

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 550.34; 622.83

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ МЕЖБЛОКОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Г. Г. Кочарян^{1,2}, А. А. Остапчук¹

¹Институт динамики геосфер РАН, E-mail: gevorgk@idg.chph.ras.ru,
Ленинский проспект, 38, корп. 1, 119334, г. Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, E-mail: ostap165@gmail.com,
Институтский пер. 9, 141700, г. Долгопрудный, Россия

Представлены результаты лабораторных экспериментов, в которых исследован сейсмоакустический эффект, наблюдаемый при различных режимах смещения по границам между блоками горной породы. Тот факт, что косейсмические перемещения при техногенных землетрясениях происходят по существующим границам раздела, служит основанием относительно простой постановки экспериментов на установке “слайдер”-модели. Использование различных материалов в качестве заполнителя трещины позволило смоделировать весь спектр возможных деформационных режимов. Последние, с известной долей условности, можно разделить на три группы. Первая — крип, или стабильное скольжение; вторая — нестабильное скольжение; третья — регулярное прерывистое скольжение, или стик-слип. Показано, что статистика акустических событий, излучаемых в процессе скольжения, описывается распределением Гутенберга–Рихтера. При этом наиболее крупные “характеристические” события при сдвиге происходят квазирегулярно с вероятностью значительно выше, чем следует из закона повторяемости. Установлена функциональная связь между потоком излученной энергии акустической эмиссии (АЭ) и скоростью деформации нарушения сплошности.

Горно-тектонический удар, техногенное землетрясение, разлом, режим деформирования, акустическая эмиссия, сейсмический мониторинг

ВВЕДЕНИЕ

Горно-тектонические удары и техногенные землетрясения являются наиболее разрушительными проявлениями горного давления. Такие события периодически наблюдаются как при добыче углеводородов (Газли, 1976 и 1984 гг.; Нефтегорск, 1995 г.), так и при разработке твердых полезных ископаемых [1–4]. Так, довольно сильные землетрясения периодически происходят в центральной части Кольского полуострова в результате добычи фосфатов на территории Хибинского горного массива и при извлечениях редкоземельных руд на территории Ловозерского массива. За период с 1989 по 2010 г. на месторождениях Кольского полуострова произошло 12 землетрясений с магнитудой более 3, спровоцированных ведением горных работ. В 90-е годы прошлого столетия в Хибинах ежегодно отмечалось до 10 опасных горно-тектонических

ударов с магнитудой 1.5–2. В настоящее время, в связи с применением специальных мероприятий по разгрузке напряжений в массиве, число таких событий снизилось до 1–3 в год. Освоение месторождений Печерского угольного бассейна привело к тому, что в прежде асейсмическом регионе произошли довольно крупные землетрясения (1995, 2000, 2005, 2012 гг.) с магнитудами до 4. Актуальным примером является невиданная прежде сейсмичность в Кузбассе, где 18.06.2013 г. зарегистрировано сильнейшее Бачатское землетрясение с магнитудой $M_L = 6.1$ [5]. Это событие оказалось третьим достаточно крупным землетрясением в районе угольного разреза “Бачатский” в течение 2012–2013 гг.

Опасность неконтролируемого изменения состояния земных недр убедительно демонстрируют процессы, происходящие в настоящее время в центральных регионах США, связанные с развертыванием работ по добыче сланцевого газа. Технология разработки таких месторождений требует проведения множества гидроразрывов, а огромное количество использованных при этом токсичных флюидов закачивается в глубокие горизонты для захоронения. Такое воздействие на горный массив вызывает нарушение флюидного режима и напряженного состояния обширных областей. И если в течение многих лет в этом регионе стабильно наблюдалось примерно 20 довольно крупных землетрясений ($M_L > 3$) в год, то после начала интенсивной разработки месторождений в 2001 г. сейсмическая активность начала увеличиваться и в 2011 г. зафиксировано уже не 20, а почти 200 землетрясений [6].

Известно, что в ряде случаев крупным техногенным землетрясениям предшествуют такие явления, как рои более мелких сейсмических событий, трансформация деформационного режима в окрестности разломных зон, разнообразные сейсмоакустические проявления. Развитые на многих горнодобывающих предприятиях системы сейсмического и деформационного мониторинга способны обеспечить наблюдательный материал, пригодный для осуществления прогноза крупных горных ударов, однако зачастую интерпретация получаемых результатов оказывается затрудненной из-за отсутствия адекватных моделей подготовки крупных межблоковых подвижек.

Модели процессов зарождения и эволюции динамических перемещений по границам структурных блоков в массиве горных пород могут быть развиты на основе лабораторных экспериментов, в которых рассматриваются как закономерности трансформации режима деформирования, так и параметры сейсмоакустических импульсов, излучаемых в ходе деформирования и разрушения образцов [7–9]. Весьма перспективными в этом плане являются также исследования, проводимые на основе современных численных методов [9–11].

При проведении лабораторных и численных экспериментов следует иметь в виду, что косейсмические перемещения во время крупных горных ударов и техногенных землетрясений чаще всего происходят по уже существующим поверхностям разломов и крупных тектонических трещин [12, 13]. Таким образом, исследования параметров сейсмоакустической эмиссии при разрушении образцов не могут адекватно описать закономерности подготовки межблоковых подвижек.

Локализация сдвига в очень узкой центральной части разлома [14] может в известной степени служить основанием простой постановки лабораторных экспериментов и поиска качественных соответствий между полученными результатами и явлениями, наблюдаемыми в природе.

