

## СВЯЗЬ СОСТОЯНИЯ СДВИГОВОЙ ТРЕЩИНЫ В ГРАНУЛИРОВАННОМ МАТЕРИАЛЕ И АКУСТОЭМИССИОННЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ДАННЫХ

© 2022 г. К. Г. Морозова<sup>а</sup>, \*, А. А. Остапчук<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН,  
Ленинский пр-т 38, корп. 1, Москва, 119334 Россия

\*e-mail: morozova@idg.chph.ras.ru

Поступила в редакцию 28.10.2021 г.

После доработки 29.12.2021 г.

Принята к публикации 25.01.2022 г.

Фрикционное скольжение по разломам и крупным трещинам является преобладающим механизмом коровых землетрясений. Лабораторные эксперименты в постановке слайдер-модели являются действенным инструментом получения информации о закономерностях зарождения лабораторных землетрясений. В настоящей работе представлены результаты акустоэмиссионных (АЭ) лабораторных экспериментов, направленных на исследование различных режимов фрикционного скольжения модельной трещины и установление единого эволюционного закона подготовки актов быстрого и медленного проскальзывания на основании синхронной непрерывной регистрации АЭ и кумулятивного смещения блоков. Введен новый параметр состояния трещины – обобщенный дефицит, позволяющий с высокой точностью контролировать стадию цикла ее нагружения. Обобщенный дефицит учитывает вариации излученного потока энергии АЭ и перемещения берегов трещины, тем самым учитывает процессы, протекающие на микро- и макроуровне, соответственно. Скорость изменения обобщенного дефицита имеет единую картину эволюции при всех реализованных режимах скольжения и может быть использована как индикатор перехода трещины в предельное состояние. В ходе экспериментов установлена функциональная зависимость между фрикционной прочностью трещины, скоростью ее деформирования и потоком излучаемой энергии АЭ, что указывает на связность процессов, протекающих на микро- и макроуровнях.

*Ключевые слова:* акустическая эмиссия, гранулированная среда, разлом, лабораторный эксперимент

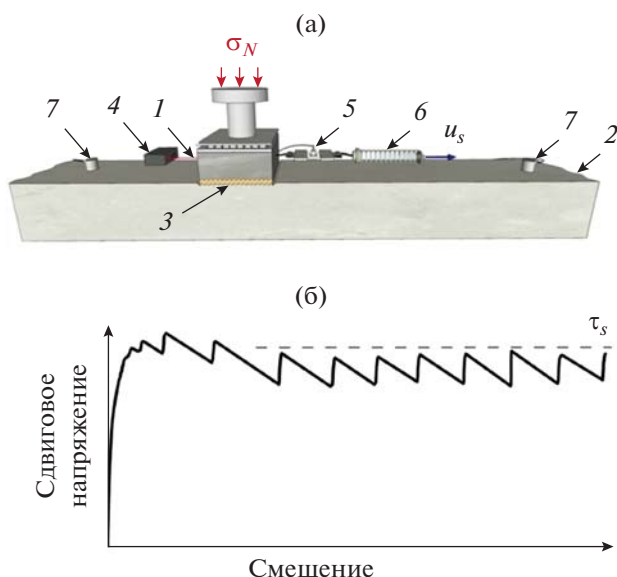
DOI: 10.31857/S0320791922050082

### ВВЕДЕНИЕ

Гранулированные среды определяют динамику многих техногенных процессов и природных явлений, включая оползни, селевые потоки, землетрясения и др. [1–3]. При землетрясениях деформации локализуются в узком слое гранулированного материала, из которого сложена центральная зона тектонического разлома [4]. Модели зарождения и эволюции очага землетрясения могут быть развиты на основе простых лабораторных экспериментов, в которых исследуются закономерности деформирования тонких слоев гранулированных сред [1]. Лабораторные эксперименты проводятся, как правило, в постановке слайдер-модели, когда блок под действием нормального и сдвигового усилий скользит по границе раздела, сложенной гранулированным материалом.

