УДК 550.34

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ СДВИГОВОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ НАРУШЕНИЯ СПЛОШНОСТИ

А.А. Остапчук

В статье приведены результаты лабораторных экспериментов, направленных на исследование закономерностей излучения акустической эмиссии при сдвиговом деформировании нарушения сплошности. На протяжении всего цикла нагружения источниками высокочастотных сигналов являются контакты отдельных гранул среды. Основная доля сейсмоакустической энергии выделяется в полосе частот 80-110 кГц. Установлено, что вследствие нелинейных деформационных свойств гранулированных сред поток излучаемой сейсмической энергии зависит от скорости деформирования нарушения сплошности как $\Pi_s \sim v^{0.65\pm0.05}$.

Введение

В последние десятилетия интенсивное развитие наблюдательных технологий в науках о Земле позволило обнаружить и классифицировать различные режимы деформирования, посредством которых реализуется потенциальная энергия, накопленная в земной коре от обычных землетрясений до медленных и очень низкочастотных [Peng, Gomberg, 2010]. Однако условия возникновения и эволюции разных режимов деформирования разломных зон пока слабо изучены.

Многочисленные наблюдения на сейсмоактивных территориях позволяют заключить, что размеры зон активных разломов, к которым приурочены большинство коровых землетрясений весьма ограничены, при этом динамический разрыв при землетрясении локализован в очень узкой центральной части разлома. По геологическим данным главная зона сместителя состоит из нескольких тонких разрывов шириной менее 10 см. Разрыв, как правило, заполнен изношенным гранулированным материалом, который имеет более или менее угловатую форму и широкий грансостав [Sibson et al., 2003; Chester, Chester, 1998]. Структура и свойства материала-заполнителя значительно влияют на механическую прочность, характер фрикционного взаимодействия и потенциал для возникновения динамической неустойчивости.

С развитием наблюдательных технологий и представлений о структуре разломных зон большинство сейсмологов пришло к выводу, что коровые землетрясения представляют собой акт скорее фрикционного взаимодействия, нежели хрупкого разрушения. Таким образом, в последнее десятилетие главным объектом лабораторных исследований стало фрикционное взаимодействие блоков горных пород.

В лабораторных экспериментах одним из наиболее эффективных средств мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) среды в реальном времени является наблюдение акустической эмиссии (АЭ). При этом акустико-эмиссионные методы исследований дают возможность регистрировать отдельные акты изменения структуры исследуемого массива (или акты разрушения массива)

и определять пространственное положение источников сигналов. А использование полученных результатов при изучении сейсмоакустических сигналов, зарегистрированных in situ, способствует пониманию физики процессов, происходящих в реальном горном массиве.

При исследовании процесса разрушения массива горных пород было установлено, что в качестве источников и механизмов генерации АЭ в горных породах выступают рост микро- и макротрещин, схлопывание пор, процессы двойникования и др. Неоднократно отмечалось, что АЭ выражена тем сильнее, чем более неоднородным является материал. Разрушение идеального кристалла происходит внезапно и не предваряется АЭ. В неоднородном материале дефекты в процессе роста нагрузки (температуры) активизируются, что приводит к испусканию сигналов. АЭ начинается задолго до наступления макроразрушения [Yukalov et al., 2004].

При механическом разрушении массива горных пород одной из основных характеристик АЭ является её стадийность, то есть зависимость характеристик АЭ от стадии разрушения образца. Закономерная смена стадий АЭ в процессе развития разрушения создает предпосылки для прогноза катастрофического макроразрушения в неоднородных геоматериалах. Одной из характерных стадий, например, является эффект «затишья». Наличие и продолжительность акустического затишья, а также его положение по отношению к пиковому значению напряжения определяются как режимом нагружения, так и типом породы. Явление затишья наблюдается не только в малых лабораторных образцах, но также и в более крупных масштабах – перед горными ударами в шахтах, а также перед землетрясениями [Wyss, Habermann, 1988].