В настоящей статье рассматриваются результаты лабораторных экспериментов, направленных на исследование особенностей сейсмоакустических проявлений различных режимов смещений по границе между блоками горной породы.

РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ СДВИГОВОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Долгое время предполагалось, что накопившиеся избыточные напряжения в земной коре снимаются либо посредством землетрясений при “мгновенном” срыве заблокированных участков разломов, либо через непрерывное асейсмическое скольжение. Открытие и исследование в последние два десятилетия таких явлений, как низкочастотные землетрясения, очень низко-

частотные землетрясения, “невулканический” или “тектонический” тремор, эпизоды медленно-го скольжения в значительной степени изменяют понимание того, как реализуется энергия, накопленная в процессе деформирования массива горных пород [15]. Понятно, что при разных режимах деформирования воздействие на техногенные объекты будет сильно различаться. Если при динамическом срыве излучаются интенсивные сейсмические волны, то при медленных деформационных режимах сейсмическое воздействие значительно слабее, а зачастую и пренебрежимо мало.

В проведенных лабораторных экспериментах смоделированы разные режимы скольжения по нарушению сплошности горного массива. Опыты проводились на установке типа “слайдер”-модели, подробное описание которой можно найти, например, в работе [16]. Мраморный блок размером $8 \times 8 \times 3$ см³ располагался на неподвижном гранитном основании. Контакт между шероховатыми поверхностями заполнялся слоем дискретного гранулированного материала. Толщина межблокового контакта составляла около 2 мм. Нормальное напряжение прикладывалось к блоку через специальное приспособление, которое исключало появление сдвиговых усилий на верхней грани подвижного блока. Сдвиговое усилие прикладывалось через пружинный блок, жесткость которого могла изменяться. Скорость деформации пружин V_0 была постоянной и составляла 20 мкм/с.

Создаваемые сдвиговые усилия контролировались пьезодатчиком силы CFT/5kN, динамика относительного перемещения блоков — лазерным датчиком перемещения ILD2220-10 (рабочая полоса частот 0–5 кГц, точность измерения 0.1 мкм). Излучаемый в процессе сдвига сигнал АЭ регистрировался датчиком GT301 с полосой пропускания 50–500 кГц.

В качестве заполнителя трещины использовались разные материалы: кварцевый песок, гранитная крошка, хлористый натрий, стеклянные шарики и др. Гранулометрический состав материала характеризовался средним размером зерна δ_0 и шириной распределения n . Последний параметр представляет собой показатель степени в распределении Розина–Раммлера [17]. Структурные и физико-механические характеристики материалов-заполнителей можно найти в работе [16].

Как показали ранее проведенные исследования, использование различных материалов в качестве заполнителя трещины позволяет реализовать весь спектр деформационных режимов — от динамического срыва, до стабильного скольжения. В качестве ключевого параметра, характеризующего режим, реализованный в эксперименте, удобно использовать максимальную скорость скольжения. Примеры зависимостей смещений и скоростей смещений блока от времени представлены на рис. 1.

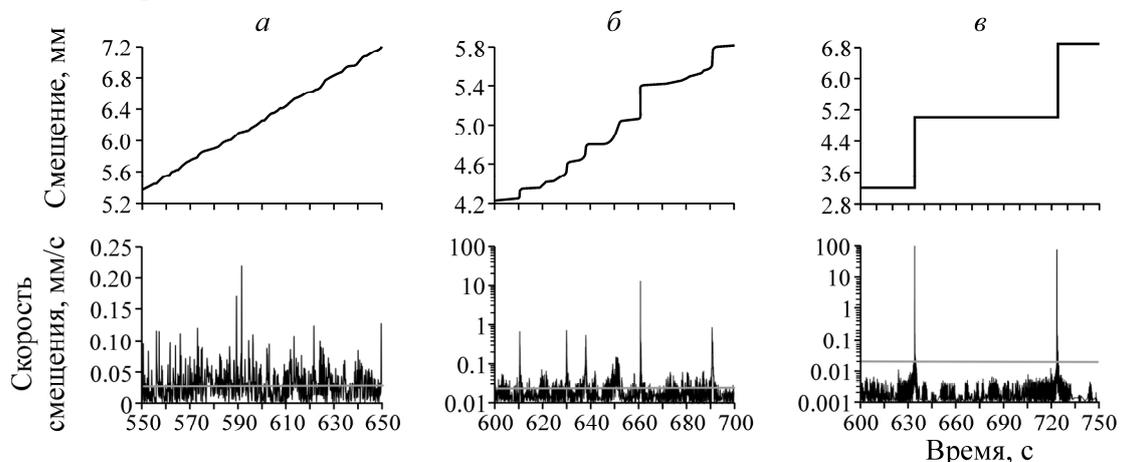


Рис. 1. Зависимости изменения смещения и скорости блока от времени: а — стабильное скольжение; б — нестабильное; в — прерывистое скольжение

Можно видеть, что стабильное скольжение (рис. 1а) состоит из участков ускорения и замедления, однако максимальная скорость смещения в этом случае на 2–3 порядка ниже, чем при прерывистом скольжении (стик-слипе). При стабильном режиме максимальная скорость на стадии микросрыва варьирует от 30 до 200 мкм/с, а относительное изменение сдвигового усилия $\Delta\tau/\tau_{\max}$ (сброс напряжений) составляет менее 0.01.

