УДК 550.34,539.37

# АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ, СОПРОВОЖДАЮЩАЯ ПОДГОТОВКУ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ ПО МОДЕЛЬНОМУ ГЕТЕРОГЕННОМУ РАЗЛОМУ МЕТРОВОГО МАСШТАБА

© 2025 г. К. Г. Морозова<sup>1, \*</sup>, Д. В. Павлов<sup>1</sup>, А. А. Остапчук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, г. Москва, Россия \*E-mail: morozova.kg@idg.ras.ru

> Поступила в редакцию 25.11.2024 г. После доработки 27.11.2024 г. Принята к публикации 25.12.2024 г.

Закономерности распределения участков тектонических разломов с разными фрикционными свойствами в значительной степени контролируют динамику их скольжения. Невозможность прямого изучения структуры разломных зон на сейсмогенных глубинах делает особенно актуальным разработку методов диагностики, позволяющих получать информацию о структурных особенностях областей формирования очагов землетрясений и тем самым прогнозировать динамику скольжения.

В настоящей работе представлены результаты лабораторных экспериментов, в которых исследовались закономерности излучения упругих колебаний в процессе эволюции напряженно-деформированного состояния модельного разлома, имеющего пространственно-неоднородную структуру плоскости скольжения. Модельный разлом представлял собой нагруженный контакт блоков диабаза и имел размер  $750 \times 120$  мм<sup>2</sup>. На интерфейсе разлома были сформированы две зоны круглой формы диаметром по 100 мм, которые обладают повышенной прочностью со свойством скоростного разупрочнения, так называемые асперити. В ходе экспериментов изменялось относительное расположение таких зон. Процесс формирования динамического проскальзывания, обусловленного разрушением асперити, сопровождался излучением большого количества акустических импульсов, регистрируемых в полосе частот 20-80 кГц. В ходе экспериментов данные о пространственном распределении импульсов позволяют выявить две отдельные контактные области только при расстояниях между этими участками более 20 мм. При этом наблюдаются различия в статистике импульсов, излученных на различных асперити.

*Ключевые слова*: тектонический разлом, асперити, акустическая эмиссия, медленное скольжение, пространственно-временной анализ, лабораторный эксперимент.

DOI: 10.31857/S0002333725020107, EDN: DMQDJH

### введение

Многообразие режимов скольжения по тектоническим разломам формирует непрерывный ряд событий от крипа и событий медленного скольжения до динамических сейсмогенных подвижек при обычных землетрясениях [Peng, Gomberg, 2010]. Понимание механизмов подготовки, инициирования и остановки скольжения является одной из наиболее актуальных задач сейсмологии [Кочарян, 2021].

С точки зрения физики трения считается, что основным фактором, определяющим динамику скольжения по разлому, является

пространственная неоднородность фрикционных свойств плоскости скольжения [Fagereng, Bell, 2021]. Обследования эксгумированных с сейсмогенных глубин разломов демонстриналичие радикально отличающихся руют по структуре и материальному составу участков разломов [Collettini et al., 2019]. Для одних характерна высокая величина фрикционной прочности, соответствующая закону Байерли, а материал демонстрирует свойство скоростного разупрочнения (сопротивление сдвигу снижается при увеличении скорости скольжения). Другие участки разломов характеризуются низкими значениями коэффициента трения и сложены материалами со свойством скоростного упрочнения. Косейсмический разрыв в рамках такой структурной модели разлома стартует в окрестности границы области, характеризующейся свойством скоростного разупрочнения. На участках со свойством скоростного упрочнения скорость разрыва быстро снижается, вновь увеличиваясь в соседних областях со свойством скоростного разупрочнения. Если размер зоны скоростного упрочнения достаточно велик, то происходит остановка разрыва [Kocharyan et al., 2021]. В численных экспериментах показано, что в зависимости от плотности зон со свойством скоростного разупрочнения на разломе могут быть реализованы как быстрые, так и медленные режимы скольжения [Dublanchet et al., 2013].

Понимание процессов формирования и реразличных режимов скольжения ализации в значительной степени достигается благодаря лабораторным исследованиям динамики деформирования модельных разломов, в которых могут быть исследованы многие аспекты развития и инициирования динамической неустойчивости на разломе [Соболев, Пономарев, 2003; Кочарян, 2016]. Несмотря на то что условия проведения лабораторных экспериментов далеки от условий, характерных для сейсмогенных глубин, в них удается исследовать динамику деформирования разломов с пространственно-неоднородной структурой [Corbi et al., 2017; Buijze et al., 2021] и особенности развития динамической неустойчивости [Кочарян и др., 2021; Gounon et al., 2022].