Закономерности фрикционного скольжения слайдер-модели определяются процессами эво-

люции, протекающими в слое гранулированного материала, а именно формированием и разрушением конгломератов нагруженных частиц, так называемых силовых цепочек [5]. Процесс формирования, эволюции и разрушения силовых цепочек зависит от многих параметров: гранулометрического состава и формы частиц [6], шероховатости ограничивающих поверхностей [7], скорости смещения берегов модельной трещины [8, 9], многократности циклов нагружения [10]. Деформирование тонкого гранулированного слоя сопровождается излучением акустической эмиссии (АЭ), на основе которого может быть прослежена динамика процессов, происходящих внутри модельной трещины. Регистрируются импульсы АЭ с различной волновой формой, статистические параметры которых коррелируют со стадиями подготовки актов динамического проскальзывания [11]. Разрушение отдельных силовых цепочек сопровождается излучением высокочастотных импульсов АЭ с резким вступлением, а переупа-



**Рис. 1.** Схема проведения эксперимента. (а) – Схема экспериментальной установки: 1 – мраморный блок  $8 \times 8 \times 4,5$  см, 0,8 кг, 2 – гранитный стержень  $2,5 \times 0,1 \times 0,1$  м, 3 – слой гранулированного материала (3 мм), 4 – датчик смещения, 5 – датчик силы, 6 – пружинный элемент, 7 – датчики АЭ; (б) – пример зависимости сдвигового сопротивления трещины от накопленного смещения.

ковка гранулированного слоя при динамическом проскальзывании сопровождается излучением низкочастотных импульсов АЭ [12].

При изучении закономерностей деформирования модельной трещины важно учитывать, что деформационные процессы протекают на разных масштабных уровнях: возникающая локальная потеря устойчивости (разрыв силовой цепочки) в ходе самоорганизации гранулированной среды является микро- и мезомасштабным процессом, в то время как глобальная потеря устойчивости (динамическое проскальзывание) уже макромасштабный процесс. Введение обобщенной характеристики системы, учитывающей разномасштабность протекающих процессов, может позволить установить закономерности ее эволюции, т.к. отдельное рассмотрение параметров не позволяет в полной мере контролировать состояние модельной трещины [13, 14].

В данной работе была проведена серия лабораторных экспериментов по сдвиговому деформированию модельной трещины в постановке слайдер-модели, направленная на установление единого закона эволюции модельной трещины при различных режимах ее фрикционного скольжения. Эволюция модельной трещины может быть описана с помощью нового параметра состояния системы – обобщенного дефицита. Была продемонстрирована высокая информативность обоб-

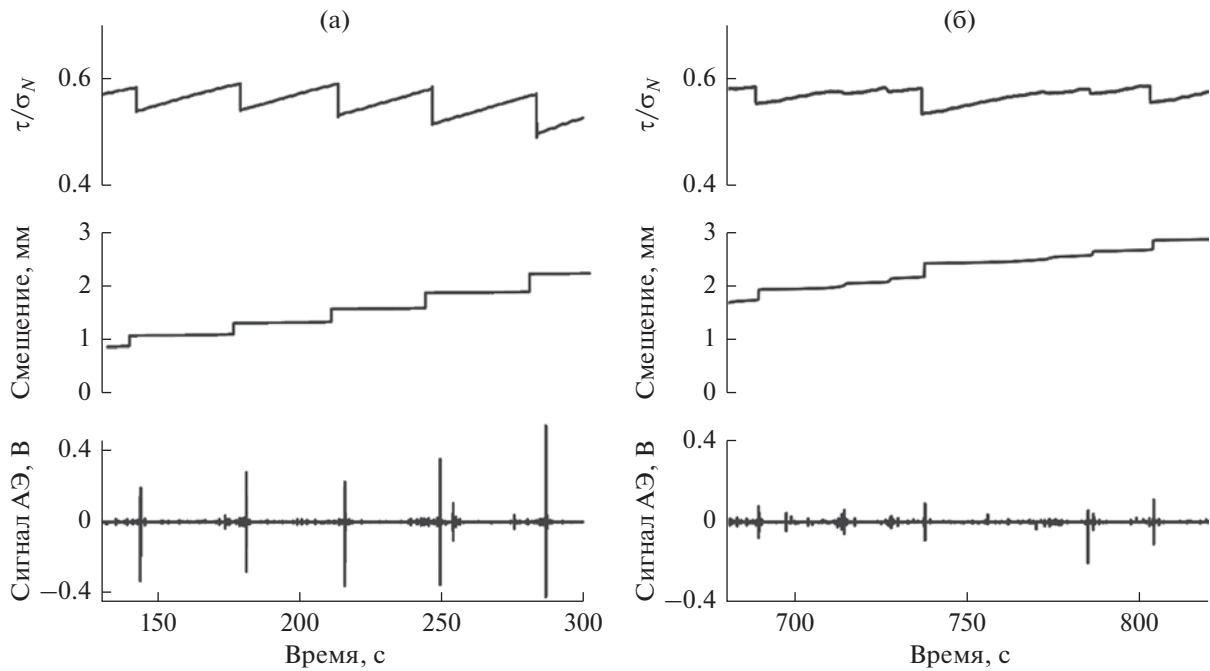
щенного дефицита и возможность его использования в качестве параметра, контролирующего процесс зарождения динамических событий.

