

АКУСТИКА СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ
ТВЕРДЫХ ТЕЛ. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

УДК 534.4;550.343

ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ
ПРИ СДВИГОВОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ТРЕЩИНЫ

© 2016 г. А. А. Остапчук, Д. В. Павлов, В. К. Марков, А. В. Крашенинников

Институт динамики геосфер РАН
119334 Москва, Ленинский просп. 38/1
E-mail: ostapchuk@idg.chph.ras.ru
Поступила в редакцию 04.09.2015 г.

Исследованы акустические проявления различных режимов сдвигового деформирования трещины, заполненной тонким слоем гранулированного материала. Установлено, что наблюдаемый акустический портрет определяется структурой трещины на мезоуровне. Совместный анализ активности акустических импульсов и их спектральных характеристик позволяет судить о внутренних эволюционных процессах, происходящих в тонком слое межблокового контакта, и рассматривать процесс деформирования трещины как эволюцию самоорганизующейся системы.

Ключевые слова: трещина, гранулированная среда, режим деформирования, волновой портрет, обратный закон Омори.

DOI: 10.7868/S0320791916040134

1. ВВЕДЕНИЕ

Наибольшие разрушения при землетрясениях обусловлены колебаниями земной поверхности при прохождении сейсмических волн. Излучение сейсмических волн происходит в результате высвобождения накопленной в земной коре энергии деформации. Долгое время предполагалось, что накопленная энергия реализуется либо через нормальные землетрясения, либо через непрерывное асейсмическое скольжение [1, 2].

В последние десятилетия геофизиками были открыты и классифицированы новые деформационные явления, связанные с относительным перемещением берегов разломов [3–5]. Низкочастотные землетрясения характеризуются более низкой скоростью распространения разрыва $V_r \sim 50\text{--}1000$ м/с, чем нормальные землетрясения ($V_r \sim 1500\text{--}3000$ м/с), а длительность низкочастотных событий на порядок выше. Очень низкочастотные землетрясения характеризуются длительностью, равной десяткам секунд, и скоростью $V_r \sim 10\text{--}100$ м/с. В отличие от нормальных землетрясений, амплитуда сейсмического сигнала, излучаемого при очень низкочастотных землетрясениях, практически не изменяется. Деформационные события со столь малой скоростью подвижки, что сейсмическое излучение не регистрируется современными инструментами, называются явлениями медленного скольжения. Продолжительность эпизодов медленного скольжения, например, для зоны Cascadia, составляет от 10 дней до нескольких недель. Результаты измерений показывают, что посредством медленных

движений может высвобождаться значительная (~40%) часть упругой энергии, запасенной в процессе деформирования разломов земной коры [6]. Открытие новых явлений в значительной степени изменяет наше понимание того, как реализуется энергия, накопленная в земной коре, и заставляет пересмотреть физические принципы, которые лежат в основе моделей геомеханических процессов, протекающих в разломных зонах.

В сейсмоактивных зонах косейсмические смещения локализованы в узкой центральной части разлома [7, 8]. Как правило, центральная часть разлома сложена перетертым гранулированным материалом (англ. gouge), механические и физические свойства которого существенно отличаются от свойств окружающего массива [9, 10]. Для того чтобы продвинуться в понимании механики очага землетрясения, необходимо, в том числе, разобраться в закономерностях деформирования нарушений сплошности, заполненных гранулированным материалом.

Модели зарождения и эволюции различных деформационных событий могут быть развиты на основе простых лабораторных экспериментов, в которых исследуются закономерности деформирования тонких гранулированных слоев. В процессе деформирования механические свойства гранулированных сред определяются закономерностями формирования образующихся в среде конгломератов нагруженных частиц [11–13]. В процессе сдвига эти так называемые силовые цепочки испытывают повторяющиеся циклы формирования, нагружения и разрушения. Перестройка и разрушение силовых цепочек сопро-

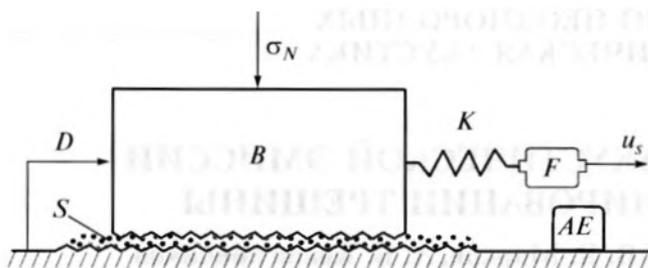


Рис. 1. Схема проведения эксперимента.