В настоящей работе представлены результаты лабораторных экспериментов, которые направлены на исследование пространственновременных закономерностей развития актов проскальзывания на разломах с различной конфигурацией асперити. Судя по полученным результатам, оказывается возможным выявить статистические различия в закономерностях акустической эмиссии (АЭ), локализованных на отдельных асперити на различных стадиях эволюции модельного разлома.

### МЕТОДИКА

Эксперименты проводились на установке двухосного нагружения RAMA [Кочарян и др., 2022], включающей два контактирующих блока,

которые под действием нормального ( $\sigma_n$ ) и сдвигового ( $\tau$ ) усилий сдвигаются друг относительно друга (рис. 1). Нормальное давление создавалось 4 домкратами и составляло 2 МПа, сдвиговое усилие прикладывалось к подвижному блоку одним домкратом, шток которого двигался с постоянной скоростью  $u_s$ .

Контакт между подвижным B1 (Д×В×Ш):  $(750 \times 175 \times 120 \text{ мм}^3)$  и неподвижным *B*2 (800 × 175 × 120 мм<sup>3</sup>) блоками представляет собой зону скольжения (интерфейс) модельного разлома. На интерфейсе были сформированы участки повышенной прочности А (лабораторный аналог асперити), представляющие собой зоны круглой или овальной формы, выполненные из цементно-песчаной смеси. Асперити имели прочный контакт с поверхностями блоков. Остальная площадь интерфейса модельного разлома была выполнена фторопластом толщиной 4 мм. Подробно процесс создания асперити на модельном разломе описан в работе [Гридин и др., 2023]. В ходе экспериментов изменялось расстояние между асперити. Были рассмотрены 5 конфигураций: "сдвоенный асперити", представляющий собой зону овальной формы с большими полуосями 200 и 100 мм, а также два круглых асперити диаметром 100 мм на расстояниях 4, 23, 58, и 300 мм друг от друга.

В ходе экспериментов относительное смещение блоков измерялось с точностью 0.3 мкм системой из 4 лазерных датчиков перемещения (в диапазоне частот 0-5 кГц). Лазерные датчики (D1-D4) были установлены на подвижном блоке (B1), а мишени — на неподвижном блоке. Распределение датчиков смещения вдоль модельного разлома позволяло контролировать относительное перемещение блоков на концах модельного разлома и в зонах асперити. Реги-



**Рис.** 1. Схема экспериментальной установки RAMA: *B*1, *B*2 — подвижный и неподвижный блоки; *D*1–*D*4 — лазерные датчики перемещения; *V* — датчик АЭ; *A* — асперити; *d* — расстояние между асперити.

страция упругих колебаний, сопровождающих эволюцию модельного разлома, велась шестью датчиками акустической эмиссии (V) Vallen Systeme VS30-V (рабочий диапазон частот 20-80 кГц) с предусилителями Vallen Systeme AEP5 с усилением 34 дБ. Датчики АЭ (V) располагались на верхней и нижней поверхностях неподвижного блока *B*2. Все датчики крепились на поверхности блоков на парафиновую смазку, обеспечивающую удовлетворительный акустический контакт. Частота дискретизации регистрируемого сигнала составляла 1 МГц.

Детектирование импульсов АЭ (определение момента вступления и окончания) проводилось с использованием метода STA/LTA [Allen, 1978]. Далее выполнялось уточнение времени первого вступления с помощью информационного критерия Акаике [Carpinteri et al., 2012]. В двухинтервальной модели AIC сигнала рассчитывался в скользящем окне 2 мс согласно следующему выражению:

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

где: N — длина окна; k — момент, разделяющий окно на два интервала; S — дисперсия. Момент времени, при котором величина AIC принимает минимальное значение, интерпретируется как момент вступления волны.

Для каждого зарегистрированного импульса АЭ определялись амплитуда ( $A_s$ ), длительность, энергия и координаты источника. Координаты определялись по разнице прихода волны на датчики методом невязки на сетке размером  $1 \times 1$  мм<sup>2</sup>. Невязка рассчитывалась по формуле:

$$N = \sum \left( dt_{ij} - DT_{ij} \right)^2, i, j = 1, 2, 3, 4,$$
 (2)

где:  $dt_{ij}$  — рассчитанная разность времен прихода на датчики;  $DT_{ij}$  — измеренная разность времен прихода на датчики; i,j — номера датчиков в группе, по которой проводилась локация импульсов. Локация выполнялась по группам из 4 датчиков, после чего все события, лоцированные каждой группой, объединялись в единый каталог. Погрешность определения координат составляла 20 мм. Скорость распространения волны была определена независимо ультразвуковым методом и равнялась 6530 м/с. На рис. 2 показаны временные вариации сигнала АЭ,



**Рис. 2.** Пример локации импульса АЭ. Представлены записи АЭ на разных расстояниях от источника. Времена вступления показаны желтыми звездочками.

