

УДК 550.34;539.37

РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССА СКОЛЬЖЕНИЯ ПО ГЕТЕРОГЕННОМУ РАЗЛОМУ. КРУПНОМАСШТАБНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

© 2023 г. Г. А. Гридин¹, Г. Г. Кочарян¹, К. Г. Морозова¹, Е. В. Новикова¹,
А. А. Остапчук^{1, *}, Д. В. Павлов¹

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

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

Поступила в редакцию 11.10.2022 г.

После доработки 17.11.2022 г.

Принята к публикации 09.12.2022 г.

Созданная в ИДГ РАН установка для исследования процесса сдвига по контакту между блоками горной породы метрового размера использована для изучения деформационных процессов на разломе с гетерогенной структурой поверхности скольжения, содержащей прочные контактные области – аналоги зон “*asperity*” в известной модели Х. Канамори [Kanamori, Stewart, 1978]. Показано, что при реализации крупной подвижки, которая начинается в зоне максимального дефицита межблокового смещения, происходит разрыв тех областей разлома, эффективная прочность которых снижена предыдущими деформационными событиями. При этом эти, более ранние, события могут быть “медленными” подвижками, имеющими низкую сейсмическую эффективность. В природе события, “подготавливающие” поверхность разлома к крупной подвижке, могут быть зарегистрированы в виде более слабых землетрясений – форшоков, либо являться низкочастотными землетрясениями или событиями медленного скольжения, слабо проявляющимися на сейсмических записях. В этой связи перспективным диагностическим признаком подготовки крупной подвижки является эффект смещения спектра сейсмического шума в сторону более низких частот, вызванного снижением жесткости разлома.

Ключевые слова: тектонический разлом, медленные землетрясения, динамический разрыв, излучательная эффективность, лабораторный эксперимент.

DOI: 10.31857/S0002333723030043, **EDN:** JZVXSK

ВВЕДЕНИЕ

Открытие и систематизация разных типов скольжения по разломам земной коры явились значимым достижением в науках о Земле двух последних десятилетий [Peng, Gombert, 2010; Кочарян, 2021]. Было установлено, что деформационные события формируют единый ряд, объединяющий процессы разной динамики – от крипа до разрушительных землетрясений. Различные моды скольжения реализуются практически во всем диапазоне глубин земной коры [Bürgmann, 2018].

Поиск физических механизмов, обуславливающих возникновение и развитие событий скольжения различного типа, является одной из наиболее актуальных задач сейсмологии и механики очага землетрясения. Несмотря на то, что процессы подготовки крупного землетрясения охватывают обширные области коры [Добровольский, 1991], сам процесс скольжения сильно локализован в пространстве [Sibson, 2003]. Момент возникновения динамического срыва определяется, в значительной степени, локальными процессами

ми в области будущего разрыва, которые практически недоступны для прямого наблюдения [Gombert, 2018]. В этой связи важную роль в получении новых сведений об условиях возникновения и развития динамических эпизодов скольжения по разломам играют лабораторные эксперименты. Несмотря на то, что условия проведения лабораторных опытов далеки от условий сейсмогенных глубин, подобные работы могут дать ценную информацию, если их рассматривать не как форму масштабного моделирования, а как исследование отдельных составляющих процессов, гипотетически происходящих в природе. Анализ показывает, что увеличение давления и температуры до значений, характерных для сейсмогенных глубин, не приводит к появлению принципиально новых черт в поведении динамической системы “блочный массив–разлом” на стадии подготовки динамического срыва [Кочарян, Батухтин, 2018], чего нельзя сказать о заключительных фазах скольжения, где в ряде случаев играют важную роль, например, эффекты снижения трения из-за физико-химических преобразований

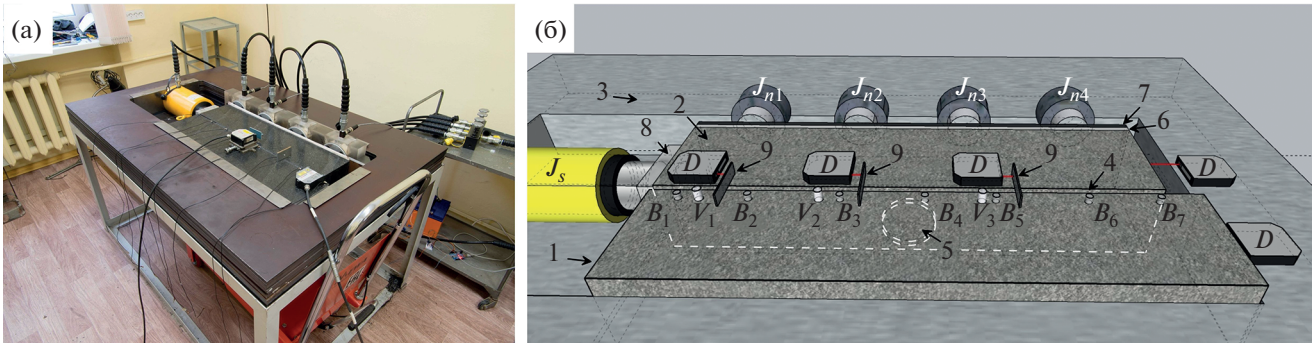


Рис. 1. Экспериментальный стенд RAMA: (а) — общий вид установки; (б) — схема установки (вид сверху). Представлена конфигурация установки в эксперименте с одним “асперити”: 1 — неподвижный блок; 2 — подвижный блок; 3 — стальная рама; 4 — лист фторопласта между скальными блоками; 5 — модельный “асперити”; 6 — интерфейс низкого трения; 7 — стальная пластина; 8 — дюралевые упоры; 9 — мишени датчиков перемещения; J_n , J_s — домкраты, создающие нормальное и сдвиговое усилие; D — лазерные датчики перемещения; B — акселерометры; V — датчики акустической эмиссии.