В последнее десятилетие в лабораторных экспериментах при изучении фрикционных свойств горного массива удалось реализовать различные моды фрикционного взаимодействия: от стабильного скольжения до регулярного стик-слипа. Показано, что способ реализации накопленной упругой энергии определяется не столько прочностными макрохарактеристиками заполнителя, сколько его структурой на мезоуровне. Установлено, что закономерности процесса деформирования полностью определяются эволюцией силовых цепочек из нагруженных частиц заполнителя, которые образуются и разрушаются в процессе сдвига по трещине, их протяженностью и количеством [Кочарян и др., 2013].

Применение акустико-эмиссионного метода показало, что разные моды скольжения сопровождаются акустическими сигналами различных типов, импульсными событиями и сигналами подобными тремору [Zigone et al., 2011].

При изучении регулярного прерывистого скольжения было показано, что перед динамическим событием наблюдается экспоненциальный рост количества сигналов АЭ и микроподвижек. При этом большинство микроподвижек проявляются в виде сигналов АЭ, однако многие сигналы АЭ не сопровождаются соответствующими по времени подвижками [Johnson et al., 2013]. Сигнал АЭ, соответствующий динамическому событию, характеризуется увеличением интенсивности колебаний в низкочастотной (<20 кГц) области спектра. В тоже время сигналы АЭ, предшествующие срыву, характеризуются как высокочастотные импульсы малой продолжительности [Michlmayr et al., 2013].

В настоящей работе мы изучаем особенности излучения высокочастотных сигналов АЭ в частотном диапазоне от 40 до 200 кГц при различных режимах деформирования нарушения сплошности и определяем закономерности изменения параметров АЭ на разных стадиях цикла нагружения.

Методика проведения экспериментов и полученные результаты

Лабораторные эксперименты проводились на установке, схематично представленной на рис. 1. Мраморный блок *B* размером 8×8×3 см^3 располагался на неподвижном мраморном основании *A*. Контакт между шероховатыми поверхностями заполнялся слоем дискретного материала *s* толщиной 3 мм.

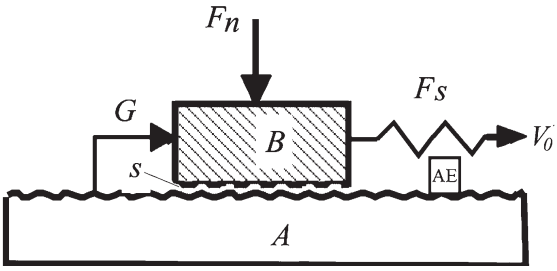

Рис. 1. Схема проведения эксперимента

Нормальная нагрузка *Fn* прикладывалась через специальное приспособление, которое исключало появление сдвиговых усилий на верхней грани подвижного блока. Величина нормальных напряжений σ_n составляла 80 кПа. Сдвиговое усилие *Fs* прикладывалось к блоку через пружинный блок с регулируемой жесткостью. Скорость деформации пружины V_0 задавалась мотором с редуктором, была постоянной и составляла 20 мкм/с. Создаваемые сдвиговые усилия контролировались пьезодатчиком силы (CFT/5kN, HBM, Германия), а относительное смещение блоков – лазерным датчиком перемещения *G* (ILD2220-10, Micro-Epsilon, Германия). Излучаемый в процессе сдвига сигнал АЭ регистрировался датчиком GT301 (*AE*) с полосой пропускания 50–500 кГц (ГлобалТест, Россия). Датчик располагался спереди на небольшом расстоянии от подвижного блока. Показания всех датчиков записывались цифровыми регистраторами с частотой кодирования 1 МГц.

В качестве заполнителя трещины использовались разные материалы – стеклянные шарики, кварцевый песок, поваренная соль, гранитная крошка с добавлением абразивных порошков (корунд, карбид кремния) – определяющие характер деформирования трещины с заполнителем: например, для кварцевого песка характерно стабильное скольжение, в то время как для поваренной соли – прерывистое. Средний размер зерен всех заполнителей составлял 200–400 мкм.

