давление 2 МПа. Справа представлены плотность вероятности (P) изменения коэффициента трения ($\Delta\mu$), максимальной скорости скольжения (V_{\max}) и амплитуды АЭ (A_{\max}) при динамических событиях на интервале длительностью 300 с.

РЕЖИМЫ СКОЛЬЖЕНИЯ

В ходе экспериментов были реализованы различные режимы скольжения по разлому с заполнителем: режим регулярного и нерегулярного прерывистого скольжения, стабильный крип, а также искусственно модулированный режим нерегулярного скольжения. Возникновение того или иного режима скольжения контролировалось вещественным составом заполнителя разлома и пространственной конфигурацией его распределения, а также модуляцией скорости выдвигания штока домкрата J_r .

При деформировании модельного разлома, заполненного смесью кварцевого песка (60% по массе) и глины (40%), был реализован крип — режим стабильного скольжения с постоянной скоростью (режим #1). При вариациях скорости нагружения менялась лишь скорость скольжения, а каких-либо трансформаций режима не происходило.

При использовании в качестве заполнителя чистого кварцевого песка, реализуется режим регулярного прерывистого скольжения (режим #2).

На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости, полученные для этого варианта заполнения. Режим регулярного прерывистого скольжения характеризуется повторяющимися с примерно одинаковым рекуррентным временем актами быстрых динамических подвижек. Перед динамическим срывом отчетливо выделяется интервал ускоренного крипа длительностью 5–10 с, в ходе которого блок постепенно ускоряется. Динамические срывы характеризуются амплитудой косейсмических перемещений — 100 ± 20 мкм, сбросом сдвигового усилия — 14 ± 1 кПа и максимальной скоростью косейсмического скольжения — 20 ± 5 мм/с. Изменение эффективного коэффициента трения μ , равного отношению текущих значений сдвигового напряжения к нормальному, составляло 0.09 ± 0.01 .

В ходе экспериментов установлено, что существует минимальная скорость нагружения, ниже которой режим регулярного прерывистого скольжения трансформируется в стабильный крип —