вождаются излучением упругих волн. Эти волны несут важную информацию об актах перестройки и разрушения силовых цепочек [14].

Исследованию различных режимов сдвигового деформирования тонких гранулированных слоев посвящено множество работ. Изучалось влияние геометрии и размера гранул на формирование режима деформирования, исследовалась трансформация режима деформирования при наличии флюида и т.д. [15–17]. Исследования внутренних динамических процессов, происходящих при деформировании модельных трещин, проводятся с использованием акустико-эмиссионных методов. Установлено, что различные моды деформирования нарушения сплошности сопровождаются излучением различных акустических сигналов [18, 19]. В статьях, посвященных подготовке динамических событий, рассматривается, как правило, только режим прерывистого скольжения. Показано, что перед динамическими срывами наблюдается степенной рост количества акустических импульсов и микроподвижек [20]. Обнаружено, что на стадии подготовки динамических срывов излучаются высокочастотные (30–80 кГц) акустические импульсы, а динамический срыв проявляется в виде низкочастотного (<20 кГц) акустического сигнала [21]. Исследования событий медленного скольжения как независимых событий практически не проводились. Ранее данные события рассматривались только как предвестники динамического срыва [22, 23].

В настоящей статье представлены результаты лабораторных экспериментов, в которых исследовались акустические проявления различных режимов сдвигового деформирования нарушения сплошности и установлены соответствия между параметрами сигналов акустической эмиссии и внутренними процессами, происходящими в зоне межблокового контакта.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты были проведены в классической постановке “слайдер”-модели, в которой блок под действием приложенного сдвигового усилия скользит по поверхности раздела (рис. 1).

Гранитный блок B размером $8 \times 8 \times 3$ см располагался на гранитном основании. Контакт S между шероховатыми поверхностями заполнялся слоем гранулированного материала толщиной ~ 3 мм. Нормальная нагрузка σ_N была приложена через специальное устройство, которое исключало появление дополнительных сдвиговых усилий, и составляла 81 кПа. Сдвиговое усилие прикладывалось через пружинный элемент K с жесткостью 40 Н/мм. Скорость деформирования u_s пружинного элемента составляла 20 мкм/с.

Сдвиговое усилие контролировалось датчиком силы (F) CFT/5kN (HBM, Германия) с точностью 1 Н, а динамика относительного смещения блоков – лазерными датчиками ILD2220-10 (MicroEpsilon, Германия) в диапазоне частот 0–5 кГц с точностью 0.1 мкм. Сигналы акустической эмиссии (АЭ), излучаемые в процессе сдвига, регистрировались датчиками (АЭ) GT 301 в частотной области 50–500 кГц и GT 205 в частотной области 30–100 кГц (GlobalTest, Россия). При проведении экспериментов работа нагружающего устройства и внешние акустические сигналы не влияли на параметры регистрируемых сигналов АЭ. Уровень шума канала не превышал 8 мкм/с (4×10^{-3} отн. ед.). В качестве заполнителя трещины использовались различные природные и искусственные материалы: кварцевый песок, гранитная крошка, сухая глина, тальк, соль, стеклянные шарики. В ряде случаев заполнитель был смочен небольшим (0.1% по массе) количеством флюида или смешан с корундом с массовой долей 2%.

2.1. Динамические события различного типа

Под динамическим событием в дальнейшем будем понимать акт относительного проскальзывания блоков с максимальной скоростью, превышающей скорость деформирования пружины, т.е. 20 мкм/с. Анализ изменения кинематических параметров показал, что все реализованные динамические события условно можно разделить на три класса [24]. События с максимальной скоростью смещения V_m менее 0.1 мм/с будем называть “эпизодами ускоренной ползучести”, события со скоростью V_m от 0.1 до 1–2 мм/с – медленными срывами, события со скоростью V_m более 2 мм/с – динамическими срывами. Примеры динамических событий различного типа представлены на рис. 2. В зависимости от свойств материала-заполнителя динамические события одного типа могут быть реализованы либо как регулярно повторяющиеся (регулярный режим), либо как случайные стохастические (нерегулярный режим).