В специальной серии экспериментов было определено, что работа мотора, а также внешние антропогенные акустические сигналы не влияют на параметры регистрируемых сигналов АЭ и уровень шума канала регистрации не превышает 3 мкм/с.

Эксперименты проводились сериями по 3–5 раз в зависимости от режима деформирования. При режимах стабильного и регулярного прерывистого скольжения относительные вариации геомеханических параметров составляли менее 20% для экспериментов с одним и тем же материалом-заполнителем трещины. При нестабильном режиме деформирования геомеханические параметры варировались в широком диапазоне значений, и разные эксперименты одной серии характеризовались только примерно постоянным распределением количества различных типов межблоковых подвижек.

В ходе основных экспериментов были реализованы различные моды высвобождения накопленной упругой энергии: от крипа и медленных подвижек до динами-

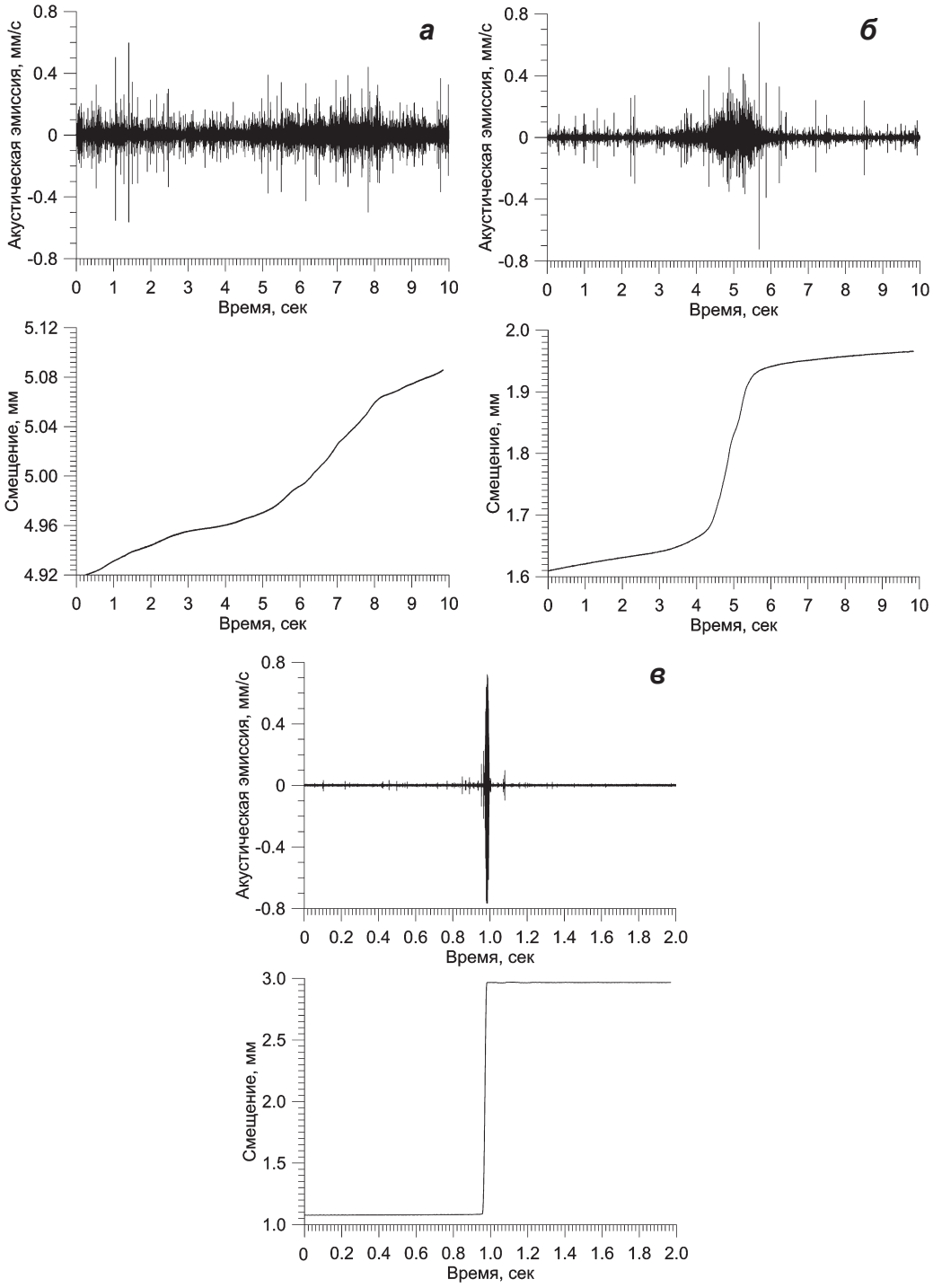

Рис. 2. Зависимость изменения сигнала АЭ и смещения со временем: а – при крипе, б – медленной подвижке, в – динамическом срыве. При динамическом срыве масштаб оси времени увеличен в 5 раз

ческих срывов различной амплитуды. При этом для разных заполнителей мог быть характерен один и тот же режим деформирования. Примеры характерных записей датчиков приведены на рис. 2. Стоит отметить, что в ходе одного эксперимента было реализовано от 5 до 20 актов разупрочнения нарушения сплошности, то есть межблоковых смещений разного типа.