поверхности скольжения на микро- и наноуровне, плавление и ряд других процессов.

Одной из задач лабораторного моделирования является установление общих закономерностей изменения макроскопических параметров, контролирующих деформационный процесс. Дополнительные возможности для экспериментатора предоставляет использование установок метрового масштаба, размеры которых позволяют провести детальные исследования пространственно-временных закономерностей развития процесса скольжения. Созданная недавно в ИДГ РАН подобная установка [Кочарян и др., 2022] использована в настоящей работе для исследования процесса развития деформационного процесса на разломе с гетерогенной поверхностью, содержащей отдельные контактные области — “асперити”-аналоги зон *asperity* в модели, предложенной в работе [Kanamori, Stewart, 1978].

МЕТОДИКА

Экспериментальный стенд RAMA представлен на рис. 1. Основу экспериментальной установки составляют два блока из диабазы размером (Д × Ш × В): $800 \times 175 \times 120 \text{ мм}^3$ (неподвижный, блок 1) и $750 \times 175 \times 120 \text{ мм}^3$ (подвижный, блок 2). Вертикальный контакт шероховатых поверхностей блоков представляет собой модельный разлом. Размер поверхности скольжения модельного разлома $750 \times 120 \text{ мм}^2$. Амплитуда шероховатости около 100 мкм. Блоки помещаются внутрь стальной рамы 3 (рис. 1).

Внутри рамы четыре домкрата $J_{n1}-J_{n4}$ (КВТ ДН50П16, максимальное усилие 50 т, ход штока 16 мм, диаметр поршня 70 мм) создают нормальное усилие на поверхности скольжения модельного разлома. Давление в домкратах J_n создается

гидравлической помпой КВТ ПМН-7012 (максимальное давление 700 бар) через распределительный гидравлический кран (один вход от насоса, четыре выхода на домкраты). Один домкрат J_s (ТОР ДУ ННУУ 100150, максимальное усилие 100 т, ход штока 150 мм, диаметр поршня 90 мм) создает сдвиговое усилие, которое прикладывается к подвижному блоку 2. Давление в домкрате J_s создается насосной станцией (ООО “Гидросфера”), которая позволяет создавать постоянную скорость выдвигания штока в диапазоне от 0.03 до 0.45 мм/с. Для создания равномерного распределения нормального усилия на поверхности скольжения под домкраты J_n вставлена стальная пластина 7 (толщина 10 мм); для уменьшения паразитных сдвиговых напряжений между плитой и подвижным блоком 2 помещены два листа фторопласта 6.

В описываемой серии экспериментов исследовались закономерности развития событий скольжения на модельных разломах метрового масштаба с пространственно-неоднородной структурой. На бортах модельного разлома были сформированы 1, 2 или 3 контактные области (участки повышенной прочности или “асперити”), представляющие собой зоны круглой формы, выполненные из песчано-цементной смеси и имеющие прочный контакт с бортами модельного разлома. Расстояние между “асперити” превышает их характерный размер. В проведенных экспериментах события скольжения были инициированы разрушением этих областей.

Создание модельных “асперити” включало несколько этапов. На первом этапе в промежуток между блоками вставлялся лист фторопласта 4 толщиной 4 мм, и домкратами J_n создавалось нормальное напряжение 24 кПа. В середине фторопластового листа были вырезаны круги диаметром

100 мм, для создания определенной конфигурации модельных “асперити” (рис. 2).

Затем пустоты в листе фторопласта заполнялись песчано-цементной смесью (смесь цемента, песка и воды в соотношении 1 : 1 : 0.4 по массе). По окончании заполнения зон “асперити” сверху отверстие закрывалось куском фторопласта, так, чтобы бетонное пятно после затвердевания имело правильную круглую форму. Далее для формирования конфигурации “асперити” нормальное напряжение на модельном разломе повышалось до 2 МПа. Образец оставлялся под нагрузкой в течение примерно 18 ч, что являлось оптимальным минимальным временем для создания “асперити” с высокой прочностью.

По истечении 18 ч на модельном разломе домкратами J_n создавалось нормальное давление в диапазоне от 0.2 до 0.4 МПа. Затем включалась насосная станция и плунжер домкрата J_s начинал двигаться с постоянной скоростью. В ходе экспериментов относительное перемещение бортов разлома измерялось с точностью 0.3 мкм системой из 5 лазерных датчиков перемещения (в диапазоне частот 0–5 кГц). Относительное перемещение бортов разлома контролировалось в окрестности контактных пятен, а также на концах модельного разлома. Лазерные датчики (D , рис. 1б) приклеивались на подвижном блоке, а мишени датчиков (9, рис. 1б) на неподвижном. Для регистрации упругих колебаний, излучаемых в процессе экспериментов, на свободной поверхности вдоль линии разлома была установлена система из 7 синхронизированных датчиков ускорения Bruel & Kjaer 4344 (рабочий диапазон частот 0–10 кГц) и 3 датчиков акустической эмиссии Vallen Systeme VS30-V (рабочий диапазон частот 20–80 кГц) с предусилителями Vallen Systeme АЕР5 с усилением 34 дБ. Все датчики крепились на поверхности блоков на парафиновую смазку, обеспечивающую удовлетворительный акустический контакт.