Согласно [24], закономерности формирования различных режимов деформирования определяются структурными свойствами трещины. Отметим некоторые факторы, определяющие формирование определенного режима деформирования: увеличение доли “гладких” (сферических)

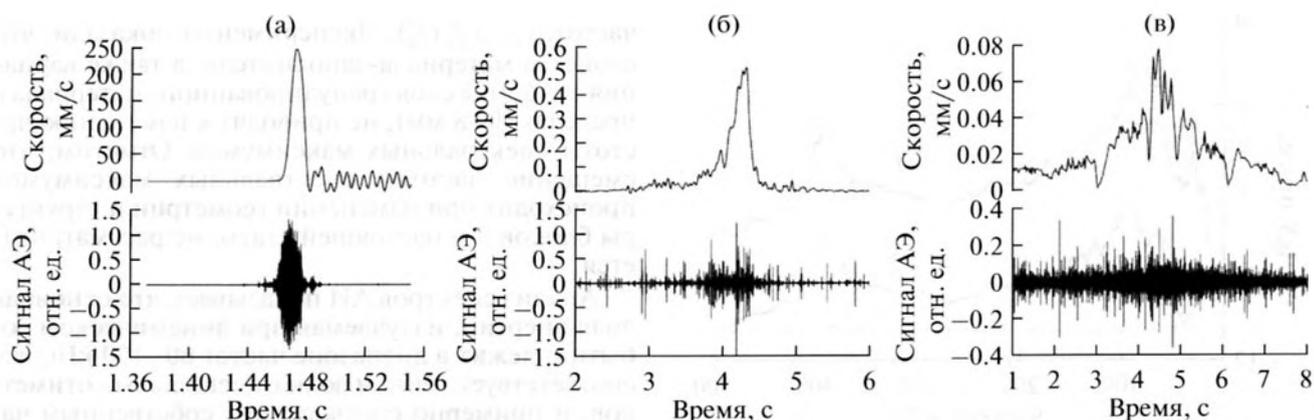


Рис. 2. Примеры эюр скоростей смещения блока, соответствующие различным деформационным событиям, и их акустические портреты: (а) динамический срыв; (б) медленный срыв; (в) эпизод ускоренной ползучести.

гранул повышает вероятность формирования динамических срывов, а более широкий гранулометрический состав определяет более широкий диапазон скоростей реализуемых событий [25, 26]. Кардинальным образом на формирование режима влияет наличие флюида и его вязкость [27, 28].

В процессе сдвига деформирование модельной трещины сопровождается излучением акустических импульсов (АИ). Для распознавания АИ в регистрируемом сигнале АЭ был использован энергетический критерий — поток энергии должен превысить определенный пороговый уровень в соответствии с соотношением

$$P(t) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} A(t)^2 dt \geq A_{\min}^2, \quad (1)$$

где A_{\min} — дисперсия зарегистрированного сигнала АЭ, определенная в 1-секундном интервале процесса, когда скорость деформации модельной трещины минимальна, $\Delta t = 0.5$ мс (предполагалось, что длительность АИ должна превышать 0.5 мс). Все зарегистрированные АИ можно разделить на два типа: события, регистрируемые на “косейсмической” (во время динамического события) и “межсейсмической” стадиях процесса.

При проведении экспериментов нам удалось реализовать широкий спектр динамических событий, каждое из которых сопровождается излучением “косейсмических” АИ определенной волновой формы (рис. 2).

Динамический срыв (рис. 2а) характеризуется резким сбросом сдвигового усилия, следующим за длительной стадией роста нагрузки. Сброс сдвигового усилия сопровождается быстрым проскальзыванием подвижного блока со скоростями до 0.5 м/с. При наиболее сильных событиях после срыва наблюдаются собственные колебания подвижного блока с частотой от 50 до 135 Гц. Срыв подвижного блока сопровождается излучением короткого по длительности (30–50 мс) высокоам-

плитудного АИ. Среднеквадратичная амплитуда этих АИ примерно на порядок превосходит максимальную амплитуду “межсейсмических” АИ — предвестников.