Для режима нестабильного скольжения (рис. 1б) характерно наличие интервалов как условно-стабильного скольжения, так и отдельных актов динамических срывов. При этом скорости скольжения изменяются в широком диапазоне от 0.2–1 мм/с для медленных динамических подвижек продолжительностью 1–5 с до 5–10 мм/с для динамических срывов. Для данного режима относительная амплитуда сброса сдвиговых напряжений $\Delta\tau/\tau_{\max}$ составляет 0.05–0.2.

В процессе регулярного прерывистого скольжения (рис. 1в) контакт, нарушенный в процессе динамического срыва, упрочняется на стадии относительного покоя, на которой скорость смещения блока мала и не превышает 0.5 мкм/с. Макроскопические проявления процесса деформирования определяются свойствами материала-заполнителя. Для некоторых материалов, например фракция стеклянных шариков с $\delta_0 = 170$ мкм, накопление энергии упругой деформации приводит к постепенному увеличению скорости скольжения и величины межблокового перемещения, что в свою очередь вызывает разупрочнение контакта. При этом непосредственно перед срывом скорость смещения увеличивается радикально. Для других заполнителей, например фракция гранитной крошки с $\delta_0 = 70$ мкм, постепенного увеличения скорости не наблюдается, а эффект разупрочнения происходит после очень малого перемещения непосредственно перед срывом.

При использовании разных заполнителей максимальная скорость смещения блока в процессе динамического срыва меняется от 0.1 до 20 см/с, а относительная амплитуда сброса сдвиговых напряжений $\Delta\tau/\tau_{\max}$ составляет 0.05–0.4. В ходе регулярного стик-слипа наблюдается хорошая повторяемость параметров при повторных циклах.

Анализ влияния характеристик материала-заполнителя трещин на режим деформирования выходит за рамки настоящей статьи. Отметим лишь, что при близких значениях кулоновской прочности небольшие вариации структурных характеристик (гранулометрический состав, форма зерен, наличие флюида и его вязкость) могут радикально сказываться на режиме деформирования [16].

При нестабильном скольжении статистика динамических срывов хорошо описывается законом повторяемости Гутенберга–Рихтера [18]. При этом ширина распределения частиц по размерам определяет и соотношение между количеством сильных и слабых событий. На рис. 2 приведены графики повторяемости динамических срывов для грунтов с различной шириной распределения. Значками показаны результаты измерений, а линиями — наилучшее приближение уравнением $\lg N = a - b(\Delta\tau/\tau_{\max})$. Можно видеть, что для заполнителей с более узким гранулометрическим составом ($n = 2$) наблюдается уменьшение доли слабых событий, т. е. увеличивается вероятность сильного динамического события.

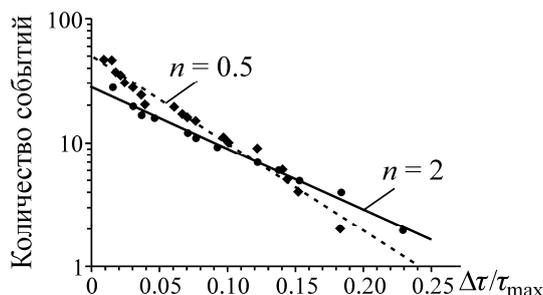


Рис. 2. График повторяемости динамических событий для заполнителей из гранитной крошки с одинаковым средним размером зерен $\delta_0 = 330$ мкм и разной шириной распределения n

СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

В ходе экспериментов зарегистрированы сигналы акустической эмиссии (АЭ), характерные для различных мод высвобождения накопленной упругой энергии. Примеры зарегистрированных сигналов приведены на рис. 3.

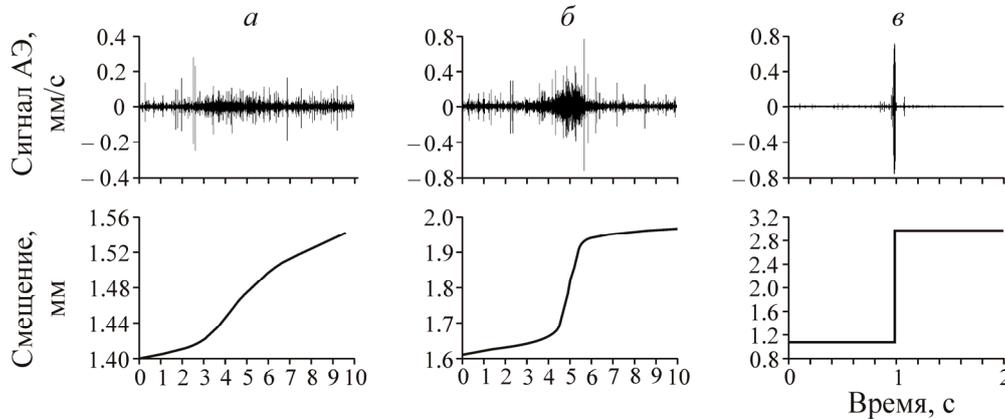


Рис. 3. Зависимости изменения сигнала АЭ и смещения блока от времени: *a* — стабильное скольжение; *б* — медленная подвижка; *в* — динамический срыв