Для распознавания акустических импульсов (АИ) в регистрируемом сигнале был использован энергетический критерий – поток энергии должен превысить определенный пороговый уровень в соответствии с соотношением:

$$\pi(t) = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} A(t)^2 dt \geq \pi_{\min}, \quad (1)$$

где π_{\min} – пороговый уровень акустической эмиссии; $\Delta t = 0.5$ мс.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 представлены зависимости удельного усилия $\hat{\sigma}_s$ и относительного смещения блоков от времени. Удельное усилие рассчитывается как

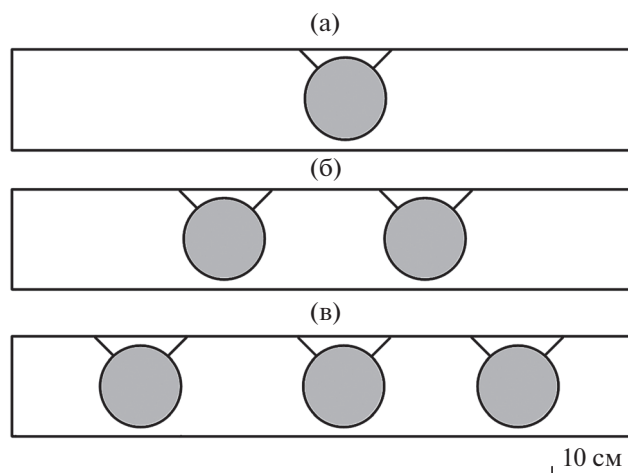


Рис. 2. Конфигурация межблокового контакта в экспериментах с одним (а), двумя (б) и тремя (в) контактными областями. Серые круги – модельные “асперити”.

сдвиговое усилие, нормированное на величину площади поверхности скольжения $75 \times 12 = 900 \text{ см}^2$. Следует иметь в виду, что поскольку площадь “асперити” диаметром 10 см составляет 78.5 см^2 , то действительный уровень сдвиговых напряжений в зоне контакта значительно выше величины удельного усилия $\hat{\sigma}_s$.

После выбора всех люфтов усилие увеличивается пропорционально времени. На начальном участке скорость увеличения составляет 4.2 кПа/с. Конфигурация межблокового контакта, имеющего участок повышенной прочности, обуславливает особенности накопления межблоковых перемещений. На рис. 3в можно видеть, что в окрестности “асперити” смещение бортов происходит с существенно более низкой скоростью, чем до и после него. В окрестности “асперити” формируется “запертый участок” модельного разлома, на котором накапливается дефицит межсейсмической деформации. На заключительном этапе (рис. 3г), начиная с $t \sim 112.1$ с, скорость деформации в окрестности “асперити” (датчик относительного перемещения $D2$) начинает резко возрастать. К этому времени дефицит перемещения достигает величины около 4 мкм (рис. 3б, врезка). Датчик перемещения, расположенный в зоне “асперити”, четко демонстрирует предсейсмический криз с нарастающей скоростью. Если в интервале $t \sim 100$ –110 с скорость смещения в окрестности “асперити” составляла 0.08–0.10 мкм/с, то в течение последних 2 с скорость деформации возросла более чем на два порядка и в интервале $t \sim 112.6$ –112.8 с, непосредственно перед срывом уже достигла величины ~ 20 –30 мкм/с. После разрушения “асперити” блок движется как единое целое.

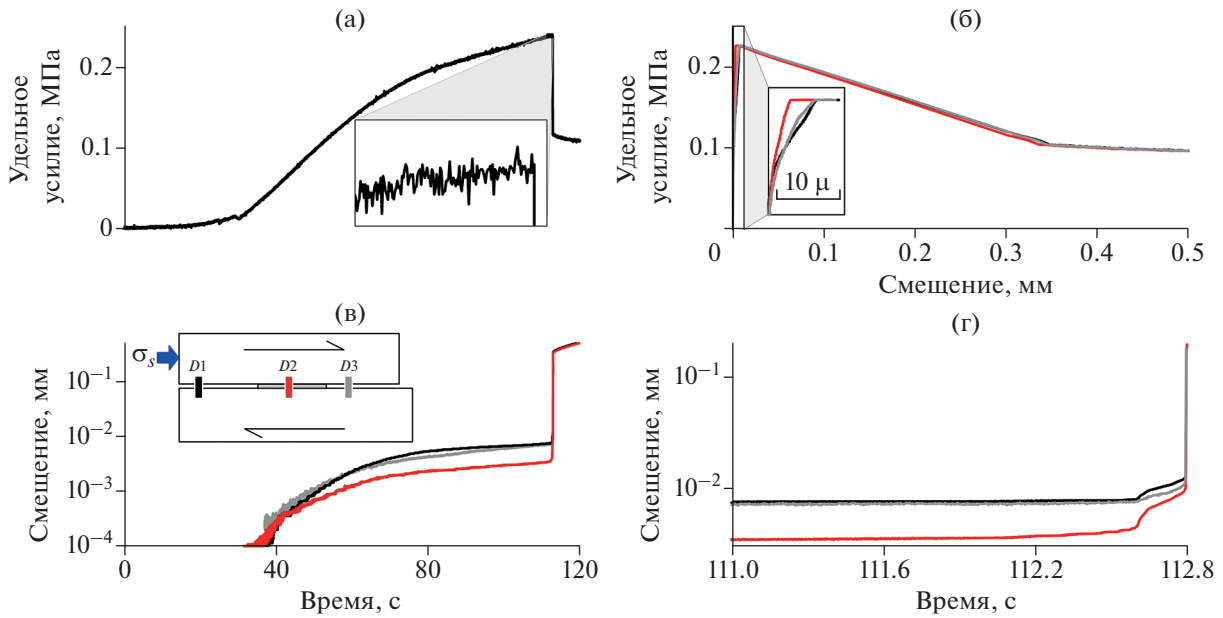


Рис. 3. Закономерности деформирования модельного разлома с 1 контактной областью (эксперимент № 15/07/2022). Нормальное усилие составляет 0.36 МПа. Момент срыва – 112.8 с: (а) – зависимость удельного усилия от времени. Врезка соответствует заключительной стадии нагружения длительностью 2 с, высота врезки – 5 кПа; (б) – зависимость удельного усилия от относительного смещения блоков. На врезке представлен участок, соответствующий заключительной стадии нагружения длительностью 2 с; (в) – зависимость межблокового перемещения от времени. Цвет линий соответствует расположению лазерных датчиков D1–D3, представленных на врезке; (г) – зависимость относительного смещения блоков от времени на заключительной стадии нагружения модельного разрыва.