При разных режимах деформирования зарегистрированный сигнал АЭ состоит из фонового шума, характеризующего стадию подготовки события, и сигнала события, характеризующего непосредственно разупрочнение нарушения сплошности.

Во время режима квазистабильного скольжения сигнал АЭ состоит из фонового акустического шума и тремор-подобных сигналов. Среднеквадратичная амплитуда фонового шума составляет примерно 10 мкм/с, причем, фоновый шум содержит большое число «отдельных» импульсов с амплитудами 100–200 мкм/с и продолжительностью около 1.5 мс (рис. 3). Частота следования данных импульсов меняется от 5 до 20 мс. Тремор характеризуется увеличением среднеквадратичной амплитуды сигнала в 1.5–2 раза, а его продолжительность составляет 3–5 с. При этом «отдельные» выраженные импульсы слипаются (частота следования становится менее 1.5 мс), образуя тем самым цуги длиной 0.2–0.3 с. В процессе квазистабильного скольжения излучение четко выраженных тремор-подобных сигналов происходит на стадии ускоренного движения со скоростью смещения u в диапазоне от 40 до 60 мкм/с, превышающей скорость нагружения в 2–3 раза.

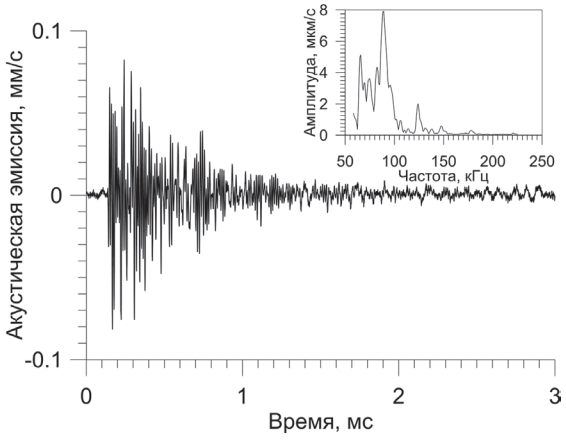

Рис. 3. Запись «отдельного» импульса АЭ, наблюдаемая на предсейсмической стадии. На врезке представлен спектр сигнала во временном интервале от 0 до 1.5 мс.