Медленный срыв (рис. 2б) характеризуется стадией интенсивного ускорения, за которой следует плавное замедление. АИ, излучаемые при медленных срывах, характеризуются плавным возрастанием $P(t)$ с последующим плавным уменьшением до фонового уровня. Продолжительность данных АИ варьируется от 0.2 до 3 с, и среднеквадратичная амплитуда превосходит фон более чем в пять раз. Визуально в волновом поле можно выделить большое количество отдельных импульсов, которые, согласно нашему критерию (1), не являются независимыми АИ. На стадии подготовки медленных срывов излучается большое количество “межсейсмических” АИ различной амплитуды.

Эпизоды ускоренной ползучести (рис. 2в) характеризуются этапом плавного нарастания скорости и последующего замедления. Эти АИ продолжительны по времени (от 1 до 6 с) и не имеют четкого вступления. Подобные сигналы характеризуются сильными вариациями $P(t)$, и при скоростях скольжения более 30 мкм/с его минимальное значение превышает фоновый уровень в 1.5–2 раза. Наблюдаемые вариации обусловлены наличием визуально выделяемых “импульсов”, по форме напоминающих медленные и динамические микросрывы. Отметим, что при подвижках блока с $V_m < 30$ мкм/с регистрируемые “косейсмические” АИ состоят из дискретного набора одиночных АИ, которые излучаются с интервалом менее 1–2 мс. Регистрируемые при эпизодах ускоренной ползучести “косейсмические” АИ по форме напоминают тремор, который в “большой сейсмологии” связывают с излучением мелких распределенных источников в процессе медленного скольжения по границам крупных тектонических блоков [3, 29].

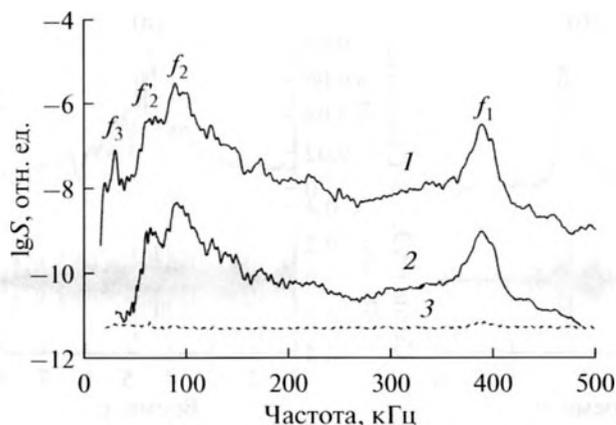


Рис. 3. Сравнение спектральной плотности мощности сигналов $S(f)$, зарегистрированных при различных динамических событиях. f_1 , f_2 (f_2'), f_3 – характерные максимумы спектра. 1 – спектральная плотность мощности сигнала, зарегистрированного при динамическом срыве; 2 – то же при эпизоде ускоренной ползучести; 3 – фоновый шум.

Выявленные закономерности изменения параметров “косейсмических” АИ почти не зависят от используемого материала-заполнителя, а определяются именно типом динамического события. В наших экспериментах аномальные “косейсмические” АИ, для которых характерна очень низкая амплитуда, наблюдались при деформировании модельной трещины, заполненной гранулированной средой с большим содержанием “мягких” компонент (тальк, глина). Аналогичный эффект наблюдался, например, в работе [30], где указано, что при деформировании трещины, заполненной глиной, динамические события происходят без излучения акустической эмиссии в пределах чувствительности аппаратуры. Выявление особенностей формирования аномальных “косейсмических” АИ требует отдельного исследования и в настоящей статье не рассматривается.

Существенное различие наблюдается и в спектрах “косейсмических” АИ (рис. 3). Рассмотрение спектральной плотности мощности АИ в широком частотном диапазоне показало, что АИ, излучаемый при динамическом срыве, имеет спектр с тремя характерными максимумами: высокочастотный пик $f_1 = 388 \pm 7$ кГц и низкочастотные пики $f_2 = 90 \pm 5$ кГц ($f_2' = 65 \pm 5$ кГц) и $f_3 = 29 \pm 1$ кГц. При медленных срывах также наблюдается подобный спектр, однако амплитуда максимума f_3 уменьшается с уменьшением скорости события V_m .