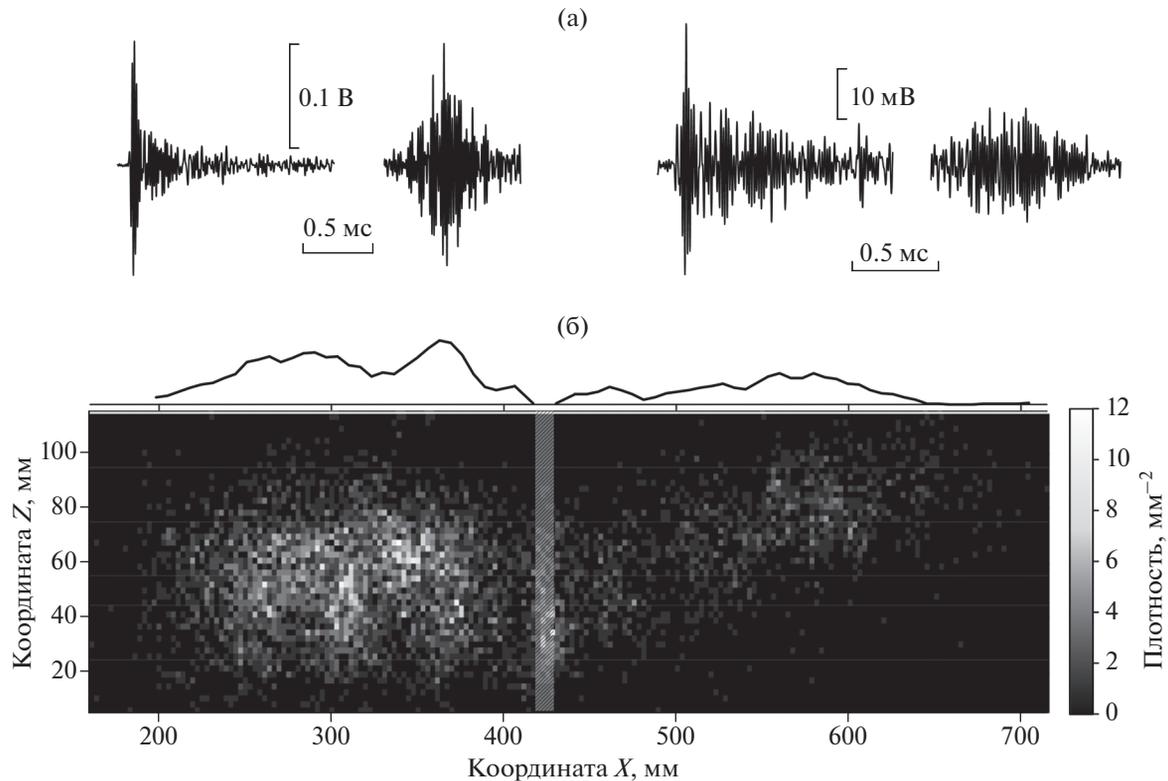


Рис. 5. Акустическая эмиссия, сопровождающая скольжение разлома с пространственно-неоднородной структурой заполнителя: (а) – примеры волновых форм, зарегистрированных АЭ датчиком Vallen Systeme VS30-V; (б) – распределение очагов АЭ в плоскости разлома. Зона 0–410 мм сложена песчано-глинистой смесью, 420–750 мм – увлажненным кварцевым песком. Кривые над рисунком – относительная линейная плотность очагов вдоль плоскости разлома.

при нормальном давлении – 2 МПа, критическая скорость составила – 0.6 мкм/с.

В условиях, когда модельный разлом характеризуется пространственно-неоднородной структурой, на разломе может быть реализован широкий спектр режимов скольжения. При деформировании модельного разлома, заполнителя которого был разделен на две зоны – одна сложена увлажненным кварцевым песком, вторая – смесью кварцевого песка (80%) и глины (20%) – был зарегистрирован режим аperiодического прерывистого скольжения (режим #3) (рис. 4). Можно видеть, что аperiодически формируются интервалы нестабильного скольжения, на которых происходят динамические подвижки со значительно меньшей, чем при регулярном стик-слипе скоростью так, что их можно назвать “медленные” события. Длительность интервалов нестабильного скольжения варьируется от 10 до 20 с. Наблюдаемые в этом случае события характеризуются амплитудой косейсмического перемещения – 40 ± 10 мкм, сбросом сдвигового усилия – 2 ± 1 кПа (относительное изменение коэффициента трения – 0.02 ± 0.01) и максимальной скоростью косейсмического скольжения – от 0.01 до 0.2 см/с (при скорости нагружения 50 мкм/с). Кроме того, было обнаружено, что

модельный разлом с пространственно-неоднородной структурой проявляет высокую чувствительность к вариациям скорости нагружения. Увеличение скорости нагружения всегда инициировало динамическую подвижку. Как и в случае регулярного стик-слипа, при скорости нагружения меньше 1 мкм/с динамические события полностью вырождались.

В процессе сдвигового деформирования регистрировалось большое количество высокочастотных акустических колебаний с различной волновой формой и амплитудой (рис. 5а). На рис. 3 и рис. 4 амплитудно-частотные распределения были построены на основании более 10000 импульсов АЭ. Для всех режимов скольжения статистика АЭ описывается степенным законом распределения:

$$\lg N = a - b \lg A_{\max}, \quad (2)$$

где: A_{\max} – амплитуда АЭ; a и b – положительные константы, величина которых меняется в зависимости от установленного режима скольжения. Соотношение (2) указывает на то, что модельный разлом как нелинейная динамическая система характеризуется свойством самоорганизованной критичности [De Arcangelis et al., 2016].