Режим регулярного прерывистого скольжения характеризуется повторяющимися циклами продолжительного медленного увеличения сдвигового усилия с последующим резким сбросом. Во время резкого скачка сдвигового усилия генерируется кратковременный высокоамплитудный сигнал АЭ. При этом амплитуда сигнала во время срыва в 10^2–10^3 раз превышает уровень фонового шума, который составляет для режима стик-слипа величину, примерно равную 3–4 мкм/с. Стоит отметить, что на стадии накопления напряжений отдельные чередующиеся импульсы возникают, как правило, только за 5–15 с до момента срыва, что соответствует примерно 5–10% от полного времени цикла «нагружение – сброс» для заполнителя NaCl.

Сигналы АЭ, генерируемые при медленных подвижках, характеризуются плавным возрастанием среднеквадратичной амплитуды до 50–100 мкм/с и последующим плавным убыванием до фонового уровня, составляющего примерно 5 мкм/с.

При этом продолжительность медленной подвижки составляет от 0.5 до 3 с. Таким образом, сигналы АЭ, генерируемые при медленных подвижках, занимают промежуточное положение (характеризуются средними величинами параметров) между сигналами АЭ, генерируемыми при крипе и динамическом срыве.

Как отмечалось выше, фоновая АЭ, наблюдаемая на стадии увеличения сдвигового напряжения, содержит большое число «отдельных» импульсов. Пример одного из таких импульсов приведен на рис. 3. В зависимости от режима деформирования и стадии нагружения частота следования таких импульсов на временном интервале меняется от одиночных щелчков с промежутком в несколько секунд до регулярно происходящих сигналов со скажностью 3 мс, при этом их апмплитуда может изменяться от 50 до 400 мкм/с. Данные импульсы имеют, как правило, структуру релаксационных высокочастотных колебаний с резким вступлением, которая характерна для динамических событий, связанных с образованием дефектов структуры.

Любое динамическое событие приводит к перестройке структуры материала-заполнителя. В момент сброса накопленных напряжений часть энергии упругих деформаций гранул излучается в виде АЭ. Спектральный анализ сигналов показывает, что основная часть энергии АЭ содержится в области частот от 80 до 110 кГц (рис. 4), и соответствует максимуму спектра «отдельного» импульса (рис. 3). Высокочастотная область 80–110 кГц характерна для всех материалов-заполнителей в независимости от реализованного типа подвижки (рис. 4). Данное обстоятель-

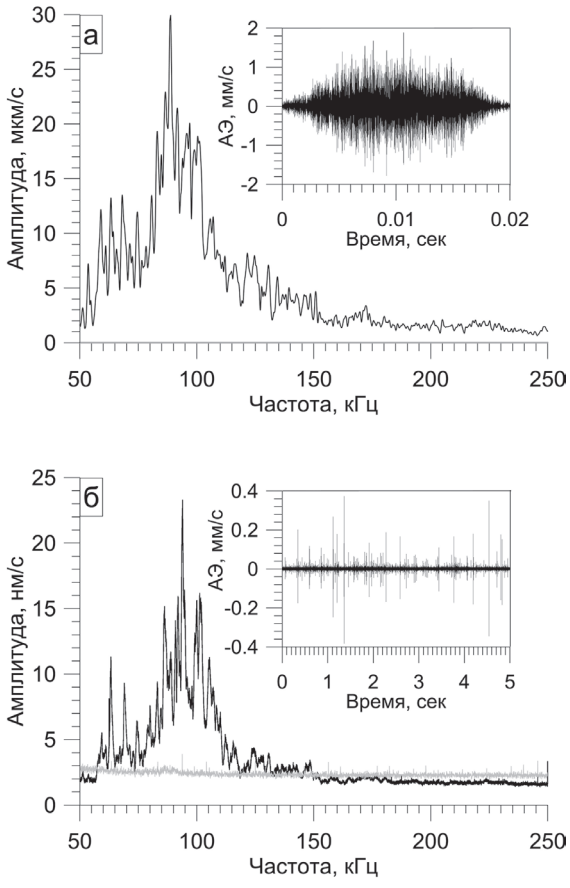

Рис. 4. Зависимость амплитуды скорости от частоты сигнала: а – при динамическом срыве с заполнителем NaCl, б – при крипе, заполнитель кварцевый песок. Серая кривая – «спектр» фонового шума, характерного для подготовки динамического срыва. На врезках показаны соответствующие сигналы АЭ