В отличие от спектра динамического и медленного срывов, спектр эпизодов ускоренной ползучести едва превышает фоновый уровень в соответствующем диапазоне частот. Кроме того, он характеризуется только двумя максимумами на

частотах f_1 и f_2 (f_2'). Эксперименты показали, что свойства материала-заполнителя, а также вариация толщины слоя гранулированного материала в пределах (0–8 мм), не приводят к изменению частоты спектральных максимумов. Отметим, что смещение частоты спектральных максимумов происходит при изменении геометрии и структуры блоков и в настоящей статье не рассматривается.

Анализ спектров АИ показывает, что основная доля энергии, излучаемая при динамическом событии, лежит в диапазоне частот 60–100 кГц, что соответствует длинам волн в несколько сантиметров, и примерно соответствует собственным частотам блока $f = c/2L \sim 5400/2 \times (0.03 \dots 0.08) \sim 34 \dots 90$ кГц. В свою очередь, высокочастотный диапазон 370–400 кГц не может быть объяснен ни резонансными свойствами блоков, ни волноводными свойствами тонкого гранулированного слоя. Критическая частота первой волноводной моды слоя должна быть заметно ниже этих значений. Принимая скорость распространения колебаний в слое гранулированного материала 150–500 м/с, получаем для слоя толщиной 3 мм: $f = c/2h \sim (150 \dots 500)/2 \times 0.003 \sim 25 \dots 80$ кГц. Вероятно, высокочастотный диапазон 370–400 кГц обусловлен процессами, протекающими внутри заполнителя или на контакте заполнителя с шероховатой поверхностью блока.

2.2. Стадия подготовки динамических событий

В процессе сдвигового деформирования на “межсейсмической” стадии цикла регистрируется большое количество АИ короткой продолжительности (менее 2 мс). В зависимости от типа динамического события и структуры нарушения сплошности, частота следования данных “межсейсмических” АИ варьируется от одиночных “щелчков” с промежутками в десятки секунд до регулярно повторяющихся сигналов с интервалами 1–2 мс. Несмотря на большое разнообразие волновых форм “межсейсмических” АИ, можно выделить две основные моды (рис. 4).

Мода *M-I* представляет собой короткий пакет с резким вступлением и формой, характерной для событий, связанных с образованием трещин отрыва [31]. В спектре сигналов наблюдается два спектральных максимума на частотах f_1 и f_2 . Мода *M-II* характеризуется постепенным увеличением амплитуды сигнала до максимума, а затем постепенным снижением до фонового уровня. Данная волновая форма является характерной для событий, связанных с образованием трещин сдвига [31]. Как правило, амплитуда сигнала *M-II* в несколько раз меньше амплитуды сигналов *M-I*. Спектр сигнала *M-II* имеет единственный максимум на частоте f_2 . Для характеристики моды АИ удобно использовать спектральный центроид (средневзвешенная частота спектра) исследуемого им-