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Лабораторные эксперименты проводились на геомеханическом стенде ИДГ РАН в постановке слайдер-модели (рис. 1). Блок (1)  $8 \times 8 \times 3$  см под действием нормального и сдвигового усилий скользит по неподвижному блоку-основанию (2) длиной 2,5 м и сечением  $10 \times 10$  см. Контакт между блоками (3) заполнялся тонким слоем мелкодисперсного гранулированного материала толщиной 3 мм. Нормальное усилие создавалось с помощью системы грузов и составляло 500 Н. Сдвиговое усилие прикладывалось к блоку через пружинный элемент (6) жесткостью 55 кН/м, свободный конец которого перемещался с постоянной скоростью  $u_s = 8$  мкм/с. Относительное смещение блоков регистрировалось лазерным датчиком смещения (4) ILD2220-10 (Micro-Epsilon, Германия) в диапазоне частот 0–5 кГц с точностью 0,1 мкм, сдвиговое усилие – датчиком силы (5) CFT/5kN (HBM, Германия) с точностью 1 Н. Относительное смещение блоков сопровождалось излучением упругих колебаний, непрерывная регистрация которых велась системой датчиков акустической эмиссии (АЭ) (7) VS30-V (Vallen System, Германия) с рабочим диапазоном частот 20–80 кГц и частотой дискретизации сигнала 1 МГц. Датчики АЭ располагались на расстояниях 0,6 и 0,7 м от подвижного блока.

Характерный вид реологической кривой модельной трещины представлен на рис. 1б. Для детального изучения брался запредельный участок реологической кривой, когда достигается остаточная фрикционная прочность модельной трещины  $\tau_s$ . Вариация вещественного и гранулометрического состава заполнителя модельной трещины обеспечила широкий диапазон реализуемых режимов скольжения: регулярное прерывистое скольжение (стик-слип), характеризующееся квазипериодическими актами проскальзывания с одинаковой скоростью; нерегулярное прерывистое скольжение, при котором акты быстрого проскальзывания случайным образом чередуются с актами медленного проскальзывания; стабильное скольжение (стабильный крип). Примеры реализованных режимов скольжения представлены на рис. 2. Экспериментальные данные и подробные сведения о реализованных режимах скольжения: параметры актов проскальзывания, фрикционная прочность, структура заполнителя, размещены в открытом репозитории Mendeley Data [15].

В условиях формирования актов динамического проскальзывания наблюдаются существенные отклонения параметров модельной трещи-



**Рис. 2.** Примеры изменения контролируемых параметров модельной трещины во времени при (а) – регулярном и (б) – нерегулярном режимах скольжения. В процессе экспериментов контролируются фрикционное сопротивление модельной трещины ( $\tau/\sigma_N$ ), относительное смещение и непрерывный сигнал АЭ.

ны, перемещения и излученной энергии, от линейного тренда. Величина отклонения может быть охарактеризована в терминах дефицита. Дефицит перемещения  $\delta X$  можно определить следующим образом:

$$\delta X(t) = u_s t - X(t), \quad (1)$$

где  $X(t)$  – смещение блока относительно неподвижного основания,  $u_s$  – коэффициент линейной регрессии. Аналогичным образом определяется дефицит излученной энергии  $\delta E$ :