Записи датчиков относительного перемещения становятся идентичными (рис. 3в).

На реологической зависимости удельное усилие–перемещение (рис. 3б) хорошо видно, что

удельная жесткость ($k = d\hat{\sigma}_s/dD$, D – относительное смещение бортов разлома) запертого участка заметно выше, чем в областях до и после “асперити”. По мере приближения к моменту срыва, жесткость запертого участка снижается с $k = 150$ МПа/мм до $k = 35$ МПа/мм перед срывом. Напомним, что к абсолютным значениям жесткости следует относиться с осторожностью, поскольку, как отмечалось выше, действительное значение сдвиговых напряжений отличается от используемой величины удельного усилия.

Процесс нагружения модельного разлома сопровождается излучением АИ. На стадии подготовки срыва колебания регистрируются только в частотном диапазоне свыше 20 кГц, а в низкочастотной области импульсы отсутствуют. На рис. 4 представлены вариации активности и кумулятивного числа АИ в процессе нагружения. В ходе эксперимента были распознаны АИ с амплитудой более 55 дБ. АИ такой амплитуды излучались при сдвиговом усилии, превышающем 30–40% от предельного величины $\hat{\sigma}_{s_max}$. В ходе нагружения наблюдается немонотонный рост активности АЭ, которая достигает максимальных величин непосредственно перед срывом. После срыва активность АЭ резко снижается.

Необходимо подчеркнуть, что в отличие от стадии подготовки разрыва, в процессе разруше-

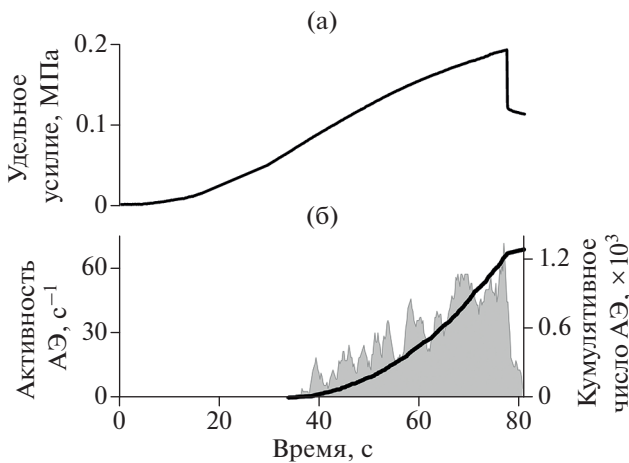


Рис. 4. Акустическая эмиссия при сдвиговом деформировании модельного разлома с одним “асперити” (эксперимент № 13/07/22). Нормальное усилие составляет 0.23 МПа: (а) – зависимость удельного усилия от времени. Момент срыва – 77.4 с; (б) – изменение активности (серый) и кумулятивного числа (черный) АИ от времени.