ство вкупе с сильной модуляцией спектров сигналов подтверждает тот факт, что источниками высокочастотных сигналов на стадии «сброса» являются разрушаемые контакты отдельных гранул.

Нарушенный в процессе динамического события контакт упрочняется на стадии относительного покоя. Непрерывный рост сдвигового усилия приводит к постепенному увеличению скорости скольжения и количества «смещений», что, в свою очередь, вызывает увеличение количества выделяемой сейсмоакустической энергии. В процессе сдвига интенсивность сейсмоакустической эмиссии изменяется в широких пределах – для стадий крипа и динамического срыва отличаются более чем на 3 порядка. Для получения взаимосвязи между изменением геомеханических параметров нарушения сплошности и параметров акустической эмиссии была проведена оценка изменения энергии АЭ в процессе сдвига. Для оценок изменения энергии АЭ использовалась формула для определения потока сейсмической энергии:

$$\Pi(t) = \frac{\rho c S_{\text{сеч}}}{\Delta t} \int_{t}^{t+\Delta t} v^2(t)dt, \qquad (1)$$

где ρ – плотность массива, c – скорость распространения сейсмических волн, $S_{\text{сеч}}$ – площадь вертикального сечения основания A, $v(t)$ – зарегистрированный сигнал АЭ, а величина Δt принималась равной 0.5 мс. Стоит отметить, что данная формула позволяет лишь качественно оценить изменение энергии АЭ со временем в предположениях, что за интервал Δt, излученная в процессе одиночного акта акустическая энергия, диссипирует в неподвижном блоке (из рис. 3 видно, что за Δt = 0.5 мс амплитуда регистрируемого сигнала затухает более чем в 2 раза) и изменение потока энергии АЭ связано с образованием новых дефектов структуры, а не с затуханием многократно отраженных акустических волн.

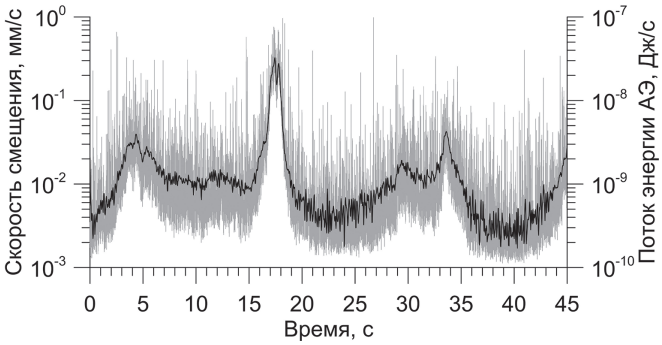

Рис. 5. Изменение скорости смещения (черный) и потока энергии АЭ (серый) со временем. Коэффициент корреляции между рядами 0.98

На рис. 5 представлены изменения потока акустической энергии АЭ и скорости смещения блока со временем при нестабильном режиме. Сравнительный анализ представленных данных показывает высокую корреляцию между рассматриваемыми величинами (коэффициент корреляции – 0.98), и функциональная зависимость между потоком энергии и скоростью деформации u, определенная методом наименьших квадратов, задается соотношением:

$$\Pi_s(t) = (6.2 \pm 0.8) \cdot 10^{-7} \cdot u(t)^{0,65 \pm 0.05}. \qquad (2)$$

Механизм излучения высокочастотных сигналов АЭ

Согласно представлениям ряда авторов [Sammis et al., 1987; Mair et al., 2002; Кочарян и др., 2013], возникновение динамических событий связано с возможностью формирования и разрушения расположенных поперек трещины силовых мезоструктур из нагруженных частиц. Упорядоченность и структурированность данных цепочек в среде непосредственно влияет на реализуемый режим деформирования.