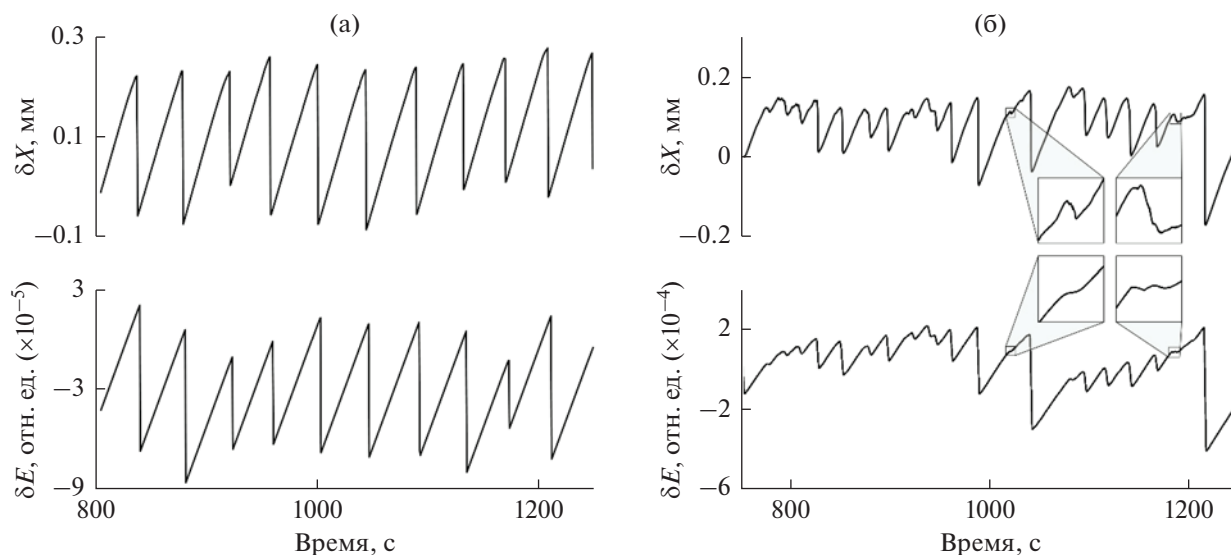
$$\delta E(t) = et - E_{cum}(t), \quad (2)$$

где  $E_{cum}(t) = \int_0^t A^2 dt$  – кумулятивная излученная энергия АЭ,  $e$  – коэффициент линейной регрессии зависимости  $E_{cum}(t)$  (соответствует среднему значению потока энергии АЭ). Примеры временных вариаций дефицитов перемещения и энергии АЭ представлены на рис. 3.

В зависимости от режима скольжения модельной трещины временные вариации дефицитов существенно изменяются. При регулярном режиме скольжения наблюдается выраженная цикличность: по мере приближения модельной трещины к моменту динамической неустойчивости величина дефицитов монотонно увеличивается, достигая локального максимума перед динамическим проскальзыванием; во время динамического проскальзывания значения дефицитов резко

снижаются, принимая значение локального минимума (рис. 3а). Уровень локальных максимумов одинаков перед всеми актами динамической неустойчивости. Также для регулярного прерывистого скольжения наблюдается высокая корреляция между дефицитами перемещения и энергии АЭ (более 0.9). При нерегулярном режиме скольжения временные вариации дефицита энергии АЭ  $\delta E$  имеют более сложную картину изменения. При быстрых актах проскальзывания наблюдается резкое снижение  $\delta E$  до локального минимума, аналогично дефициту перемещения  $\delta X$ . В то же время при медленных событиях (например, врезки 1010–1020 и 1170–1180 с на рис. 3б) величина дефицита энергии АЭ  $\delta E$  не убывает в отличие от дефицита перемещения  $\delta X$ , т.е. инициирование динамической неустойчивости происходит без достижения локального максимума дефицита энергии АЭ. Коэффициент корреляции при нерегулярном режиме скольжения существенно ниже и составляет величину 0.7. Наблюдаемые отличия временных вариаций дефицитов при подготовке быстрых и медленных актов проскальзывания указывают на сложность протекающих на макро- и микромасштабе процессов эволюции модельной трещины.

Эволюция модельной трещины сопровождается процессами, протекающими на разных масштабах. АЭ характеризует процессы, протекающие на микромасштабе, в то время как перемещение



**Рис. 3.** Временные вариации дефицита смещения  $\delta X(t)$  и энергии АЭ  $\delta E(t)$  для (а) – регулярного и (б) – нерегулярного режимов скольжения. На врезках показаны примеры вариаций  $\delta X$  и  $\delta E$  при медленных актах проскальзывания.

блоков характеризует процесс на макромасштабе. С целью аккумуляции информации о разно-масштабных процессах определим новый параметр состояния модельной трещины – обобщенный дефицит модельной трещины  $G$  следующим образом:

$$G = \sqrt{\left(\frac{\delta X}{u_s}\right)^2 + \left(\frac{\delta E}{e}\right)^2}. \quad (3)$$