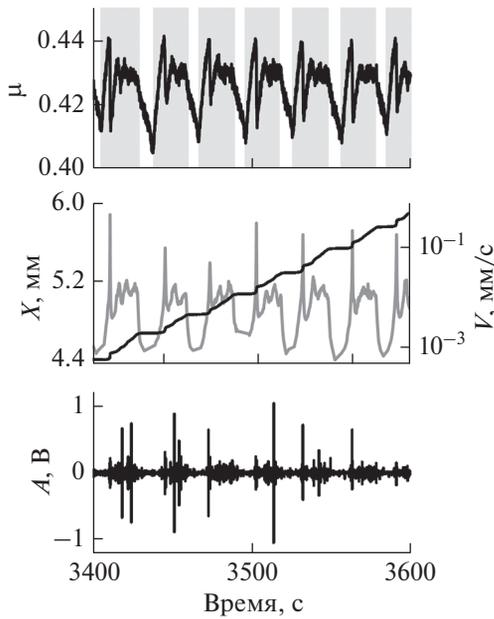


Рис. 6. Временные вариации параметров модельного разлома при “искусственном” прерывистом скольжении. Представлены зависимости коэффициента трения (μ), смещения (X), скорости смещения (V), а также запись акустического сигнала (A), зарегистрированного датчиком Vallen Systeme VS30-V. На закрашенных сверху интервалах скорость сдвигового нагружения составляла 8 мкм/с, на остальных – нагружение останавливалось. Нормальное давление составляло 2 МПа.

На рис. 5б представлено решение задачи локализации – пространственное распределение источников АЭ для эксперимента с пространственно-неоднородной структурой, временные вариации параметров для которого показаны на рис. 4. Всего найдено 5844 устойчивых решений задачи локализации источников акустической эмиссии за временной интервал 490 с. Точность локализации, с учетом того, что реальные координаты ПАЭ и скоростная модель были определены и уточнены на этапе калибровки системы регистрации АЭ, определяется апертурным эффектом и точностью измерения смещения подвижного блока. Для проведенных экспериментов точность определения координат ПАЭ составила ± 3.5 мм.

Можно видеть сильную пространственную неоднородность локализации источников АЭ. Следует отметить две яркие особенности. Во-первых, гипоцентры АЭ концентрируются на участках контактных пятен, связанных с неровностью поверхности берегов (см. рис. 2). Во-вторых, зоны, сложенные различными геоматериалами, характеризуются различной интенсивностью АЭ. Плотность источников в зоне, сложенной песочно-глиняной смесью, более чем в 5 раз выше зоны, сложенной кварцевым песком. Более высокая ак-

тивность АЭ в зоне, сложенной песочно-глиняной смесью, вероятно обусловлена более высокой подвижностью гранул заполнителя, в то время как зона, сложенная увлажненным кварцевым песком, является фактически “запертой” [Kocharyan et al., 2017].

Как было отмечено выше, модельный разлом с пространственно-гетерогенной структурой чувствителен к скорости нагружения. Периодические вариации скорости нагружения могут радикально изменить динамику скольжения разлома. На рис. 6 представлен пример модулированного режима скольжения для разлома с пространственно-неоднородной структурой. В процессе эксперимента скорость нагружения варьировалась: в течение 25 с скорость составляет 8 мкм/с, после чего в течение 5 с нагружение останавливается. В результате таких вариаций начинают формироваться регулярные акты быстрого проскальзывания со скоростями до 0.5 мм/с, фактически, наблюдается регуляризация процесса скольжения. При “искусственном” прерывистом скольжении статистика АЭ также характеризуется степенным законом распределения (2). Заметим, что в моменты остановки нагружения блок продолжает смещаться, хотя скорость скольжения падает более, чем на порядок. Медленное скольжение также сопровождается излучением импульсов АЭ.

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЗАПОЛНИТЕЛЯ ПРИ СКОЛЬЖЕНИИ РАЗЛОМА

При высоких напряжениях относительное смещение блоков вызывает растрескивание и дробление гранул заполнителя. На рис. 7 представлено изменение гранулометрического состава гранитной крошки в результате скольжения амплитудой 10 см при среднем нормальном напряжении 2 МПа. Можно видеть, что появилось заметное количество мелкой фракции за счет снижения количества крупных зерен. Если до эксперимента размер гранул варьируется в диапазоне от 0.4 до 1.2 мм с максимумом в диапазоне 1.0–1.2 мм, то после скольжения появились фракции в диапазоне < 0.4 мм, распределение гранул стало более равномерным.