пришедшего на различные датчики АЭ в зависимости от расстояния до источника импульса, а также результаты детектирования импульса согласно критерию AIC (соотношение 1).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 представлен пример параметров эволюции модельного разлома, на интерфейсе которого сформированы два асперити. Начальная стадия эволюции идентична для всех проведенных экспериментов — наблюдается линейный рост сдвигового усилия почти пропорционально времени (до  $t \sim 40$  с). При достижении сдвигового усилия порядка 60-65% от предела прочности наблюдается снижение скорости нарастания сдвигового усилия. По мере нагружения начинают отчетливо проявляться зоны локализации асперити, на которых фиксируются наиболее низкие смещения (оранжевая и зеленая кривые на рис. 3б), и при напряжениях, близких к предельным, дефицит достигает 3 мкм. На заключительной стадии эволюции происходит резкий сброс сдвигового усилия и наблюдается один или последовательность двух независимых актов проскальзывания (АП). В качестве АП рассматривается интервал времени, при котором скорость смещения берегов разлома превышает скорость выдвижения штока домкрата (скорость нагружения). В проведенных экспериментах инициирование актов проскальзывания обусловлено разрушением асперити, и первым разрушалось пятно, ближнее к домкрату (пятно



**Рис. 3.** Результаты регистрации процесса деформирования модельного разлома с двумя асперити: (a) — зависимость сдвигового усилия от времени; (б) — зависимость межблокового перемещения от времени (цвета линий соответствуют цветам лазерных датчиков перемещения D на рис.1); (в) — запись сигнала АЭ. На врезках представлен участок, соответствующий заключительному двухсекундному интервалу нагружения.

слева, которому соответствует оранжевая линия на рис. 3б). Разрушением зоны асперити в данном случае называется отрыв асперити от одного из блоков.

Конфигурация асперити модельного разлома фактически предопределяет закономерности реализации АП. При конфигурации асперити "овал" (d = 0 мм) и при расстоянии между асперити d = 4 мм наблюдался один АП. При расстоянии между асперити более 5 мм фиксируются два АП. Параметры АП представлены в таблице. При реализации двух АП первым является медленное событие. Скорость смещения при втором событии примерно на порядок выше.

В процессе нагружения регистрировалось большое количество импульсов АЭ. Результаты локации импульсов, сопровождающих процесс эволюции модельного разлома, представлены на рис. 4. Излучение импульсов АЭ происходит по всей площади интерфейса на протяжении всего процесса нагружения, при этом импульсы с наибольшей амплитудой фиксируются в зонах локализации асперити. Статистика импульсов АЭ описывается законом повторяемости Гутенберга–Рихтера [Gutenberg, Richter, 1944]:

$$\lg N = a - b \cdot \lg(A_s), \tag{3}$$

где N — число импульсов с амплитудой меньше  $A_s$ ; a, b — положительные константы. Параметр *b-value*, определяющий наклон графика повторяемости, является скейлинговым параметром системы [Turcotte, 1999].

Конфигурация интерфейса модельного разлома определяет закономерности реализации АП. Пространственное распределение импульсов АЭ позволяет выявлять структурные особенности интерфейса. На рис. 5 представлена плотность распределения импульсов АЭ в плоскости разлома. В случае, когда интерфейс выполнен только из фторопласта (рис. 5а), выявляются отдельные ячейки локализации импульсов АЭ. Учитывая отсутствие очевидных

#### МОРОЗОВА и др.

| <i>d</i> , мм | <i>V</i> <sub>max</sub> , мм/с | <i>W</i> , мкм | Dt, c   |
|---------------|--------------------------------|----------------|---------|
| 0             | 65                             | 140            | _       |
| 4             | 60                             | 110            | _       |
| 23            | 0.2 / 24                       | 2.5 / 25       | 0.050.5 |
| 58            | 0.2 / 20                       | 2.0 / 20       | 0.051   |
| 300           | 1 / 10                         | 5 / 20         | 212     |

Параметры актов проскальзывания при различных расстояниях между асперити

Примечания:  $V_{max}$  — максимальная скорость относительного смещения берегов разлома, W — средняя амплитуда смещения при АП, Dt — временная задержка между АП (диапазон изменения). При реализации двух АП их параметры указаны через " / ".