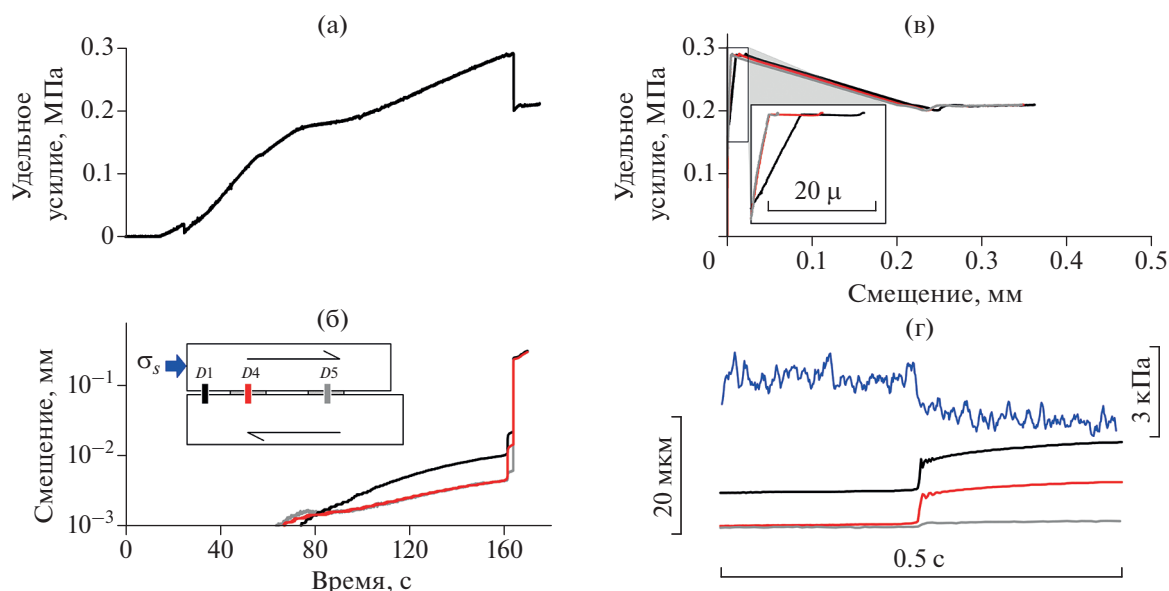


Рис. 5. Закономерности деформирования модельного разлома с 2 “асперити” (эксперимент № 16/08/2022). Нормальное усилие составляет 0.34 МПа. Моменты срывов – 161.6 с и 164.0 с: (а) – зависимость удельного усилия от времени; (б) – зависимость межблокового перемещения от времени. Цвет линий соответствует расположению лазерных датчиков $D1$, $D4$ и $D5$, представленных на врезке; (в) – зависимость удельное усилие – межблоковое перемещение. На врезке представлен участок, соответствующий подготовке и первому разрушению “асперити” $D4$; (г) – вариации удельного усилия и межблокового перемещения в процессе разрушения “асперити” $D4$.

ния модельных “асперити” и динамического проскальзывания вдоль блоков регистрируется излучение как высокочастотного диапазона, так и низкочастотные импульсы высокой интенсивности в диапазоне частот менее 10 кГц.

В экспериментах с нагружением модельного разлома, на поверхности скольжения которого расположено несколько контактных пятен, отчетливо проявляются особенности, связанные с последовательным разрушением каждого из них. Из-за небольших различий эффективной прочности “асперити” и вариаций нормальной и сдвиговой нагрузки, связанных с геометрией установки и конечным размером блоков, разрушение “асперити” происходит не одновременно. На рис. 5 представлены закономерности деформирования модельного разлома с двумя “асперити”.

До разрушения первого “асперити”, которое произошло в момент времени $t = 161.6$ с, ход нагружения (рис. 5) в целом аналогичен опытам с одним “асперити”. Датчики $D4$ и $D5$, расположенные в области локализации “асперити” (запертые участки), пишут практически идентично. К моменту первого разрыва дефицит смещения на запертых участках, по сравнению с датчиком $D1$ составил величину около 5 мкм. Перед разрушением первого “асперити” в его окрестности наблюдался характерный предсейсмический крип – скорость смещения увеличилась с 0.07 до 0.7 мкм/с. Косейсмическое перемещение, зарегистрированное датчиками $D1$ и $D4$, составило величину ~6 мкм,

а сброс удельного усилия ~1.5 кПа. Перемещение в окрестности второго “асперити” $D5$ было существенно меньше – около 1.5 мкм. После разрушения первого “асперити” дефицит перемещения на втором запертом участке $D5$ сильно возрос и достиг 7.5 мкм относительно $D4$ и 15 мкм относительно $D1$. Разрыв второго “асперити” произошел через 2.03 с после первого события. После этого записи всех датчиков перемещения стали идентичны, т.е. блок стал двигаться как единое целое.

Из графиков “удельное усилие – межблоковое перемещение” (рис. 5в) видно, что до момента разрушения первого “асперити” жесткость участков разлома почти не менялась. Для запертых участков, содержащих “асперити”, сдвиговая жесткость одинакова и составляет величину ~35–45 МПа/мм. На скользящем участке этот параметр существенно ниже ~13 МПа/мм. Насколько можно судить по коротким участкам нагружения разлома до второго срыва, после первого динамического события жесткость всех участков заметно снизилась. По грубой оценке, для участков $D1$, $D4$, $D5$ она составила, соответственно, ~2.4, 6 и 10 МПа/мм.

В условиях, когда в зоне межблокового контакта сформировано 3 “асперити”, закономерности изменения удельного усилия и межблокового перемещения аналогичны рассмотренным выше. Запертые участки разлома характеризуются более низкой скоростью относительного смещения его бортов, что приводит к накоплению дефицита пе-