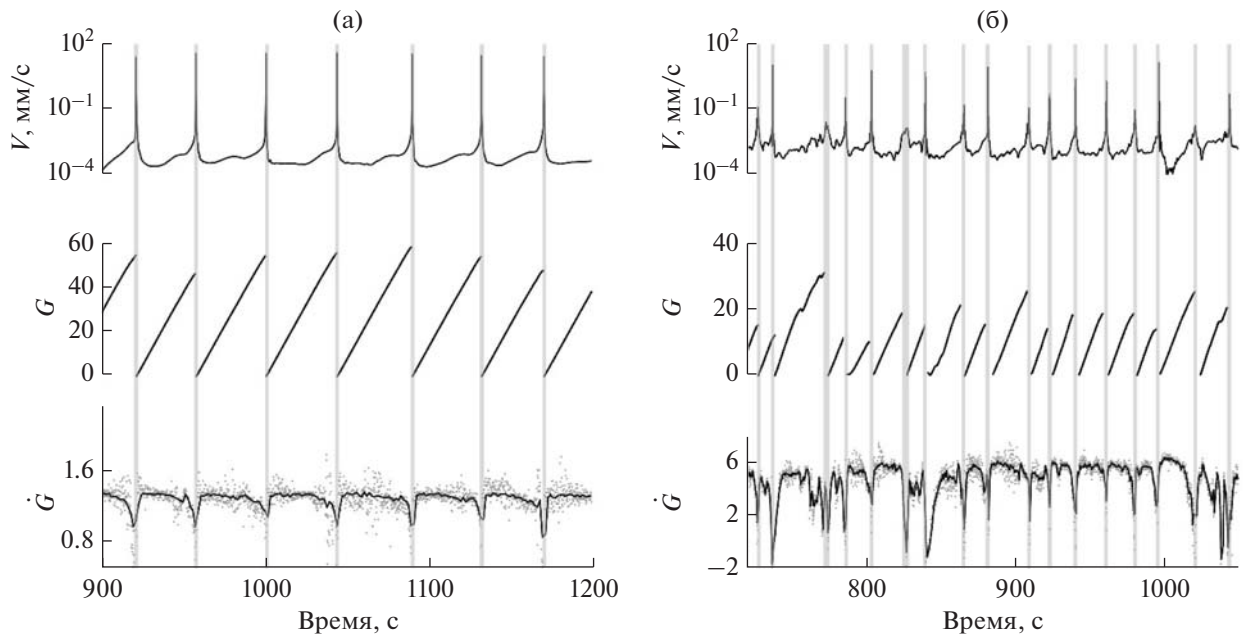
Величины дефицитов перемещения и энергии АЭ нормированы на соответствующие значения коэффициентов линейной регрессии (трендовых составляющих)  $u_s$  и  $e$ , соответственно, с целью со-размерить вклад процессов, протекающих на различных масштабных уровнях. С учетом нормировки размерность обобщенного дефицита  $[G] = c$ . Временные вариации обобщенного дефицита  $G$  и скорости его приращения  $\dot{G}$  представлены на рис. 4.

Если для обобщенного дефицита  $G$  наблюдается монотонный рост между динамическими событиями с различной величиной локального максимума, то скорость приращения обобщенного дефицита  $\dot{G}$  является параметром, динамика изменения которого позволяет с высокой точностью судить о состоянии модельной трещины (рис. 4). Наблюдается выраженная цикличность изменения с характерными 3 стадиями подготовки динамической неустойчивости. Сразу после динамической неустойчивости наблюдается быстрый рост  $\dot{G}$ . Далее наступает условно стабильная стадия, на которой величина  $\dot{G}$  примерно постоянна. На третьей стадии по мере приближения к моменту динамической неустойчивости переход в