Несмотря на относительно невысокий уровень средних нормальных напряжений, из-за концентрации на контактах зерен акты быстрых динамических смещений вызывают фрикционный нагрев, что приводит к структурным фазовым превращениям материала заполнителя. Для выявления фазовых превращений был применен метод синхронного термического анализа (СТА). Метод основан на синхронной регистрации изменения массы вещества (δm) и количества подводимого тепла (δQ) при нагревании. Сравнение кривых нагревания образцов заполнителя до и после экспериментов позволяет делать выводы о возмож-

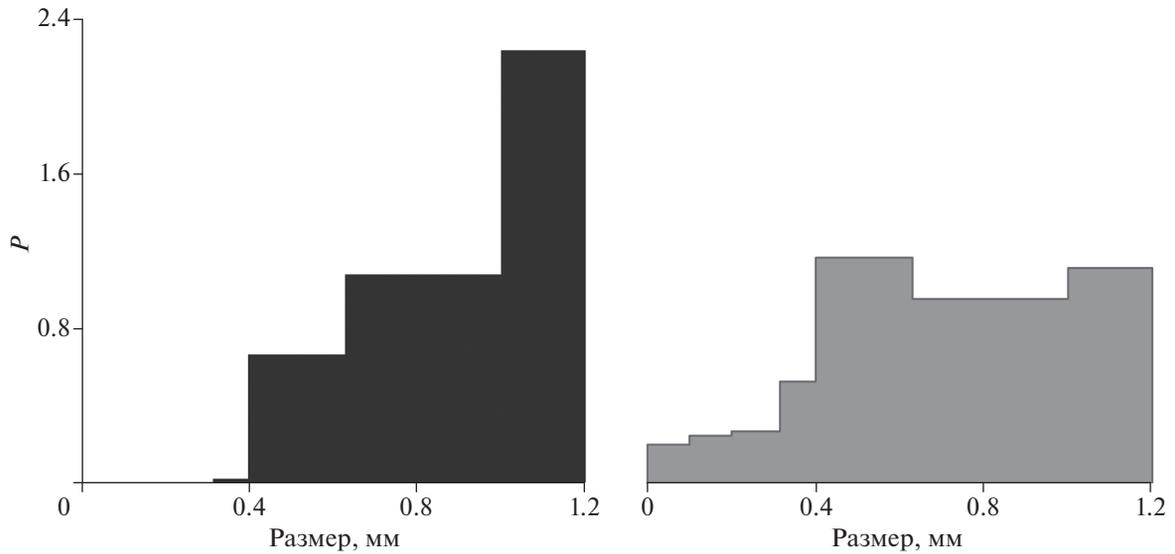


Рис. 7. Изменение гранулометрического состава в ходе деформирования модельного разлома, сложенного гранитной крошкой. Слева представлено распределение плотности вероятности размера гранул до, справа – после эксперимента. Величина нормального напряжения составляла 2 МПа, кумулятивное перемещение модельного разлома – 10 см.