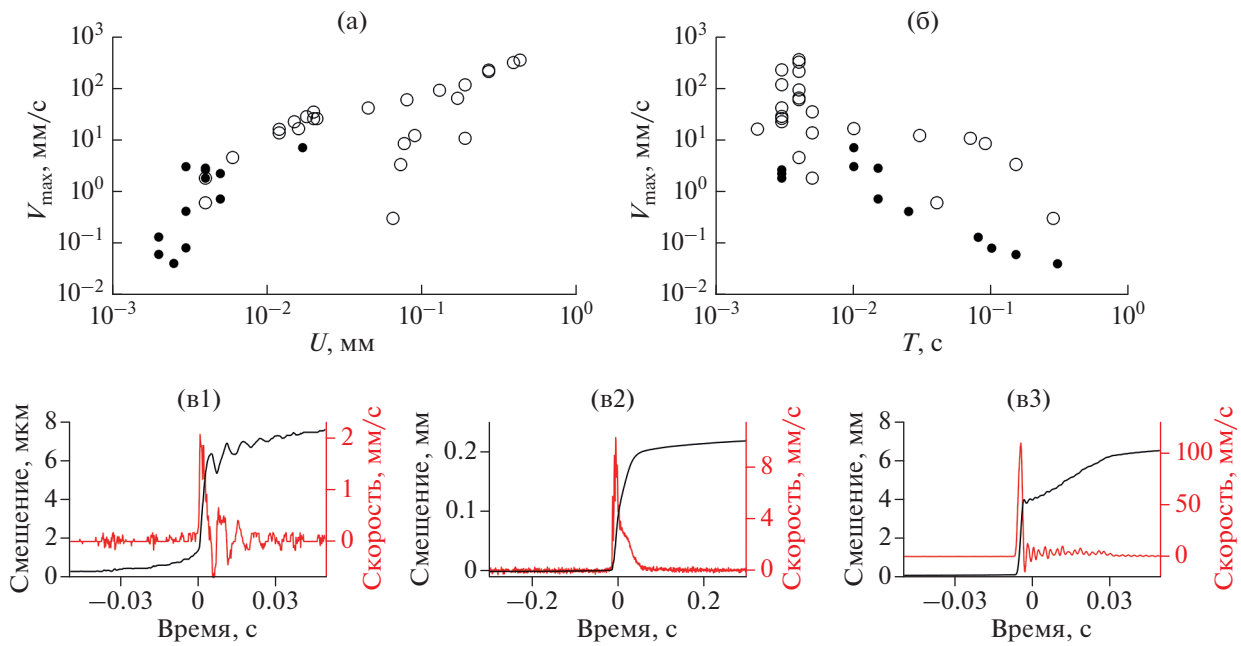


Рис. 6. Закономерность изменения параметров событий скольжения с локализованным (черные) и полным (белые) разрывом. Параметры определялись на участках локализации разрушенных “асперити”: (а) – зависимость максимальной скорости (V_{\max}) относительного смещения бортов от амплитуды (U) косейсмического смещения; (б) – зависимость максимальной скорости скольжения (V_{\max}) от длительности события (T); (в) – примеры изменения относительного смещения и скорости относительного смещения бортов разлома при различных динамических событиях. Параметры событий: (v1) – $U = 4$ мкм, $T = 4$ мс, $V_{\max} = 2.1$ мм/с; (v2) – $U = 0.19$ мм, $T = 70$ мс, $V_{\max} = 11$ мм/с; (v3) – $U = 0.19$ мм, $T = 3$ мс, $V_{\max} = 115$ мм/с

ремещения. Перед локальным срывом одного из запертых участков предсейсмический крип наблюдается только в зоне его локализации. При разрушении одного из “асперити” разрыв тормозится на ближайших “целых” контактных пятнах, где в дальнейшем накапливаются “наведенные” смещения малой амплитуды (серые кривые на рис. 5б, 5г). Такие события можно считать подвижками с локализованным разрывом. Разрушение последнего “асперити” инициирует деформационное событие, которое сопровождается разрывом, распространяющимся вдоль всего модельного разлома. Для событий с полным разрывом, также характерно наличие стадии предсейсмического крипа.

Реализуемые на лабораторном разломе деформационные события существенно отличаются как по амплитуде и скорости смещения бортов, так и по “сейсмической эффективности” – доле упругой энергии, реализуемой в виде кинетического движения – излученных упругих колебаний и движения блока как целого. Для сравнения различных деформационных событий использовались параметры, регистрируемые датчиками перемещений в локальной области разрушения соответствующего “асперити” или параметры движения всего блока. Были проанализированы

результаты регистрации смещений при более чем 30 динамических событиях. На рис. 6 приведены зависимости максимальной скорости (V_{\max}) относительного смещения бортов от амплитуды (U) косейсмического смещения (рис. 6а) и V_{\max} от длительности события (T) (рис. 6б). Можно видеть, что параметры движения по разлому изменяются в широком диапазоне. Так максимальная скорость смещения изменяется на 4 порядка от ~ 50 мкм/с, до ~ 50 см/с, амплитуда смещения бортов разлома – от первых микрон почти до 1 мм.

Для всей выборки реализованных событий наблюдается тенденция увеличения максимальной скорости скольжения с ростом амплитуды смещения. Подвижки с высокой скоростью скольжения имеют длительность менее 5 мс. Амплитуда и скорость подвижек с локализованным разрывом, как правило, невелики, однако некоторые из них имеют относительно большую длительность. В экспериментах зарегистрированы подвижки в широком диапазоне параметров движения и при образовании разрыва вдоль всей поверхности контакта блоков. Высокоамплитудные смещения с высокой скоростью и малой длительностью можно считать “лабораторными землетрясениями”, тогда как медленные подвижки большой длительности – “событиями медленного сколь-

жения”. Примеры быстрых и медленных событий показаны на рис. 6в.

ОБСУЖДЕНИЕ

Основной задачей описанной серии экспериментов было исследование особенностей формирования и развития процесса скольжения по разлому с гетерогенной поверхностью. Рассмотренный случай интерфейса, состоящего из нескольких участков повышенной прочности и промежутков между ними, обладающих незначительным сопротивлением сдвигу, является предельно упрощенным вариантом модели *asperity* [Kanamori, Stewart, 1978], которая широко используется в сейсмологии и механике очага землетрясений для интерпретации результатов сейсмических и геодезических наблюдений [Scholz, 2019]. В этой модели в окрестности *asperity*, где разлом заперт в межсейсмический период, большая часть перемещения набирается за счет косейсмической подвижки, т.е. коэффициент сейсмической эффективности или сейсмическое сцепление χ (англ. термин “*seismic coupling*”) $\chi = \left(\int_S u dS \right)' / v_p S_f$ близок к единице [Scholz, Campos, 2012]. В последнем выражении S_f – площадь разрыва; v_p – скорость смещения плиты под действием тектонических сил; u – вектор косейсмического перемещения; S – площадь подвижки.

Как показывают результаты проведенных экспериментов дефицит перемещения в окрестности “асперити”, в самом деле, накапливается в процессе нагружения. При локальном разрыве запертого участка (разрушается только одно из контактных пятен) этот дефицит частично компенсируется в окрестности разрушенной области. Полное выравнивание величины относительного смещения бортов происходит лишь при разрушении всех “асперити”.