При стабильном скольжении (рис. 3а) излучение состоит из сигналов трех типов. Во-первых, это акустический шум со среднеквадратичной амплитудой 5–15 мкм/с. Подчеркнем, что в состоянии покоя уровень фона в несколько раз ниже. Во-вторых, это волновые пакеты со среднеквадратичной амплитудой в 1.5–3 раза выше шумовых сигналов продолжительностью 2–6 с, не имеющих четких вступлений. Среднеквадратичная амплитуда этих колебаний постепенно нарастает, достигая максимума, а затем медленно снижается. По форме эти сигналы напоминают вышеупомянутый “тремор”, который в “большой сейсмологии” связывают с излучением мелких распределенных источников в процессе медленного скольжения по границам крупных тектонических блоков [15, 19]. В процессе квазистабильного скольжения излучение четко выраженных тремор-подобных сигналов происходит на стадии ускоренного движения блока со скоростью смещения выше 40 мкм/с, т. е. превышающей скорость деформации нагружающего устройства более чем в 2 раза. Третий тип сигнала — “отдельные импульсы” — короткие (сотни микросекунд) пакеты с резким вступлением и формой, характерной для динамических событий, связанных с образованием дефектов. Вид такого импульса и его спектр показаны на рис. 4а. Этот тип излучения наблюдается на стадии увеличения приложенного сдвигового напряжения при всех режимах деформирования, однако в зависимости от режима и стадии нагружения частота следования таких импульсов меняется от одиночных “щелчков” с промежутками в десятки секунд до регулярно повторяющихся сигналов со скважностью 2–3 мс. При стабильном скольжении амплитуда импульсов чаще всего не превышает 0.1 мм/с.

Сигналы АЭ, генерируемые при медленных подвижках (рис. 3б), имеют схожую с тремором форму и характеризуются плавным возрастанием среднеквадратичной амплитуды примерно до 50–100 мкм/с и последующим плавным убыванием до фонового уровня, при этом среднеквадратичная амплитуда сигнала превышает уровень акустического шума более чем в 5 раз. Продолжительность сигналов составляет 0.5–3 с. По сравнению с тремором, при стабильном скольжении наблюдается значительно большее количество одиночных импульсов АЭ с амплитудами 0.3–0.4 мм/с.

Во время динамического срыва в ходе прерывистого скольжения (рис. 3в) излучается короткий (~30 мс) сигнал АЭ, среднеквадратичная амплитуда которого в 100–1000 раз превышает уровень сигналов при стабильном скольжении.

Амплитудные спектры сигналов АЭ разных типов представлены на рис. 4. Спектр “отдельного импульса” характеризуется двумя максимумами в полосе частот 80–110 кГц и 370–400 кГц. В свою очередь, спектры сигналов АЭ, связанные с динамическими событиями, характеризуются одним максимумом в полосе частот 80–120 кГц, что соответствует сейсмическим волнам с длиной несколько сантиметров. Данная область характерна для всех исследуемых фракций вне зависимости от структуры материала-заполнителя. Вероятно, этот частотный диапазон определяется макропараметрами нарушения сплошности.

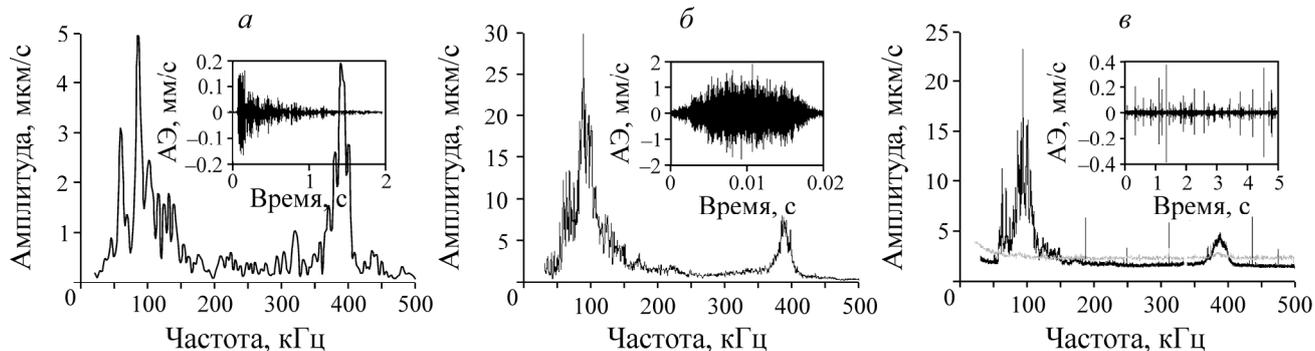


Рис. 4. Спектры сигналов АЭ: *a* — “отдельный импульс”; *б* — сигнал, зарегистрированный при динамическом срыве; *в* — сигнал при крипе (серая кривая — спектр фонового шума)

На стадии подготовки динамического события непрерывный рост сдвигового усилия приводит к постепенному увеличению скорости скольжения блока и количеству микроподвижек гранул, т. е. излучению сигналов АЭ. В каждом эксперименте при помощи соотношения

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

оценивался поток акустической энергии, осредненный во временном интервале $\Delta t = 500$ мкс. Здесь ρ — плотность блока; $S_{\text{сеч}}$ — площадь его сечения; c — скорость распространения колебаний; $v(t)$ — зарегистрированный сигнал АЭ.

Расчетами установлено, что при динамическом срыве поток акустической энергии превышает соответствующую величину при стабильном скольжении более чем на 4 порядка.