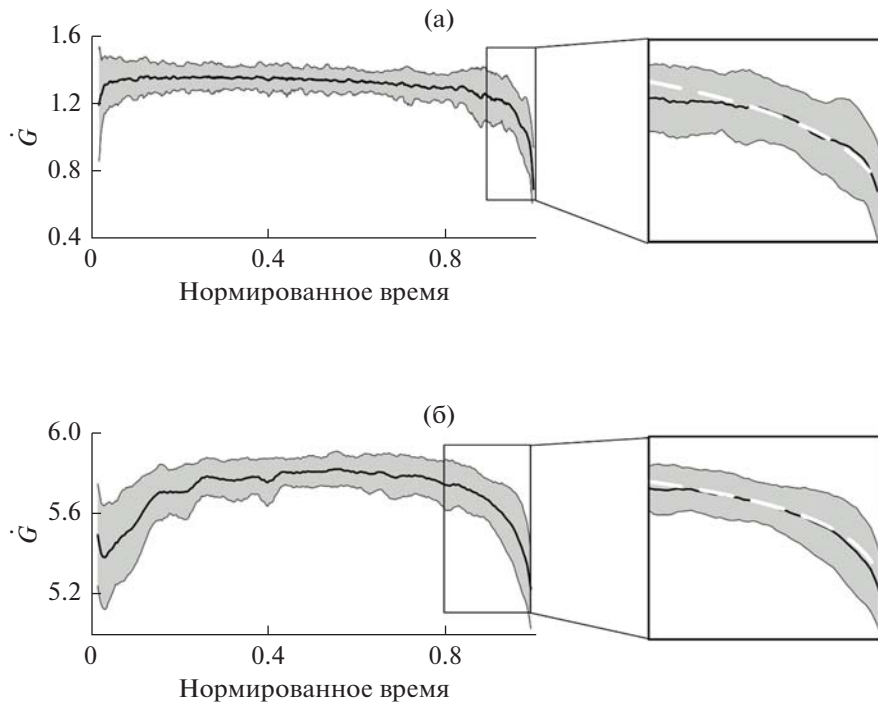
предельное состояние модельной трещины сопровождается монотонным снижением  $\dot{G}$ , которая достигает минимума в момент динамической неустойчивости. Выделенные стадии характерны как для периодически повторяющихся событий при регулярном режиме скольжения, так и для аperiодических быстрых и медленных событий при нерегулярном режиме скольжения. При этом можно определить обобщенную кривую изменения параметра  $\dot{G}$  для всех режимов скольжения (рис. 5).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для лучшего понимания динамики гранулированных систем критически важным является установление теоретических и экспериментальных соотношений, определяющих закономерности накопления и реализации упругой энергии деформации. Эволюция напряженно-деформированного состояния гранулированной среды сопровождается излучением упругих колебаний, несущих важную информацию о процессах самоорганизации среды и формировании макронеустойчивости. В условиях сдвигового деформирования важной особенностью механического поведения модельной трещины (нагруженного тонкого гранулированного слоя) является нестационарность скольжения. Ранее авторами работ [16, 17] в качестве индикаторов напряженно-деформированного состояния модельных трещин рассматривались активность АЭ, скейлинговые характеристики АЭ, спектральный центроид сигнала АЭ и др. Данные характеристики надежно контролируют состояние модельного разлома



**Рис. 4.** Эволюция состояния модельной трещины во времени при (а) – регулярном и (б) – нерегулярном режимах скольжения. Временные вариации скорости скольжения блока  $V$ , обобщенного дефицита системы  $G$  и скорости его приращения  $\dot{G}$  (черной линией показана средняя величина в скользящем окне 5 мс).



**Рис. 5.** Изменение скорости приращения обобщенного дефицита  $\dot{G}$  при подготовке актов динамического проскальзывания на модельной трещине при (а) – регулярном и (б) – нерегулярном режимах скольжения. Черная линия соответствует среднему значению скорости приращения дефицита, серая область соответствует ее стандартному отклонению. Время нормировано на рекуррентное время подготовки соответствующего акта динамического проскальзывания. На врезках представлены аппроксимации временных вариаций  $\dot{G}$  (белая пунктирная линия) на заключительной стадии подготовки к динамической неустойчивости степенной функцией (а)  $\dot{G} = 1.9(1 - t)^{0.17}$  и (б)  $\dot{G} = 6.1(1 - t)^{0.03}$ .

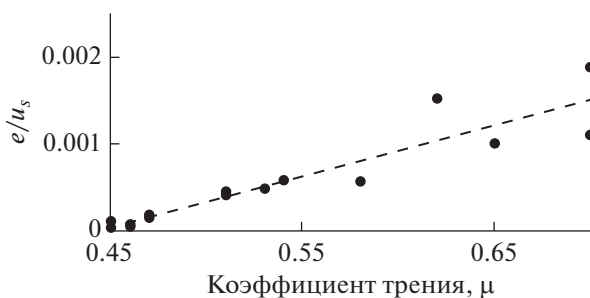


Рис. 6. Зависимость соотношения  $e/u_s$  от коэффициента трения  $\mu$  для всех проведенных экспериментов по сдвиговому деформированию модельной трещины.

при регулярном прерывистом скольжении, но бездейственны при нерегулярном. Аналогично при нерегулярном режиме скольжения наблюдение одной лишь скорости деформирования не позволяет контролировать состояние модельной трещины. В отличие от регулярного прерывистого скольжения, при нерегулярном скольжении изменение скорости скольжения не получается описать в терминах ускоренной ползучести [18]. В проведенных экспериментах при нерегулярном режиме скольжения наблюдается существенно более низкая корреляция между акустическими данными и данными смещения, чем при регулярном прерывистом скольжении. Более того, на интервалах подготовки и реализации медленных актов проскальзывания нельзя и вовсе говорить о единообразной тенденции изменения дефицитов перемещения и энергии АЭ (1010–1020 и 1170–1180 с на рис. 3б).