**Рис. 4.** Локализация зарегистрированных импульсов АЭ (а); и закон повторяемости Гутенберга–Рихтера (б). Модельный разлом содержал два асперити, расположенных на расстоянии 23 мм. Размер и цвет круга соответствуют амплитуде импульса АЭ (а); статистика АЭ описывается соотношением  $\lg N = 3.1 - 1.53 \lg A_c$ (б).

источников АЭ, это может указывать на особенности подготовки модельного разлома, когда достаточно сложно проконтролировать чистоту фторопласта по всей площади интерфейса. При наличии асперити наблюдается сильная пространственная неоднородность локализации источников АЭ, которые концентрируются не только на участках локализации асперити или в их окрестности. В этой связи наибольшую информативность дает рассмотрение распределения импульсов вдоль простирания разлома (ось ОХ). Для конфигурации "овал" (рис. 5б) наблюдается увеличение плотности очагов в зоне асперити с относительным повышением к правому краю. Для конфигураций с двумя асперити наблюдается различие в распределении импульсов вдоль разлома. Если при расстоянии 4 мм наблюдается фактически один широкий максимум, то при расстояниях 23 мм и более наблюдаются два максимума. При этом расстояние между максимумами увеличивается по мере увеличения расстояния между асперити.

Импульсы АЭ инициируются на каждом из асперити в течение всего цикла нагружения,

при этом имеются различия в статистике Гутенберга-Рихтера при различных конфигурациях интерфейса и закономерностях реализации АП. В случае, когда фиксируется один АП, *b-value* совпадают для ансамблей импульсов АЭ, локализованных в окрестности левого (ближнего к домкрату нагружаемому торцу) и правого асперити. В случае двух АП статистика импульсов АЭ показывает существенное отличие, а именно для левого асперити *b-value* на 0.2–0.3 меньше, чем для правого. Разрушение левого асперити (первого по очереди) приводит к инициированию АП с низкой скоростью относительного смешения берегов (таблица), которое не сопровождается какой-либо аномалией сигналов АЭ. После разрушения в зоне локализации левого асперити излучаются импульсы существенно меньшей амплитуды, в то время как для импульсов АЭ из зоны локализации правого асперити максимальная амплитуда не изменяется (рис. 6).

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Установление взаимосвязей между режимами скольжения тектонических разломов



**Рис. 5.** Пространственное распределение импульсов АЭ в плоскости скольжения при различных конфигурациях интерфейса модельного разлома. Представлены случаи отсутствия асперити, когда интерфейс сложен слоем фторопласта (а) и когда расстояния между асперити составляют d = 0 мм (б); d = 4 мм (в); d = 23 мм (г); и d = 58 мм (д). Градации серого соответствуют количеству импульсов в ячейке, нормированному на общее их количество. Вдоль верхней границы пространственного распределения показана относительная линейная плотность очагов вдоль плоскости разлома.

и закономерностями излучения сейсмических и акустических импульсов является необходимым для создания методов пассивного контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) тектонических разломов и определения возможного момента инициирования динамических подвижек по разлому. В природе корреляционные связи могут быть выявлены на основе проведения синхронных геодезических и сейсмологических наблюдений [Frank et al., 2016; Vorobieva et al., 2016]. В то время как простейшая модель сейсмического цикла включает только быстрые подвижки, в большинстве случаев модель эволюции должна включать как быстрые, так и медленные режимы скольжения [Гридин и др., 2023]. Структура тектонического разлома оказывает большое влияние на развитие скольжения, и, как показывают лабораторные эксперименты [Corbi et al., 2017], расстояние между асперити является одним из ключевых

ФИЗИКА ЗЕМЛИ № 2 2025



**Рис. 6**. Временные вариации амплитуды (а) и закон повторяемости Гутенберга–Рихтера (б) импульсов АЭ на финальной стадии нагружения модельного разлома, содержащего два асперити, расположенных на расстоянии 300 мм. Оранжевый цвет — импульсы, локализованные в зоне левого асперити, которое расположено ближе к нагружаемому торцу и которое разрушается первым. Зеленый — импульсы, локализованные в зоне правого пятна. Стрелками отмечены моменты актов проскальзывания, сплошные линии — границы интервалов (длительность 12 с), для которых представлена статистика в (б). Кругами обозначены импульсы, излученные в течение 12 с перед первым АП, ромбами — между первым и вторым АП.