Сравнительный анализ закономерностей изменения во времени потока акустической энергии и скорости смещения блока $u(t)$ (рис. 5) показывает высокую корреляцию между этими величинами (коэффициент корреляции между рядами 0.95). Функциональная связь потока энергии и скорости относительного смещения блоков имеет вид степенной функции $\Pi(t) \sim (u(t))^m$, показатель степени которой изменялся в диапазоне $m \sim 0.6 \div 1.0$.

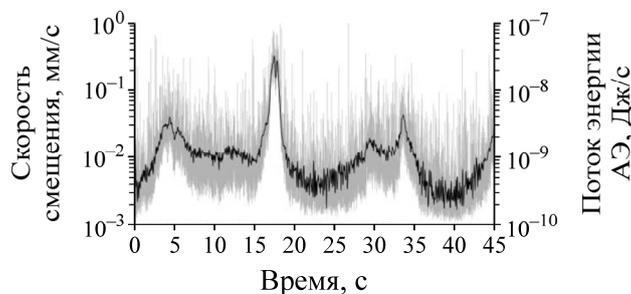


Рис. 5. Изменение скорости деформации трещины $u(t)$ (черная кривая) и потока энергии АЭ $\Pi(t)$ (серая кривая) со временем. Заполнитель — гранитная крошка ($\delta_0 = 330$ мкм, $n = 2$), скорость деформации пружины $V_0 = 20$ мкм/с

Анализ параметров АЭ при регулярном прерывистом скольжении показал, что в зависимости от структуры и характеристик материала-заполнителя можно выделить три характерных типа закономерного изменения параметров АЭ. Типичные зависимости изменения параметров АЭ в процессе стик-слипа представлены на рис. 6. Наблюдаемые события АЭ большой амплитуды (незакрашенные кружки) связаны с динамическими срывами (относительными смещениями блоков); низкоамплитудные акустические события (закрашенные кружки) обусловлены микроподвижками гранул — локальной перестройкой структуры заполнителя. Энергия событий-предвестников в среднем на 3–4 порядка меньше энергии, излучаемой в процессе динамических срывов.

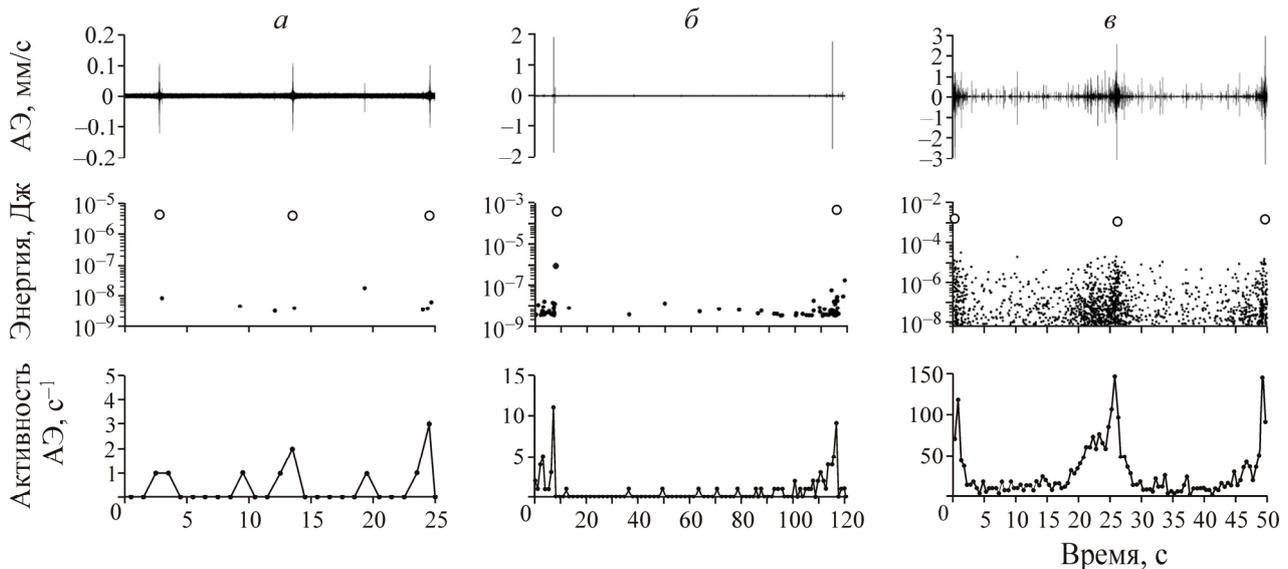


Рис. 6. Изменение параметров АЭ со временем в процессе прерывистого скольжения: *а* — заполнитель — отсеянная фракция гранитной крошки, $\delta_0 = 70$ мкм, $n = 4$; *б* — заполнитель — NaCl, $\delta_0 = 350$ мкм, $n=3$; *в* — заполнитель — стеклянные шарики, $\delta_0 = 170$ мкм, $n = 2$

В первом случае (рис. 6*а*) импульсы-предвестники, предвещающие основной динамический срыв, практически отсутствуют. Межблоковые подвижки происходят без каких-либо выраженных предшествующих сейсмоакустических эффектов. На межсейсмической стадии наблюдаются единичные импульсы, амплитуда которых превосходит шум, как правило, не более чем на порядок.

При прерывистом скольжении второго типа (рис. 6*б*) события-предвестники значимой амплитуды появляются на заключительной стадии цикла, составляющей 5–15 % от полного времени между динамическими срывами. Энергия предвестников на 3–4 порядка меньше энергии акустических событий, связанных с динамическими срывами, но на 1–2 порядка выше шума.