Конфигурация гранулированного слоя модельной трещины и структурированность силовых цепочек определяют, с одной стороны, особенности режима фрикционного скольжения [19, 20], а с другой стороны, фрикционную прочность контакта [20, 21]. В то же время процессы самоорганизации гранулированной среды, протекающие на микроуровне, сопровождаются излучением АЭ [22, 23]. С помощью анализа совокупности всех экспериментальных значений  $\{e, u_s, \mu\}$  была установлена функциональная зависимость между параметрами модельной трещины (рис. 6), которая выражается следующим образом:

$$\frac{e}{u_s(\mu - \mu_0)} = (6 \pm 1) \times 10^{-3}, \quad (4)$$

где  $\mu_0$  — минимальное значение коэффициента трения, при котором наблюдалось нестабильное скольжение. Для горных пород характерное значение  $\mu_0$  составляет 0.5 [24]. На графике наблюдается существенное отклонение точек от регрессионной прямой при  $\mu > 0.6$ , при котором был реализован нерегулярный режим скольжения. Вероятно, отклонения обусловлены различием

излучательной эффективности быстрых и медленных актов проскальзывания при нерегулярном режиме скольжения [11].

Учитывая возможность формирования как регулярного, так и нерегулярного режимов скольжения, выявленная функциональная зависимость между фрикционной прочностью трещины, средней скоростью ее деформирования и средней величиной потока излучаемой энергии АЭ, вероятно, указывает на определяющую роль пространственной структурированности гранулированного слоя модельной трещины [25].

Для гранулированных сред характерно свойство самоорганизованной критичности [2]. Следовательно, переход гранулированной системы в состояние предельного равновесия будет сопровождаться связностью и согласованностью процессов, протекающих на разных масштабах. Эксперименты показали, что введение обобщенного дефицита  $G$ , учитывающего, фактически, процессы и на микро-, и на макромасштабе, позволяет надежно контролировать процесс подготовки актов динамического проскальзывания при реализации как регулярного прерывистого, так и нерегулярного режимов скольжения (рис. 5). Снижение скорости приращения дефицита  $\dot{G}$ , характерное для заключительной стадии подготовки динамической неустойчивости, может быть представлено в виде степенной функции:

$$\dot{G} = a(1 - t)^b, \quad (5)$$

где  $a$  и  $b$  — константы.

Выявление универсального степенного закона эволюции нагруженной модельной трещины, сложенной гранулированными материалами, указывает на определяющую роль процессов самоорганизации и, как следствие, пространственной структурированности конгломератов нагруженных частиц, сформированных в тонком гранулированном слое модельной трещины. При этом скорость приращения дефицита  $\dot{G}$  может выступать в качестве акустоэмиссионно-деформационного индикатора состояния модельной трещины, позволяющего с высокой точностью контролировать подготовку акта динамического проскальзывания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенных лабораторных акустоэмиссионных экспериментах детально исследована эволюция состояния модельной трещины при ее сдвиговом деформировании. Благодаря использованию различных материалов-заполнителей трещины были реализованы различные режимы фрикционного скольжения. Экспериментально была выявлена функциональная зависимость между фрикционной прочностью трещины, сред-

ней скоростью ее деформирования и средней величиной потока излучаемой энергии АЭ, которая указывает на определяющую роль пространственной структурированности гранулированного слоя в процессе эволюции состояния трещины.