Несмотря на то, что в проведенных экспериментах контактные области были изготовлены из одного и того же материала, т.е. имели одинаковую прочность, разрушались они не одновременно, а с заметным сдвигом по времени, в течение которого среднее напряжение нарастало после первого сброса в результате локальной подвижки. Ни в одном из опытов данной серии не удалось достичь разрушения всех пятен в ходе одного деформационного события. Сценарий развития процесса скольжения по модельному разлому обычно был следующий. По достижении определенного уровня удельного усилия, начинался процесс необратимого деформирования одной из запертых областей. После непродолжительного ускоренного предрейсмического крипа происходит разрыв “асперити”, который явно выражен в динамике относительного перемещения бортов в его окрестности, параметрах акустической эмис-

сии и сбросе сдвигового усилия. Если при подготовке разрыва регистрируются лишь высокочастотные АИ, то в процессе подвижки излучаются также низкочастотные импульсы значительной амплитуды. Во всех экспериментах (за исключением тех опытов, в которых “асперити” был единственным) при разрыве первого пятна подвижка носила локальный характер, т.е. динамический разрыв не распространялся на другие запертые участки. При этом следует подчеркнуть, что на соседних “асперити” наблюдалось относительное смещение бортов, хотя и на порядок меньшей амплитуды. Кроме того, необратимые деформации соседних “асперити” проявлялись в снижении удельной сдвиговой жесткости этих областей. Многие из первых событий, как будет показано ниже, являлись, скорее, “медленными лабораторными землетрясениями”, которые характеризуются низкой скоростью распространения разрыва и малой величиной среднего сбросного усилия.

После восстановления уровня приложенного усилия происходил разрыв второго, а затем и третьего, последнего пятна. При разрыве последнего “асперити” наблюдалось перемещение и разгрузка всего блока со значительным сбросом удельного усилия, превышавшем на один-два порядка аналогичную величину для локального разрыва.

Для оценки “динамичности” подвижки целесообразно использовать лабораторный аналог приведенной сейсмической энергии $e_s = \frac{E_s}{M_0}$ (отношение величины излученной сейсмической энергии E_s к реализованному скалярному сейсмическому моменту M_0):

$$e_{lab} = \frac{E_k}{M_{lab}} = \frac{\rho S h V_{max}^2 / 2}{\mu S U} = \frac{\rho h V_{max}^2}{2\mu U}, \quad (2)$$

где: E_k – кинетическая энергия блока; M_{lab} – сейсмический момент, реализованный в ходе подвижки; U – амплитуда смещения бортов; V_{max} – максимальная скорость смещения; μ , ρ , h – модуль сдвига, плотность и высота подвижного блока, соответственно; S – площадь подвижки. Для грубой оценки можно предположить, что при локализованной подвижке упругая энергия высвобождается только из окрестности зоны расположения разрушенного “асперити”, а при образовании разрыва вдоль всей поверхности контакта в движение приходит блок целиком.

На рис. 7 представлена зависимость приведенной сейсмической энергии от лабораторного сейсмического момента. Можно видеть, что величина e_{lab} изменяется в широких пределах. Для событий с локализованным разрывом этот параметр варьируется в пределах от 10^{-11} до 10^{-7} при близких значениях сейсмического момента. При об-

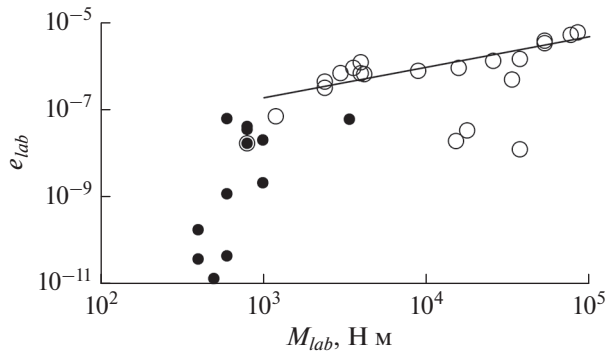


Рис. 7. Эффективность излучения накопленной энергии деформирования. Представлена зависимость приведенной сейсмической энергии (e_{lab}) событий скольжения от реализованного сейсмического момента (M_{lab}). Черные круги – события с локализованным разрывом, белые – события с разрывом вдоль всей длины межблокового контакта. Сплошная линия соответствует зависимости: $e_{lab} = 1.5 \times 10^{-9} M_{lab}^{0.7}$.

разовании разрыва вдоль всей поверхности, значения e_{lab} изменяются в диапазоне от 10^{-8} до 10^{-5} , при этом наблюдается увеличение величины приведенной сейсмической энергии события по степенному закону с ростом величины сейсмического момента ($e_{lab} \sim M_{lab}^{0.7}$). Подобное соотношение между этими энергетическими параметрами, отражающее, вероятно, отклонение от геометрического подобия процессов разрушения, часто наблюдается и для природной сейсмичности, особенно в диапазоне малых магнитуд [Кочарян и др., 2016].

Изменение соотношения между кинетической энергией блока и реализованным сейсмическим моментом ясно демонстрируют, что в лабораторном эксперименте, как и в природе, деформационные события формируют единый ряд от событий медленного скольжения до “нормальных землетрясений” [Peng, Gombert, 2010]. Примеры подвижек, зарегистрированных при событиях разного типа, приведены на рис. 6в.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В серии лабораторных экспериментов на блоках скальной породы метрового масштаба реализована упрощенная модель эволюции деформационного процесса на разломе с гетерогенной поверхностью, содержащей участки повышенной прочности – “асперити”.

Основным выводом, который может быть сделан по результатам экспериментов, является слабое влияние друг на друга участков крупных “асперити”, расположенных друг от друга на расстоянии, превышающем их характерный размер, в том

случае, если их целостность предварительно не нарушена. При реализации крупной подвижки, которая начинается в зоне максимального дефицита межблокового смещения, происходит разрыв тех областей разлома, эффективная прочность которых снижена предыдущими деформационными событиями. При этом эти, более ранние, события могут быть “медленными” подвижками, имеющими низкую сейсмическую эффективность.