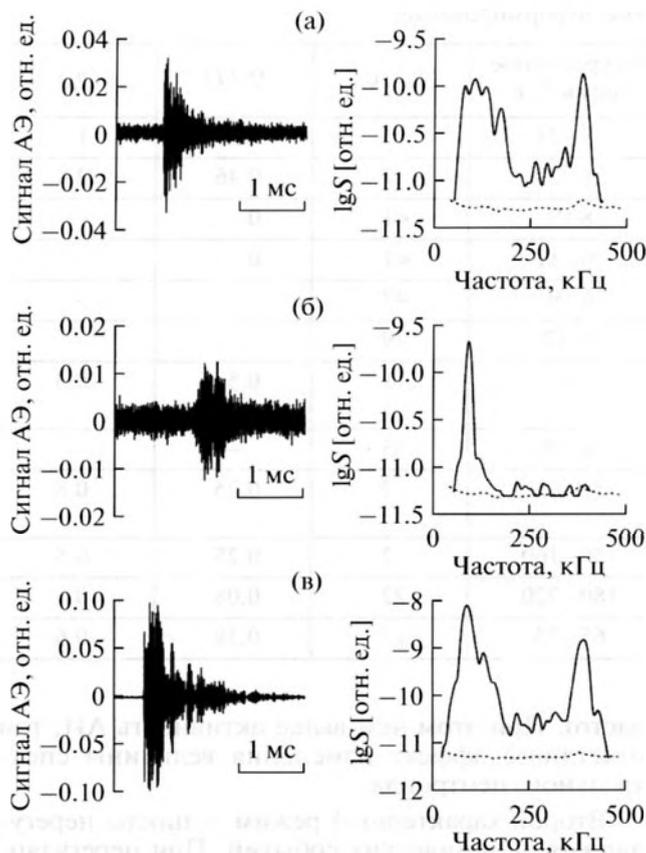


Рис. 4. Моды “межсейсмических” АИ и их спектральная плотность мощности $S(f)$: (а) мода $M-I$; (б) мода $M-II$; (в) мода $M-III$. Пунктирная линия – спектральная плотность мощности фонового шума.

пульса. Если спектральный центроид принимает значение ~ 240 кГц, то имеет место мода $M-I$, если ~ 150 кГц – мода $M-II$. В процессе сдвига также наблюдается излучение “переходных” импульсов $M-III$, в спектрах которых наблюдается два частотных максимума разной амплитуды. Величина спектрального центроида, характерная для данной моды импульсов, варьируется от 160 до 230 кГц. Похожий эффект излучения сигналов различной волновой формы наблюдался при изучении процесса разрушения бетонных материалов [32].

При различных режимах деформирования закономерности изменения параметров “межсейсмических” АИ существенно различаются. Для режимов регулярно повторяющихся медленных и динамических срывов закономерности изменения активности АИ находятся в хорошей корреляции со стадиями цикла деформирования (рис. 5). На стадии цикла, когда скорость смещения минимальна, активность АИ также минимальна или равна нулю. По мере приближения к моменту динамического события наблюдается увеличение активности АИ. Для анализа закономерностей изменения активности АИ на заключительной

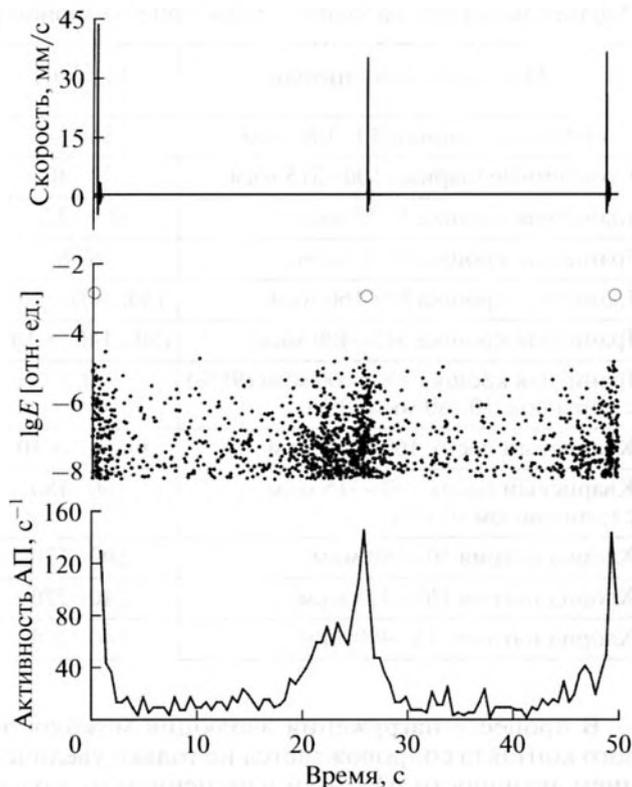


Рис. 5. Закономерности изменения скорости скольжения и параметров АИ при регулярном прерывистом скольжении.