При стик-слипе третьего типа (рис. 6*в*) в течение всего процесса регистрируется значительное количество акустических событий разной интенсивности. Закономерности изменения акустической активности хорошо согласуются со стадиями цикла деформирования. После динамического срыва количество импульсов быстро снижается и достигает минимального уровня через 3–5 с. Далее наблюдается стадия упрочнения контакта, активность АЭ на которой постоянна и не превышает в наших экспериментах 20 событий/с. На заключительной стадии по мере приближения к динамическому срыву активность АЭ начинает постепенно увеличиваться. При этом происходит увеличение доли высокоамплитудных событий-предвестников. Длительность этой стадии составляет порядка 20 % полного времени цикла.

Существенно иная картина эволюции параметров акустической эмиссии наблюдается в процессе нестабильного скольжения (рис. 7а). С известной степенью условности деформационные события, имеющие место в ходе нестабильного скольжения, можно разделить на три класса: крип со скоростью смещения менее 0.1 мм/с (эти участки обозначены буквой *K*), медленные подвижки со скоростью смещения 0.1–1 мм/с (*T*), динамические срывы со скоростью смещения свыше 1 мм/с (*C*).

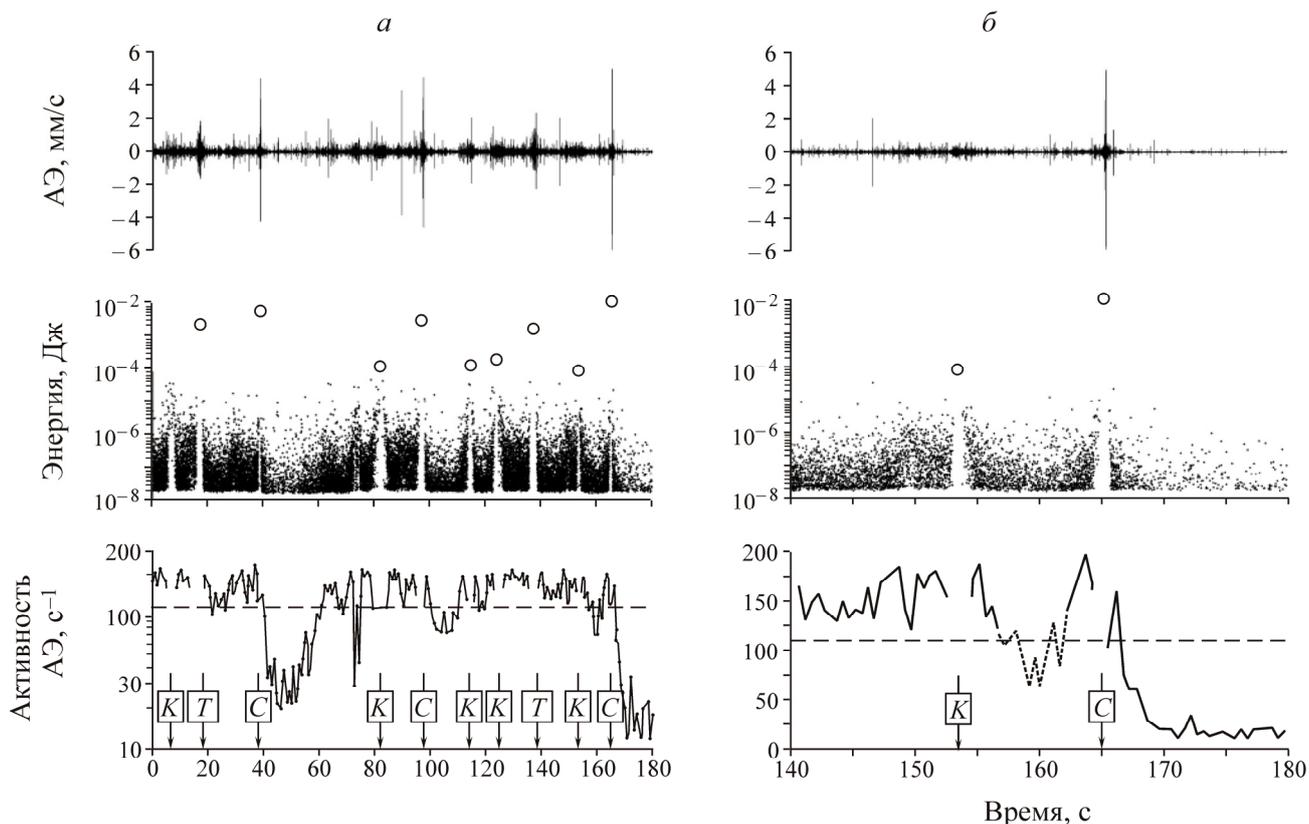


Рис. 7. Изменения параметров АЭ: *а* — в процессе нестабильного скольжения; *б* — на стадии акустического затишья. Заполнитель — гранитная крошка ($\delta_0 = 330$ мкм, $n = 2$). Штриховая линия соответствует минимальному среднему уровню активности АЭ в эксперименте

Ни перед участками крипа, ни перед медленными подвижками не было обнаружено каких-либо характерных изменений параметров АЭ. Акустическая активность до и после этих деформационных событий изменяется незначительно и составляет 100–200 событий/с. Энергия, выделяемая при *K* и *T* событиях, превосходит энергию фоновых событий на 1–2 порядка.