Наличие структурных неоднородностей и «микротрещин» приводит к тому, что в процессе нагружения силовые мезоструктуры начинают постепенно разрушаться. В наиболее простом приближении будем предполагать, что разрушение происходит за счет раскрытия внутренних микротрещин и критическое напряжение необходимое для этого [Irwin, 1957]

$$\tau_{кр} = \frac{C_0}{\sqrt{l}}, \tag{3}$$

где l – размер неоднородности, C_0 – константа, зависящая от прочностных характеристик структуры.

Предположим, что распределение микротрещин в мезоструктуре аналогично распределению числа разломов от их длины [Turcotte, 1992], тогда вероятность наличия микротрещины зависит от её длины как

$$\rho(l) \sim \frac{1}{l^{1.0\div1.9}}, \tag{4}$$

и предположим, что ширина зоны «единичного акта» разрушения линейно зависит от длины разрушения $w = \alpha \cdot l$, тогда с учетом формулы (3) площадь разрушения в зависимости от НДС можно оценить следующим образом:

$$S_{разр}(\tau) = \int_{l_0}^{l_1} 2\alpha l \rho(l) dl = \frac{4\alpha}{C_0} \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{d\tau}{\tau^{1.1\div3.0}} = S_0 - \frac{C_1}{\tau^{0.1\div2.0}}, \tag{5}$$

где S_0 и C_1 – константы, зависящие от структурных параметров межблокового пространства. Тогда зависимость жесткости мезоструктур от величины сдвигового усилия можно записать как:

$$\kappa = \left(\frac{ES_{эфф}}{L} \right) = \frac{E(S_{мезоструктур} - S_{разр})}{L} = \kappa_0 + \frac{C_2}{\tau^{0.1\div2.0}}, \tag{6}$$

где κ_0 – константа, соответствующая жесткости структур в момент динамического события. Стоит отметить, что резкое уменьшение жесткости начинается только по достижению минимального значения сдвигового усилия τ_0, при котором начинается раскрытие «микротрещин». Аналогичный эффект – радикального снижения сдвиговой жесткости на стадии разупрочнения – наблюдался в работе [Кочарян, Остапчук, 2011]. Уменьшение сдвиговой жесткости приводит к увеличению скорости деформации, что в рамках «слайдер»-модели можно записать следующим образом:

$$\kappa(t) = \left(\frac{\partial \tau}{\partial x} \right) = \frac{KV_0}{u(t)} - K, \tag{7}$$

где K – жесткость нагружающей системы.

Относительное смещение берегов трещины приводит к появлению большого числа источников АЭ, расположенных в области мезоструктур. Число источников АЭ может быть оценено следующим образом:

$$dN = \frac{S_{\text{мезоструктур}}}{r^2} \cdot \frac{v(t)dt}{A_0}, \quad (8)$$

где $S_{\text{мезоструктур}}$ – размер мезоструктур, r – размер гранул, A_0 – площадь контакта гранул. Выделяемая одним источником сейсмоакустическая энергия e_{seism} будет зависеть от деформации зерен ε и «КПД» источника η и определяться как:

$$e_{seism} = \eta \frac{E\varepsilon^2}{2}. \quad (9)$$

Таким образом, выделяемая акустическая энергия будет равна

$$dE_s = e_{seism}\, dN \sim S_{\text{мезоструктур}} \eta \varepsilon^2 d\varepsilon. \quad (10)$$