стадии подготовки динамических событий использовался обратный закон Омори [33]:

$$R(t) = R_0 + R_1 t^{-p_b} \quad (t \leq t_c), \quad (2)$$

где R_0 – минимальная регистрируемая активность АИ на “межсейсмической” стадии деформационного процесса; t – время до динамического события; t_c – продолжительность стадии роста активности АИ перед динамическим событием; R_1 , p_b – эмпирические константы. Параметры обратного закона Омори, характерные для разных заполнителей, представлены в таблице. Анализ таблицы показывает, что для быстрых динамических событий характерные значения R_0 в несколько раз меньше, чем для медленных событий. Существенные различия наблюдаются и в значениях параметра p_b : для заполнителя, содержащего гранулы правильной сферической формы (стеклянные шарики), значения p_b существенно выше, чем для заполнителя с угловатыми зёрнами (песок, гранитная крошка). Отметим, что наличие “мягких” компонент приводит к существенному уменьшению количества регистрируемых АИ или их полному отсутствию. После динамического события активность АИ уменьшается согласно закону Омори $R(t) = K/(t+c)^p$ [34], причем для всех типов динамических событий $p_b \leq p$.

Параметры обратного закона Омори при регулярном режиме деформирования

Материал-заполнитель	V_m , мм/с	Рекуррентное время T , с	$\langle R_0 \rangle$, с ⁻¹	$\langle t_c/T \rangle$	$\langle p_b \rangle$
Стеклянные шарики 40–100 мкм	26–33	18–21	3	0.5	1
Стеклянные шарики 100–315 мкм	30–40	21–25	7	0.46	0.8
Гранитная крошка 1–50 мкм	0.9–2.3	8–9	<1	0	–
Гранитная крошка 1–50 мкм	6–8	10–11	<1	0	–
Гранитная крошка 60–160 мкм	$(30...40) \times 10^{-3}$	6–9	47	–	–
Гранитная крошка 315–400 мкм	$(50...140) \times 10^{-3}$	8–12	39	–	–
Гранитная крошка 100–600 мкм (98%) с корундом 10–50 мкм (2%)	0.3	15	15	0.5	0.3
Кварцевый песок 160–315 мкм	$(30...40) \times 10^{-3}$	6–10	35	–	–
Кварцевый песок 160–315 мкм с глицерином (0.1%)	160–180	55–65	2	0.25	0.8
Хлорид натрия 50–160 мкм	500–520	150–160	2	0.25	0.5
Хлорид натрия 160–315 мкм	240–270	180–220	22	0.08	0
Хлорид натрия 315–400 мкм	140–170	65–75	17	0.18	–0.6

В процессе нагружения эволюция межблокового контакта сопровождается не только увеличением активности АИ, но и изменением их моды. Если на начальной стадии процесса преобладает излучение импульсов *M-I*, то по мере приближения к моменту динамического события начинает все больше увеличиваться доля импульсов *M-II*. Поскольку спектральный центроид является надежным индикатором моды АИ, то изменение доминирующей моды обязано сопровождаться изменением спектрального центроида регистрируемого сигнала (рис. 6). В наших экспериментах на заключительной стадии цикла наблюдается смещение спектрального центроида в область низких

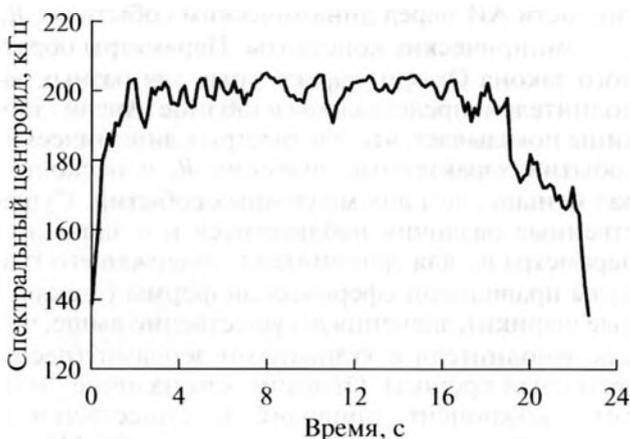


Рис. 6. Зависимость изменения спектрального центроида регистрируемого сигнала от времени цикла при деформировании трещины с заполнителем, состоящим из стеклянных шариков с размером гранул 100–315 мкм.

частот. При этом чем выше активность АИ, тем отчетливее эффект изменения величины спектрального центроида.

Второй характерный режим — циклы нерегулярных динамических событий. При нерегулярном режиме характерно наличие как эпизодов ускоренной ползучести, так и динамических срывов. При нестабильном режиме деформирования наблюдается более высокая активность АИ, основную долю (60–70%) которых составляют импульсы *M-II*.