Введен новый параметр состояния модельной трещины — обобщенный дефицит, основанный на данных синхронной регистрации акустической эмиссии и смещения берегов трещины, что позволяет учитывать разномасштабность эволюционных процессов. Выявленные закономерности изменения обобщенного дефицита могут быть полезны для определения напряженного состояния крупной трещины и возможности инициирования актов динамического проскальзывания.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ № 122032900178-7 (концепции проведения лабораторных экспериментов) и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований в рамках выполнения гранта № 20-35-90074 (обработка и анализ экспериментальных данных).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кочарян Г.Г.* Геомеханика разломов. М.: ГЕОС, 2016. 424 с.
2. *Bak P., Tang C., Wiesenfeld K.* Self-organized criticality // *Physical Review A*. 1988. V. 38. № 1. P. 364–374. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.38.364>
3. *Majmudar T.S., Behringer R.P.* Contact force measurements and stress-induced anisotropy in granular materials // *Nature*. 2005. V. 435. P. 1079–1082. <https://doi.org/10.1038/nature03805>
4. *Sibson R.S.* Thickness of the seismic slip zone // *BSSA*. 2003. V. 93. № 3. P. 1169–1178.
5. *Sammis C., King G., Biegel R.* The kinematics of gouge deformation // *Pure Appl. Geophys.* 1987. V. 125. № 5. P. 777–812.
6. *Anthony J.L., Marone C.* Influence of particle characteristics on granular friction // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. P. B08409. <https://doi.org/10.1029/2004JB003399>
7. *Michlmayr G., Cohen D., Or D.* Sources and characteristics of acoustic emissions from mechanically stressed geologic granular media — A review // *Earth-Science Reviews*. 2012. V. 112. № 1. 3–4. P. 97–114.
8. *Mair K., Marone C., Young R.P.* Rate dependence of acoustic emissions generated during shear of simulated fault gouge // *BSSA*. 2007. V. 97. № 6. P. 1841–1849.
9. *Yabe Y., Kato N., Yamamoto K., Hirasawa T.* Effect of sliding rate on the activity of acoustic emission during stable sliding // *Pure Appl. Geophys.* 2003. 160. P. 1163–1189.
10. *Khidas Y., Jia X.* Probing the shear-band formation in granular media with sound waves // *Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, American Physical Society. 2012. V. 85. № 5. P. 051302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.85.051302>.hal-00786223
11. *Ostapchuk A., Morozova K., Markov V., Pavlov D., Popov M.* Acoustic emission reveals multiple slip modes on a frictional fault // *Front. Earth Sci.* 2021. V. 9. P. 657487. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.657487>
12. *Michlmayr G., Cohen D., Or D.* Shear-induced force fluctuations and acoustic emissions in granular material // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2013. V. 118. P. 6086–6098.
13. *Johnson P.A., Ferdowsi B., Kaproth B.M., Scuderi M., Griffa M., Carmeliet J. et al.* Acoustic emission and microslip precursors to stick-slip failure in sheared granular material // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40. P. 5627–5631. <https://doi.org/10.1002/2013GL057848>
14. *Roy S., Luding S., Weinhart Th.* A general(ized) local rheology for wet granular materials // *New J. Phys.* 2017. V. 19. P. 04301.
15. *Morozova K.* Laboratory acoustic emission experiments on a slider-model // *Mendeley Data*. 2021. V3. <https://doi.org/10.17632/kykwjmjpmgf.3>
16. *Лавров А.В., Шкуратник В.Л.* Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) // *Акуст. журн.* 2005. Т. 51. Приложение. С. 6–18.
17. *Остапчук А.А., Павлов Д.В., Марков В.К., Крашенинников А.В.* Исследование сигналов акустической эмиссии при сдвиговом деформировании трещины // *Акуст. журн.* 2016. Т. 62. № 4. С. 503–512.
18. *Понов В.Л., Grzempa B., Starcevic J., Fabry C.* Ускоренная ползучесть как предвестник фрикционной неустойчивости и проблема предсказания землетрясений // *Физическая мезомеханика*. 2010. Т. 13. № 5. С. 85–95.
19. *Mair K., Frye K.M., Marone C.* Influence of grain characteristics on the friction of granular shear zones // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № 10. P. 2219.
20. *Кочарян Г.Г., Марков В.К., Остапчук А.А., Павлов Д.В.* Мезомеханика сопротивления сдвигу по трещине с заполнителем // *Физическая мезомеханика*. 2013. Т. 16. № 5. С. 5–15.
21. *Biegel R.L., Sammis C.* The frictional properties of a simulated gouge having a fractal particle distribution // *J. Structural. Geol.* 1989. V. 11. P. 827–846. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(89\)90101-6](https://doi.org/10.1016/0191-8141(89)90101-6)
22. *Пантелеев И.А.* Анализ тензора сейсмического момента акустической эмиссии: микромеханизмы разрушения гранита при трехточечном изгибе // *Акуст. журн.* 2020. Т. 66. № 6. С. 654–668.
23. *Метелёв И.С., Овчинников М.Н., Марфин Е.А., Гайфутдиновс Р.Р., Сагиров Р.Н.* Исследование акустических шумов при фильтрации газа через пористую среду // *Акуст. журн.* 2019. Т. 65. № 2. С. 214–222.
24. *Ikari M.J., Marone C., Saffer D.M.* On the relation between fault strength and frictional stability // *Geology*. 2011. V. 39. № 1. P. 83–86. <https://doi.org/10.1130/G31416.1>
25. *Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б.* Физическая мезомеханика очага землетрясения // *Физическая мезомеханика*. 2020. Т. 23. № 6. С. 9–24.