При динамических срывах отмечается существенное изменение акустической активности. После динамического срыва количество импульсов снижается со временем по степенному закону, аналогичному закону Омори [20]. После достижения минимального уровня активность АЭ сразу начинает увеличиваться. Для участков деформационного цикла с активностью менее 100 событий/с характерны слабые события с энергиями на 3–4 порядка ниже величины акустической энергии, излучаемой при динамическом срыве.

При нестабильном режиме скольжения перед крупными динамическими срывами со скоростью смещения свыше 10 мм/с можно обнаружить эффект “затишья” — участки относительного уменьшения активности АЭ (рис. 7б). В представленном случае стадия затишья наступает после криповой подвижки *K* длительностью 1.5 с, произошедшей в момент времени 154 с со ско-

ростью смещения около 40 мкм/с. Подвижка K привела к перестройке структуры материала-заполнителя и способствовала формированию хорошо упорядоченных силовых мезоструктур. Вследствие этого скорость деформации уменьшилась до 1 мкм/с, а активность АЭ снизилась до 70 событий/с. Продолжительность стадии затишья составила 5 с при времени между деформационными событиями K и C около 13 с.

Эффект затишья, наблюдаемый при нестабильном скольжении, аналогичен снижению активности на межсейсмической стадии прерывистого скольжения и связан с консолидацией материала-заполнителя перед последующим разупрочнением. Статистика слабых акустических событий, излучаемых в процессе сдвигового деформирования, описывается законом повторяемости Гутенберга–Рихтера [18]. На рис. 8 приведено распределение вероятностей акустических событий как функции энергии. Можно видеть, что события с $E < 10^{-3}$ Дж удовлетворительно описываются соотношением

$$\lg\left(\frac{N}{N_{\text{общ}}}\right) = a - b \lg(E), \quad (2)$$

где $N_{\text{общ}}$ — суммарное число зарегистрированных акустических событий.

Для всех исследованных заполнителей коэффициент b в соотношении (2) (b -value в сейсмологической терминологии) изменялся в диапазоне 0.6–1.1. Интересно, что и для природной, и для техногенной сейсмичности характерные значения b -value лежат примерно в том же диапазоне — от 0.5 до 1.5 [21].

В этой статистике особняком стоят мощные акустические импульсы с $E > 10^{-3}$ Дж, связанные со сдвигом структурных блоков. Эти события образуют отдельный пик (справа на рис. 8) и не подчиняются закону Гутенберга–Рихтера. Аналогичный эффект наблюдается и в природе. Так, среди различных динамических событий, приуроченных к некоторым разломным зонам, отдельное место занимают сильные землетрясения, квазипериодически повторяющиеся во времени, так называемые “характеристические” землетрясения [22]. Их вероятность обычно оказывается существенно выше, чем следует из закона повторяемости. Считается, что магнитуда этих событий определяется некоторым характерным размером разлома. Наиболее известными подобными событиями являются регулярно повторяющиеся на сегменте разломной зоны Сан-Андреас в районе Паркфилда (Калифорния) землетрясения с магнитудой $M \sim 6$ [22]. В лабораторных экспериментах в качестве такого характерного размера выступает длина контакта между блоками.

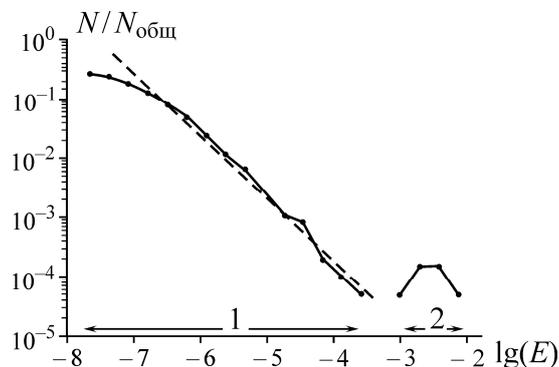


Рис. 8. Вероятность появления события АЭ в зависимости от $\lg(E)$ при нестабильном режиме скольжения. Заполнитель — гранитная крошка с $\delta_0 = 330$ мкм и $n = 2$. Область 1 — события-предвестники, описываемые законом распределения Гутенберга–Рихтера, область 2 — характеристические события. Штриховая линия — соотношение $\lg(N/N_{\text{общ}}) = -8.0 - 1.1 \lg(E)$

ВЫВОДЫ

Выполненные лабораторные эксперименты позволили рассмотреть особенности сейсмоакустического эффекта при различных режимах деформирования нарушения сплошности. Установлено, что поток излучаемой энергии зависит от скорости смещения по разлому по степенному закону $P(t) \sim (u(t))^m$. При крипе и медленных подвижках характерная форма волновых пакетов показывает, что излучение связано как с мелкими распределенными источниками (продолжительные сигналы, не имеющие четких вступлений), так и с образованием дефектов структуры (короткие импульсы с резким вступлением).

При динамических срывах в процессе стик-слипа излучаются короткие высокоамплитудные сигналы. Параметры акустической эмиссии на стадии подготовки динамического события в значительной степени определяются структурой заполнителя трещины. Выделено три типа прерывистого скольжения. В первом случае межблоковые подвижки происходят без каких-либо выраженных предшествующих сейсмоакустических эффектов. При прерывистом скольжении второго типа события-предвестники значимой амплитуды появляются на заключительной стадии цикла, составляющей 5–15 % от полного времени между динамическими срывами. При стик-слипе третьего типа в течение всего процесса регистрируется значительное количество акустических событий, интенсивность которых хорошо коррелирует со стадиями процесса деформирования, снижаясь при упрочнении контакта и возрастая по мере приближения неустойчивости.