параметров, определяющих закономерности сброса накопленных напряжений.

Проведенные эксперименты показали, что пространственный анализ закономерностей локализации импульсов АЭ позволяет выявлять структурные особенности интерфейса разлома. Асперити проявляются как области повышенной плотности количества импульсов, что указывает на то, что они являются активно излучающими областями интерфейса [Ostapchuk et al., 2022; Беседина и др., 2025]. При этом разрушение асперити не обязательно будет сопровождаться излучением высокоамплитудных импульсов. В природе низкая амплитуда медленных событий делает задачу их детектирования в данных геодезического и сейсмологического мониторинга чрезвычайно сложной.

Тектонические напряжения реализуются посредством как быстрых, так и медленных режимов скольжения, которые могут иметь место на одном и том же сегменте разлома [Veedu, Barbot, 2016]. Существующие системы мониторинга не всегда могут надежно детектировать медленные режимы скольжения, что является важным условием корректной оценки напряженно-деформированного состояния разлома. Как можно заключить из данных, представленных на рис. 6, в качестве индикатора медленных подвижек может выступать изменение статистики импульсов АЭ. После медленного проскальзывания резко снижается амплитуда импульсов, излучаемых из зоны разрушенного пятна, то есть статистика форшоков имеет существенно более низкую величину *b-value*, чем статистика афтершоков. Изменения величины *b*-value надежно фиксируются при крупных землетрясениях [Gulia, Wiemer, 2019], что нельзя сказать о медленных событиях. В отсутствие выраженного основного толчка изменение b-value не рассматривается как индикатор медленного основного события. Возможен ли такой сценарий в природе? Если разлом содержит два асперити, то, как показывают описанные в этой статье эксперименты, подготовка быстрой подвижки (в природе — крупного землетрясения) при анализе сейсмических данных будет сопровождаться резким снижением доли высокоамплитудных импульсов (рис. 6а), что в природе ассоциируется с сейсмическим затишьем [Соболев, 1993; Wyss et al., 2004]. Однако если задержка между медленной и быстрой подвижками будет достаточно короткой (таблица), то затишье не будет зарегистрировано.

Представленные в настоящей работе результаты показывают важность понимания структурных особенностей тектонических разломов и корректной интерпретации наблюдений. Анализ и интерпретация сейсмологических данных должны осуществляться на основе построения физически корректной структурной модели объекта, что в свою очередь дает возможность численного моделирования процесса эволюции тектонического разлома.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-77-10087).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Беседина А.Н., Новикова Е.В., Белоклоков П.В. и др. Особенности зон локализации сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги // Физика Земли. 2025. № 2. С. 19–35.

Гридин Г.А., Кочарян Г.Г., Морозова К.Г., Новикова Е.В., Остапчук А.А., Павлов Д.В. Развитие процесса скольжения по гетерогенному разлому. Крупномасштабный лабораторный эксперимент // Физика Земли. 2023. № 3. С. 139–147.

*Кочарян Г.Г.* Геомеханика разломов. М.: ГЕОС. 2016. 424 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., Остапчук А.А., Павлов Д.В., Гридин Г.А., Морозова К.Г., Нопдwen Ј., Пантелеев И.А. Лабораторные исследования закономерностей фрикционного взаимодействия блоков скальной породы метрового масштаба. Методика и первые результаты // Физика Земли. 2022. № 6. С. 162–174.

Соболев Г.А. Физические основы прогноза землетрясений. М.: Наука. 1993. 314 с.

*Соболев Г.А.*, *Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.

*Allen R.* Automatic earthquake recognition and timing from single traces // Bull. Seismol. Soc. Am. 1978. V. 68. P. 1521–1532.

*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. 2021.

https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116652.