Г.Г. Кочарян [Кочарян, 2013] показал, что излучательная эффективность источника увеличивается с масштабом события. Для разных регионов соотношение E_s/M_0 варируется от $E_s/M_0 \sim M_0^{0.001}$ до $E_s/M_0 \sim M_0^{0.6}$ (M_0 – сейсмический момент). Учитывая нелинейные свойства гранулированных сред $\varepsilon \sim \tau^{2/3}$ [Ландау, Лифшиц, 1987], а также формулы (6) и (7) получаем, что поток сейсмической энергии равен:

$$\Pi_s(t) = \frac{dE_s}{dt} \sim S_{\text{мезоструктур}} \eta \kappa \varepsilon^2 u \sim u(t)^{0.1 \div 1.3}. \quad (11)$$

Полученная выше зав исимость показывает, что поток сейсмической энергии увеличивается с ростом скорости деформации, и в зависимости от структурированности и свойств межгранулярного взаимодействия может существенно измениться. Полученные теоретические оценки хорошо согласуются с экспериментальными результатами.

Выводы

Выполненные лабораторные эксперименты продемонстрировали, что характеристики АЭ существенно изменяются при различных режимах деформирования, а сигнал АЭ может характеризовать состояние нарушения сплошности.

В зависимости от структурированности среды и механизма разрушения силовых цепочек реализуются различные моды высвобождения накопленной упругой энергии. На протяжении всего цикла «нагружение – сброс» источниками высокочастотных сигналов являются контакты отдельных гранул. А поток энергии сигналов определяется скоростью деформации нарушения сплошности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 14_17_00719).

Литература

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука. 1987.

Кочарян Г.Г. Жесткость разломной зоны как геомеханический фактор, контролирующий излучательную эффективность землетрясений в континентальной коре // ДАН. 2013. Т. 452. № 1. С. 87–91.

Кочарян Г.Г., Марков В.К., Остапчук А.А., Павлов Д.В. Мезомеханика сопротивлению сдвигу по трещине с заполнителем // Физическая мезомеханика. 2013.Т. 16. № 5. С. 5–15.

Кочарян Г.Г., Остапчук А.А. Изменение жесткости разломной зоны в ходе сейсмического цикла // ДАН. 2011. Т. 441. № 3. С. 384–387.

Chester F.M., Chester J.S. Ultracataclasite structure and friction processes of the Punchbowl fault, San Andreas system, California // Tectonophysics. 1998. Vol. 295. P. 199–221.

Irwin G. Analysis of Stresses and Strains near the End of a Crack Traversing a Plate // J. Appl. Mech. 1957. № 3. P. 361–364.

Johnson P.A., Ferdowski B., Kaproth B.M., et al. Acoustic emission and micrislip precursors to stick-slip failure in sheared franular material // J. Geophys. Res. 2013. V. 40. P. 1.

Mair K., Frye K. M., Marone C. Influence of grain characteristics on the friction of granular shear zones // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. B10. 2219.

Michlmayr G., Cohen D., Or D. Shear-induced force fluctuations and acoustic emissions in granular material // J. Geophys. Res. 2013. V. 118. P. 6086–6098.

Peng Z., Gomberg J. An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena // Nat. Geosci. 2010. V. 3. P. 599–607. Doi:10.1038/ngeo940.

Sammis C., King G., Biegel R. The kinematics of gouge deformation // PAGEOPH. 1987. Vol. 125. Issue 5. P. 777–812.

Sibson R.S. Thickness of the Seismic Slip Zone // BSSA. 2003. Vol. 93. № 3. P. 1169–1178.

Turcotte D.L. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. Cambridge: Cambridge University Press. 1992.

Wyss M., Habermann R.E. Precursory Seismic Quiescence // PAGEOPH. 1988. V. 126. № 2–4. P. 319–332

Yukalov V.I., Moura A., Nechad H. Self-similar law of energy release before materials fracture // J. Mech. Phys. Solids. 2004. V. 52. № 2. P. 453–465.

Zigone D., Voisin C., Larose E., et al. Slip acceleration generates seismic tremor like signals in friction experiments // J. Geophys. Res. 2011. V. 38. L01315.