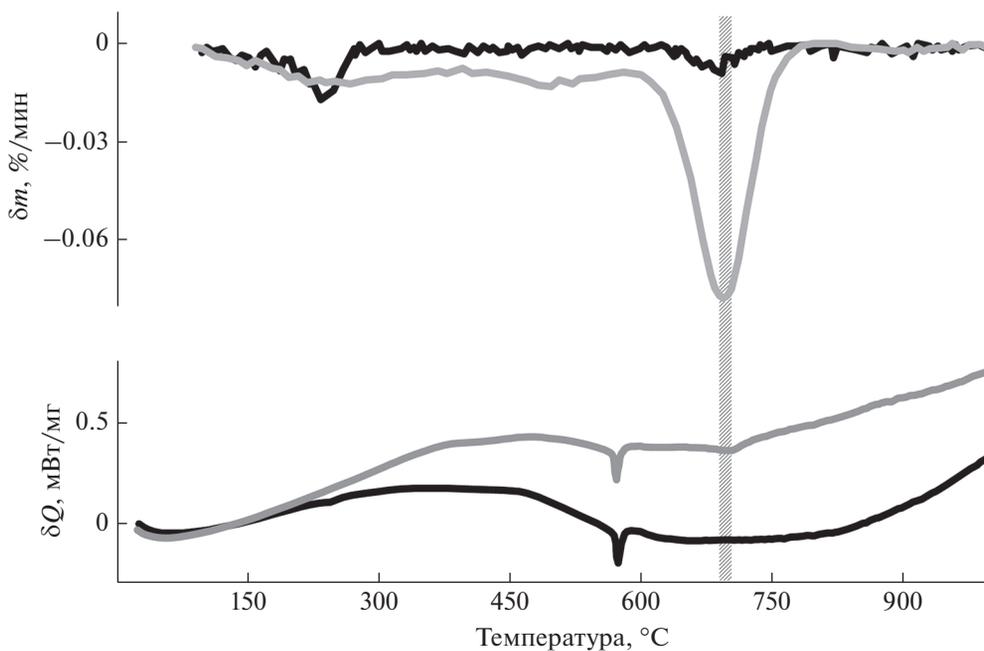


Рис. 8. Синхронный термический анализ образцов кварцевого песка, извлеченных до (черная линия) и после (серая линия) эксперимента: δm – относительное изменение массы образца при нагревании; δQ – удельное количество подводимого к образцу тепла. Выделенная область соответствует температуре структурного перехода β -кварца в тридимит.

ных фазовых превращениях. На рис. 8 представлены результаты синхронного термического анализа образцов материала-заполнителя до и после реализации режима высокоамплитудного прерывистого скольжения с максимальной скоростью скольжения при динамических срывах 25–35 мм/с при нормальном напряжении 2 МПа. Результаты

СТА показывают, что при температуре $\sim 700^\circ\text{C}$ в образце заполнителя, извлеченном после эксперимента, произошли изменения, заключающиеся в потере массы на 1.07%, в то время как в исходном образце потеря массы при этой же температуре незначительна – 0.03%. Данные изменения вызваны структурной перестройкой кристаллов кварца с

образованием его новой модификации тридимита при локальном нагревании свыше 700°C [Бетехтин, 1951].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные технологии лабораторного эксперимента позволяют проводить моделирование деформационных процессов, сопровождаемых излучением сейсмических колебаний. Испытательные машины с сервоуправлением, камеры всестороннего сжатия, системы создания порового давления позволяют в широких пределах изменять режимы нагружения, а системы регистрации и методы обработки данных акустической эмиссии, излучаемой при образовании микротрещин, позволяют формировать каталоги микрособытий, содержащие данные о координатах, времени возникновения, величине, а иногда и механизме каждого акустического события [Смирнов, Пономарев, 2020; Пантелеев, 2020]. При всех многочисленных достоинствах экспериментов на образцах сантиметрового масштаба, их возможности ограничены, например, в части контроля неоднородности фрикционных свойств поверхности разрыва. В таких опытах сложно создавать вариацию напряженного состояния вдоль разлома, исследовать пространственно-временную эволюцию разрыва. Контроль модификации свойств поверхности или заполнителя на малых масштабах требует изощренной техники проведения эксперимента [Веттегрень и др., 2018].

Как наш опыт, так и результаты других групп [Mcliskey, Yamashita, 2017] показывают, что многие проблемы решаются при переходе на эксперименты с метровыми образцами. Приведенные в настоящей статье результаты отчетливо демонстрируют, что на созданной установке может быть воспроизведен весь спектр режимов скольжения по разлому – от медленного крипа, до регулярного стик-слипа со скоростью подвижки порядка, по крайней мере, десяти см/с. Привлекает возможность искусственной модуляции деформационного режима за счет вариации скорости нагружения.

Первые результаты показывают, что мода скольжения определяется такими факторами, как геометрия берегов разлома, пространственное распределение фрикционных свойств бортов и заполнителя, скорость приложения нагрузки. Показано, что крупномасштабная волнистость берегов разлома определяет зоны, в которых локализовано наиболее интенсивное контактное взаимодействие. Аналогичным образом в областях скольжения тектонических разломов выделяются нерегулярные, неизменяемые в течение десятков (возможно, сотен) лет сейсмогенерирующие структурные формы, расположение которых, наряду с геометрическими факторами, веро-

ятно определяются гетерогенностью фрикционных характеристик центральной части разлома.