*Collettini C., Tesei 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

Corbi F., Funiciello F., Brizzi S., Lallemand S., Rosenau M. Control of asperities size and spacing on seismic

ФИЗИКА ЗЕМЛИ № 2 2025

behavior of subduction mega thrusts // Geophys. Res. Lett. 2017.V. 44. P. 8227–8235.

https://doi.org/10.1002/2017GL074182

*Dublanchet P., Bernard P., Favreau P.* Interactions and triggering in a 3-D rate-and-state asperity model // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2013. V. 118. P. 2225–2245, https://doi.org/10.1002/jgrb.50187

*Fagereng Å., Beall A.* Is complex fault zone behaviour a reflection of rheological heterogeneity? // Phil.Trans.R.Soc. 2021. A 379: 20190421.

https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0421

Frank W., Shapiro N. M., Husker A., Kostoglodov V., Gusev A.A., Campillo M. The evolving interaction of low-frequency earthquakes during transient slip // Science Advances. 2016. V. 2.  $\mathbb{N}$  4. P. e1501616.

https://doi.org/10.1126/sciadv.1501616

*Gounon A., Latour S., Letort J., ElArem S.* Rupture nucleation on a periodically heterogeneous interface // Geophysical Research Letters. 2022. V. 49. P. e2021GL096816.

https://doi.org/10.1029/2021GL096816.

*Gulia L., Wiemer S.* Real-time discrimination of earthquake foreshocks and aftershocks // Nature. 2019. V. 574. P. 193–199. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1606-4

*Gutenberg*, *B.* & *Richter*, *C. F.* Frequency of earthquakes in California // Bull. Seismol. Soc. Am. 1944. V. 34. P.185–188.

Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V. Fault Sliding Modes — Governing, Evolution and Transformation. Multiscale Biomechanics and Tribology of Inorganic and Organic Systems / Ostermeyer G.P., Popov V.L., Shilko E.V., Vasiljeva O.S. (eds.). Cham.: Springer. 2021. P. 323–358.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-60124-9\_15

*Ostapchuk A, Polyatykin V, Popov M, Kocharyan G*. Seismogenic patches in a tectonic fault interface // Front. Earth Sci. 2022. V. 10. P. 904814.

https://doi.org/10.3389/feart.2022.904814

*Peng Z., Gomberg J.* An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena // Nature Geoscience. 2010. V. 3.  $N_{9}$  9. P. 599–607.

https://doi.org/10.1038/ngeo940

*Turcotte D.L.* Self-organized criticality // Rep. Prog. Phys. 1999. V. 62. P. 1377.

https://doi.org/10.1088/0034-4885/62/10/201

*Veedu D. M., Barbor S.* The Parkfield tremors reveal slow and fast ruptures on the same asperity // Nature. 2016. V. 532. P. 361–365.

https://doi.org/10.1038/nature17190

*Vorobieva I., Shebalin P., Narteau C.* Break of slope in earthquake size distribution and creep rate along the San Andreas Fault system // Geophysical Research Letters. 2016. V. 43. P. 6869–6875.

#### https://doi.org/10.1002/2016GL069636

*Wyss M.*, *Sobolev G.*, *Clippard J.D.* Seismic quiescence precursors to two M7 earthquakes on Sakhalin Island, measured by two methods // Earth Planet Sp. 2004. V. 56 Pp. 725–740, 554, 116652.

### МОРОЗОВА и др.

## Acoustic Emission Accompanying Preparation of Dynamic Slip on a Model Heterogeneous Fault of Meter Scale

### K. G. Morozova<sup>*a*, \*</sup>, D. V. Pavlov<sup>*a*</sup>, and A. A. Ostapchuk<sup>*a*</sup>

<sup>a</sup>Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia \*e-mail: morozova.kg@idg.ras.ru

Received November 25, 2024; revised November 27, 2024; accepted December 25, 2024

**Abstract** — Regularities in distribution of tectonic fault sections with different frictional properties control to a great extent the dynamics of fault sliding. The impossibility of directly studying the structure of fault zones at seismogenic depths makes it especially important to develop diagnostic methods that would provide information on the structural features of earthquake sources formation areas and, thereby, predict the sliding dynamics.

This work presents results of laboratory experiments directed to studying regularities of elastic wave emission during shear deformation of a model fault with a spatially inhomogeneous structure of the sliding interface. The model fault was a loaded contact of diabase blocks  $750 \times 120 \text{ mm}^2$  in size. Two round zones, each 100 mm in diameter, were made at the interface. Those zones had high strength showing the property of velocity weakening, the so-called asperities. The relative position of asperities changed in experiments.

The process of dynamic slip formation, caused by asperity disruption, was accompanied by emission of a great number of acoustic pulses that were recorded in the frequency range of 20–80 kHz. During the experiments, the data on spatial distribution of pulses allow to detect two separate contact regions only when the distance between these regions exceeded 20 mm. Differences in the statistics of pulses emitted at different asperities were observed.

Keywords: tectonic fault, asperity, acoustic emission, slow slip, spatio-temporal analysis, laboratory experiment