Если в природе процессы происходят похожим образом, то события, “подготавливающие” поверхность разлома к крупной подвижке, могут являться событиями медленного скольжения, либо низкочастотными землетрясениями, которые слабо проявляются, либо вообще не видны, на сейсмических записях. В этой связи существенную роль при мониторинге областей, потенциально опасных с точки зрения возникновения крупных землетрясений, могут играть такие диагностические признаки, как регистрация невулканического тремора [Radiguet et al., 2016; Obara, Kato, 2016] или смещение спектра сейсмического шума в сторону более низких частот, вызванное снижением жесткости запертого участка разлома [Kocharyan et al., 2018; Беседина и др., 2020]. Такое снижение жесткости проявилось, в том числе, и в описанной серии экспериментов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № 122032900178-7 (в части модернизации установки, разработки концепции проведения экспериментов) и при поддержке проекта РФФ № 22-17-00204 (в части выполнения измерений анализа деформационных и акустоэмиссионных данных и хранения данных).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы глубоко признательны рецензентам – канд. тех. наук В.А. Новикову и докт. физ.-мат. наук И.А. Пантелееву, чьи замечания позволили существенно улучшить изложение материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беседина А.Н., Кишкина С.Б., Кочарян Г.Г., Ряховский И.А. Анализ микросейсмического фона до и после сильных землетрясений на примере Чилийской зоны субдукции // Физика Земли. 2020. № 2. С. 10–20.
- Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: Наука. 1991. 218 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., Батухтин И.В.* Лабораторные исследования процесса скольжения по разлому как физическая основа нового подхода к краткосрочному прогнозу землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 671–691.
<https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0367>
- Кочарян Г.Г., Иванченко Г.Н., Кишкина С.Б.* Энергия, излучаемая сейсмическими событиями различного масштаба и генезиса // Физика Земли. 2016. № 4. С. 141–156
- Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Павлов Д.В., Гридин Г.А., Морозова К.Г., Hongwen J., Пантелеев И.А.* Лабораторные исследования закономерностей фрикционного взаимодействия блоков скальной породы метрового масштаба. Методика и первые результаты // Физика Земли. 2022. № 6. С. 162–174
- Bürgmann R.* The Geophysics, geology and mechanics of slow fault slip // Earth and Planetary Science Letters. 2018. V. 495. P. 112–134.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.062>
- Gomberg J.* Unsettled earthquake nucleation // Nat. Geosci. 2018. V. 11. P. 463–464.
<https://doi.org/10.1038/s41561-018-0149-x>
- Kanamori H., Stewart G.S.* Seismological aspects of the Guatemala earthquake of February 4, 1976 // J. Geophysical Research: Solid Earth. 1978. V. 83. № B7. P. 3427–3434.
<https://doi.org/10.1029/JB083iB07p03427>
- Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V.* Traces of laboratory earthquake nucleation in the spectrum of ambient noise // Sci. Rep. 2018. V. 8. P. 10764.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-28976-9>
- Obara K., Kato A.* Connecting slow earthquakes to huge earthquakes // Science. 2016. V. 353. P. 253–257.
<https://doi.org/10.1126/science.aaf1512>
- Peng Z., Gomberg J.* An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena // Nature Geoscience. 2010. V. 3. № 9. P. 599–607.
<https://doi.org/10.1038/ngeo940>
- Radiguet M., Perfettini H., Cotte N., Gualandi A., Valette B., Kostoglodov V., Lhomme T., Walpersdorf A., Cabral Cano E., Campillo M.* Triggering of the 2014 Mw7.3 Papanoa earthquake by a slow slip event in Guerrero, Mexico // Nat. Geosci. 2016. V. 9. P. 829–833.
<https://doi.org/10.1038/ngeo2817>
- Scholz C.H.* The mechanics of earthquakes and faulting 3rd edition. Cambridge. UK: Cambridge University Press. 2019. 517 p.
- Scholz C. H., Campos J.* The seismic coupling of subduction zones revisited // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. B05310.
<https://doi.org/10.1029/2011JB009003>
- Sibson R.H.* Thickness of the Seismic Slip Zone // Bulletin of the Seismological Society of America. 2003. V. 93. № 3. P. 1169–1178.
<https://doi.org/10.1785/0120020061>

Evolution of Sliding Along a Heterogenous Fault. A Large-Scale Laboratory Experiment.

**G. A. Gridin^a, G. G. Kocharyan^a, K. G. Morozova^a, E. V. Novikova^a,
A. A. Ostapchuk^{a, *}, and D. V. Pavlov^a**

^a*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

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

A laboratory setup was constructed in IDG RAS to investigate the process of shearing the contact of rock blocks of one-meter scale. It was used to investigate deformation processes in a fault with a heterogenous structure of the sliding interface, which contained strong contact patches – analogs of the “asperity” in the model of Hiroo Kanamori. It is shown that when a large slip occurs, the rupture, that starts in the zone of maximal deficit of interblock displacement, cuts the segments of the fault with lower effective strength, the latter being decreased in previous deformation events. Those previous events may be “slow” slips with low seismic efficiency. In nature the events that “prepare” the fault interface for a large slip may be smaller earthquakes – foreshocks, or they can be either low frequency earthquakes or slow slip events, both can hardly be detected in seismic records. Thereupon a promising diagnostic indication is the shift of the spectrum of ambient seismic noise to lower frequencies caused by the decrease of fault stiffness.

Keywords: tectonic fault, slow earthquake, dynamic rupture, radiation efficiency, laboratory experiment