Представляет интерес установленный факт структурных изменений заполнителя модельного разлома в ходе эксперимента. Несмотря на относительно небольшой уровень нормальных напряжений, имеет место как дробление зерен, так и модификация материала, связанная с локальным нагревом в ходе динамической подвижки.

Описанная в настоящей статье, уникальная для России лабораторная установка находится в стадии детального исследования ее возможностей. Мы полагаем, что подробное описание стенда может оказаться полезным другим исследовательским группам. При этом следует иметь в виду, что фрикционная лабораторная модель, даже достаточно большого размера, не в состоянии воспроизвести целый ряд наблюдающихся в природе явлений постпикового временного снижения трения, связанных со скольжением по разлому со скоростями 1–10 м/с, в P - T -условиях, характерных для сейсмогенных глубин. Эти эффекты, безусловно, играют важную роль, определяя, в значительной степени, такие параметры как амплитуда сброшенного напряжения и величина энергии, излученной в ходе подвижки [Кочарян, 2016]. Однако ясно, что они не сказываются на процессах подготовки акта скольжения. Это обстоятельство очерчивает возможный круг задач для моделирования на подобных установках деформационных процессов, происходящих в зонах сейсмогенных разломов – предсейсмическая стадия неупругого поведения зоны магистрального разрыва при критическом уровне напряжений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Разработка концепции проведения лабораторных экспериментов и анализ изменения вещественного состава выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № 122032900178-7. Создание лабораторной установки и проведение экспериментов выполнены при финансовой поддержке совместного проекта РФФИ-ГФЕН № 20-55-53031.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бетехтин А.Г.* Курс минералогии. М.: изд-во геологической литературы. 1951. 543 с.
- Веттегрень В.И., Арора К., Пономарев А.В., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П., Кулик В.Б.* Изменение строения поверхностей базальта и гранита при трении // Физика твердого тела. 2018. Т. 60. № 5. С. 965–969.
- Гуфельд И.Л.* Сейсмическая опасность: предотвратить или предупредить М.: "Onebook.ru". 2019. 98 с.
- 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.
<https://doi.org/10.31857/S0002333721040062>
- Кочарян Г.Г.* Геомеханика разломов. М.: ГЕОС. 2016. 424 с.
- Пантелеев И.А.* Анализ тензора сейсмического момента акустической эмиссии: микромеханизмы разрушения гранита при трехточечном изгибе // *Акустический журнал*. 2020. Т. 66. № 6. С. 654–668.
<https://doi.org/10.31857/S0320791920060076>
- Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф.* Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука. 1987. 100 с.
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В.* Физика переходных режимов сейсмичности. М.: РАН. 2020. 412 с.
- Соболев Г.А., Киреевкова С.М., Морозов Ю.А., Смольская А.И., Веттегрень В.И., Кулик Б.В., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П.* Нанокристаллы в горных породах. М.: ГЕОС. 2016. 110 с.
- Arcangelis L., Godano C., Grasso J., Lippiello E.* Statistical physics approach to earthquake occurrence and forecasting // *Physics Reports*. 2016. V. 628. P. 1–91.
<https://doi.org/10.1016/j.physrep.2016.03.002>
- Bedford J.D., Faulkner D.R., Lapusta N.* Fault rock heterogeneity can produce fault weakness and reduce fault stability // *Nat. Commun.* 2022. V. 13(326).
<https://doi.org/10.1038/s41467-022-27998-2>
- Brantut N., Schubnel A., Rouzaud J.-N., Brunet F., Shimamoto T.* High-velocity frictional properties of a clay bearing, fault gouge and implications for earthquake mechanics // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. B10401.
<https://doi.org/10.1029/2007JB005551>
- Buijze L., Guo Y., Niemeijer A.R., Ma S., Spiers C.J.* Effects of heterogeneous gouge segments on the slip behavior of experimental faults at dm scale // *Earth Planet. Sci. Lett.*
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116652>
- Candela T., Renard F., Bouchon M. et al.* Characterization of Fault Roughness at Various Scales: Implications of Three-Dimensional High Resolution Topography Measurements // *Pure appl. geophys.* 2009. V. 166. P. 1817–1851.