Режим нестабильного скольжения характеризуется постоянным высоким уровнем активности АЭ. Значимые вариации уровня акустической активности наблюдаются только до и после сильных динамических срывов. Перед возникновением крупной неустойчивости наблюдается временное снижение активности — период затишья; после срыва количество импульсов спадает со временем по степенному закону, аналогичному закону Омори.

Статистика слабых акустических событий, излучаемых в процессе скольжения, описывается распределением вероятностей Гутенберга–Рихтера. При этом наиболее крупные “характеристические” события при сдвиге происходят квазирегулярно с вероятностью значительно выше, чем следует из закона повторяемости, и не могут быть описаны распределением Гутенберга–Рихтера.

Полученные результаты демонстрируют необходимость проведения детального анализа материала, получаемого при осуществлении сейсмического мониторинга на горнодобывающих предприятиях. Выявление характерных особенностей сейсмоакустического режима локального участка массива горных пород, содержащего разлом или крупные тектонические трещины, может оказаться весьма полезным при построении геомеханической модели объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В. В. Сильные природно-техногенные землетрясения как особый вид триггерной сейсмичности // Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы II Всерос. семинара-совещания / под ред. В. В. Адушкина, Г. Г. Кочаряна. — М.: ГЕОС, 2013.
2. Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Востриков В. И. и др. О возможных причинах увеличения сейсмической активности шахтных полей рудников “Октябрьский” и “Таймырский” Норильского месторождения в 2003 г. Ч. I. Сейсмический режим // ФТПРПИ. — 2004. — № 4.
3. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия / Опарин В. Н. и др.; отв. ред. Н. Н. Мельников. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012.

4. Назаров Л. А., Назарова Л. А., Ярославцев А. Ф., Мирошниченко Н. А., Васильева Е. В. Эволюция полей напряжений и техногенная сейсмичность при отработке месторождений полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2011. — № 6.
5. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Лескова Е. В., Шевкунова Е. В., Подкорытова В. Г. Крупнейший техногенный сейсмический процесс на земле. Бачатское землетрясение 18.06.2013 г. ($M_L = 6.1$, Кузбасс) // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. (8–18 апреля 2014 г.): Междунар. науч. конф. “Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология”: сб. материалов, Т. 2. — Новосибирск, 2014.
6. Ellsworth W. L. Injection-induced earthquakes, *Science*, 2013, 341, 1225942.
7. Соболев Г. А., Пономарев А. В. Физика землетрясений и предвестники. — М.: Наука, 2003.
8. Бобряков А. П. Моделирование динамических проявлений деформированной блочной среды в стеснённых условиях // ФТПРПИ. — 2012. — № 6.
9. Усольцева О. М., Назарова Л. А., Цой П. А., Назаров Л. А., Семенов В. Н. Исследование генезиса и эволюции нарушений сплошности в геоматериалах: теория и лабораторный эксперимент // ФТПРПИ. — 2013. — № 1.
10. Клишин С. В., Микенина О. А. О коэффициенте бокового распора случайных упаковок дискретных элементов // ФТПРПИ. — 2013. — № 6.
11. Клишин С. В., Микенина О. А., Ревуженко А. Ф. Деформирование сыпучего материала вокруг жесткого цилиндрического включения // ФТПРПИ. — 2014. — № 2.
12. Сырников Н. М., Тряпицын В. М. О механизме техногенного землетрясения в Хибинах // ДАН СССР. — 1990. — Т. 314. — № 4.
13. Heesakkers V., Murphy S., Reches Z. Earthquake rupture at focal depth, Part I, structure and rupture of the pretorius fault, TauTona Mine, South Africa, *Pageoph*, 2011, Vol. 168.
14. Kocharyan G. G., Ostapchuk A. A., Markov V. K., Pavlov D. V. Some questions of geomechanics of the faults in the continental crust, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2014, Vol. 50, No. 3.
15. Peng Z., Gombert J. An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena, *Nature geosciences*, 2010, 3, 599-607.
16. Kocharyan G. G., Markov V. K., Ostapchuk A. A., Pavlov D. V. Mesomechanics of shear resistance along a filled crack, *Physical Mesomechanics*, 2014, Vol. 17, No. 2.
17. Кузнецов В. М. Математические модели взрывного дела. — Новосибирск: Наука, 1977.
18. Gutenberg B., Richter C. Seismicity of the earth and its associated phenomena, Princeton, N. J.: Princeton University Press, 1949.
19. Nadeau R. M., Dolenc D. Nonvolcanic tremors deep beneath the san andreas fault, *Science*, 2005, Vol. 307.
20. Omori F. On the aftershocks of earthquakes, *Journal of College of Science, Imperial University of Tokyo*, 1894, Vol. 7.
21. Касахара К. Механика землетрясений. — М.: Мир, 1985.
22. Ben-Zion Y. Collective behavior of earthquakes and faults: Continuum-discrete transitions, progressive evolutionary changes, and different dynamic regimes, *Rev. Geophys.*, 2008, Vol. 46, RG4006.

Поступила в редакцию 15/VIII 2014