<https://doi.org/10.1007/s00024-009-0521-2>
- Carpinteri A., Xu J., Lacidogna G., Manuello A.* Reliable onset time determination and source location of acoustic emissions in concrete structures // *Cement and Concrete Composites*. 2012. V. 34. № 4. P. 529–537.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.013>
- Chang J.C., Lockner D.A., Reches Z.* Rapid acceleration leads to rapid weakening in earthquake-like laboratory experiments // *Science*. V. 338(6103). P. 101–105.
<https://doi.org/10.1126/science.1221195>
- Chen X., Carpenter B.M., Reches Z.* Asperity failure control of stick-slip along brittle faults // *Pure Appl. Geophys.* 2020. V. 177. P. 3225–3242.
<https://doi.org/10.1007/s00024-020-02434-y>
- Chen X., Madden A.S., Bickmore B.R., Reches Z.* Dynamic weakening by nanoscale smoothing during high-velocity fault slip // *Geology*. 2013. V. 41. № 7. P. 739–742.
<https://doi.org/10.1130/G34169.1>
- Collettini C., Tessei T., Scuderi M.M., Carpenter B.M., Viti C.* Beyond Byerlee friction, weak faults and implications for slip behavior // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2019. V. 519. P. 245–263.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.05.011>
- Das S.* Supershear Earthquake Ruptures – Theory, Methods, Laboratory Experiments and Fault Superhighways: An Update. Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology. A. Ansel (ed.). Springer. 2015. P. 1–20.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-16964-4_1
- Dieterich J.H.* Modeling of Rock Friction: 1. Experimental results and constitutive equations // *J. Geophys. Res.* 1979. V. 84. P. 2161–2168.
<https://doi.org/10.1029/JB084IB05P02161>
- Di Toro G., Han R., Hirose T., De Paola N., Nielsen S., Mizoguchi K., Ferri F., Cocco M., Shimamoto T.* Fault lubrication during earthquakes // *Nature*. 2011. V. 471. P. 494–498.
<https://doi.org/10.1038/nature09838>
- Di Toro G., Hirose T., Nielsen S., Pennacchioni G., Shimamoto T.* Natural and experimental evidence of melt lubrication of faults during earthquakes // *Science*. 2006. V. 311. P. 647–649.
<https://doi.org/10.1126/science.1121012>
- Kanamori H., Stewart G.S.* Seismological aspects of the Guatemala Earthquake of February 4, 1976 // *J. Geophysical Research*. 1978. V. 83. № B7. P. 3427–3434.
<https://doi.org/10.1029/JB083iB07p03427>
- Ke C.Y., McLaskey G.C., Kammer D.S.* The earthquake arrest zone. // *Geophys. J. Int.* 2021. V. 224. P. 581–589.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggaa386>
- Kirkpatrick J.D., Rowe C.D., White J.C., Brodsky E.E.* Silica gel formation during fault slip: Evidence from the rock record // *GEOLOGY*, September. 2013. V. 41. № 9. P. 1015–1018.
<https://doi.org/10.1130/G34483.1>
- Kocharyan G.G., Kishkina S.B.* The physical mesomechanics of the earthquake source // *Physical Mesomechanics*. 2021. V. 24. № 4. P. 343–356.
<https://doi.org/10.1134/S1029959921040019>
- Kocharyan G.G., Novikov V.A., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V.* A study of different fault slip modes governed by the gouge material composition in laboratory experiments // *Geophys. J. Int.* 2017. V. 208. P. 521–528.
<https://doi.org/10.1093/GJI/GGW409>
- Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V. et al.* Experimental study of different modes of block sliding along interface. Part 2. Field experiments and phenomenological model of the phenomenon // *Phys. Mesomech.* 2017. V. 20. P. 193–202.
<https://doi.org/10.1134/S1029959917020096>
- Marone C.* Laboratory derived friction laws and their application to seismic faulting // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 1998. V. 26. P. 643–696.
<https://doi.org/10.1146/ANNUREV.EARTH.26.1.643>
- Mclasley G.C.* Earthquake Initiation from laboratory observations and implications for foreshocks // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2019. V. 124.
<https://doi.org/10.1029/2019JB018363>
- Mclasley G.C., Yamashita F.* Slow and fast ruptures on a laboratory fault controlled by loading characteristics // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2017. V. 122.
<https://doi.org/10.1002/2016JB013681>
- McLaskey G.C., Lockner D.A., Kilgore B.D., Beeler N.M.* A Robust Calibration Technique for Acoustic Emission Systems Based on Momentum Transfer from a Ball Drop //

Bull. Seismol. Soc. Am. 2015. V. 105. № 1. P. 257–271.
<https://doi.org/10.1785/0120140170>

Noda H. Frictional constitutive law at intermediate slip rates accounting for flash heating and thermally activated slip process // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. B09302.
<https://doi.org/10.1029/2007JB005406>

Noda H., Lapusta N., Kanamori H. Comparison of average stress drop measures for ruptures with heterogeneous stress change and implications for earthquake physics // *Geophys. J. Int.* 2013. V. 193. № 3. P. 1691–1712.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggt074>

Sause M.G.R. Investigation of pencil-lead breaks as acoustic emission sources // *J. Acoust. Emiss.* 2011. V. 29. P. 184–196.

Scholz C.H. The mechanics of earthquakes and faulting. 3rd edition. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

2019. 517 p.

<https://doi.org/10.1017/9781316681473>

Selvadurai P.A., Glaser S.D. Asperity generation and its relationship to seismicity on a planar fault: a laboratory simulation // *Geophysical Journal International.* 2017. V. 208. P. 1009–1025.

<https://doi.org/10.1093/GJI/GGW439>

Sleeman R., Eck T.V. Robust automatic P-Phase picking: an on-line implementation in the analysis of broadband seismogram recordings // *Physics of the Earth and Planetary Interiors.* 1999. V. 113. № 1–4. P. 265–275.

[https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(99\)00007-2](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(99)00007-2)

Wu B.S., McLaskey G.C. Contained laboratory earthquakes ranging from slow to fast // *J. Geophysical Research: Solid Earth.* 2019. V. 124 № 10. P. 270–291.

<https://doi.org/10.1029/2019JB017865>

Laboratory Studies of Frictional Interaction Patterns of Meter-Scale Solid-Rock Blocks: Technique and First Results

**G. G. Kocharyan^a, A. A. Ostapchuk^{a, *}, D. V. Pavlov^a, G. A. Gridin^a,
 K. G. Morozova^a, J. Hongwen^b, and I. A. Panteleev^c**

^a*Sadovskiy Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*China University of Mining and Technology, Xuzhou, China*

^c*Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch, Russian Academy of Science, Perm, Russia*

**e-mail: ostapchuk.aa@idg.ras.ru*

The paper introduces a new, unique for Russia, meter-scale laboratory setup created in the Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences (IDG RAS) to study the development of different sliding modes on the rock mass discontinuities. The experimental procedure is described and the results of the first series of tests aimed at studying the formation peculiarities of different sliding modes on rock discontinuities. A laboratory fault was a loaded contact of two 75-cm long blocks made of diabase. The fault was filled with granular material (a fault gouge). Normal stresses on the fault could reach 10 MPa. By varying the fault gouge composition and loading rate, we realized a wide range of sliding modes: sliding with constant velocity, regular stick-slip, and aperiodic slow slip episodes. It is shown that variation in the loading rate can lead to a significant change in the sliding mode. In the experiments at relatively low normal pressure of 2 MPa, intense frictional crushing of the gouge grains is detected, and in the case of high-amplitude stick-slip sliding, in addition to the crushing of the gouge material, also structural phase transformations of quartz grains, corresponding to a local temperature increase up to 700°C, are revealed. A possible set of the problems for modeling on such laboratory setups the deformation processes taking place in the seismogenic fault zones – the pre-seismic stage of inelastic behavior of the main fault zone at critical stress level – is outlined.

Keywords: tectonic fault, earthquake, laboratory experiment, acoustic emission