Несмотря на большое количество АИ, заметных изменений их активности не наблюдается ни перед эпизодами ускоренной ползучести, ни перед медленными срывами. Существенное изменение параметров АИ наблюдается только перед наиболее крупными динамическими срывами. Перед данным типом событий наблюдается уменьшение активности АИ — эффект “затишья” [35, 36]. На рис. 7 представлен один из таких случаев. Стадия “затишья” наступает после события *S* длительностью 1.5 с, произошедшего в момент времени 154 с со скоростью 40 мкм/с. Стадия “затишья” характеризовалась уменьшением в два раза активности АИ до значения 75 с⁻¹ и увеличением доли предвестников *M-I* и *M-III*. Эффект акустического “затишья”, наблюдаемый при нестабильном режиме, аналогичен снижению активности на “межсейсмической” стадии режима прерывистого скольжения и проявляется тем сильнее, чем больше энергия готовящегося события.

Статистический анализ “межсейсмических” АИ может дать информацию об энергии готовящегося динамического события. На рис. 8 приведена статистика регистрируемых АИ для различных

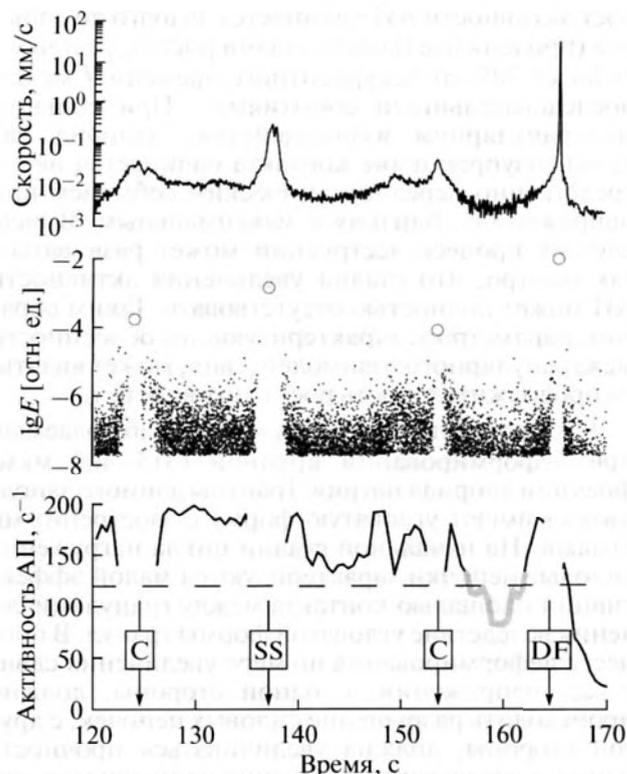


Рис. 7. Закономерности изменения скорости скольжения и параметров АИ при нерегулярном режиме. Стадия затишья – промежуток от 154 до 165 с. Обозначения динамических событий: С – эпизод ускоренной ползучести, SS – медленный срыв, DF – динамический срыв.

режимов деформирования. При регулярном режиме распределение АИ по энергиям подчиняется закону повторяемости Гутенберга–Рихтера [37] во всем диапазоне энергий. Излучаемые “косейсмические” АИ формируют отдельный пик справа, превосходящий энергию “межсейсмических” АИ

на 1–2 порядка; в то же время энергия “косейсмических” АИ может быть определена из закона повторяемости АИ.

При нерегулярном режиме распределение АИ по энергиям может быть описано законом Гутенберга–Рихтера при $E > 10^{-7.5}$ отн. ед. В области $E < 10^{-7.5}$ отн. ед. недооценка количества слабых импульсов происходит из-за несовершенства метода идентификации АИ. Аналогично регулярному режиму, наиболее мощные “косейсмические” АИ формируют отдельный пик справа. Однако, в отличие от регулярного режима, оценка энергии динамических срывов из графика повторяемости “межсейсмических” АИ дает сильно заниженные значения. Аналогичный эффект наблюдается и в природе. Так, среди различных деформационных событий, приуроченных к определенной разломной зоне, отдельное место занимают так называемые “характеристические” землетрясения, квазипериодически повторяющиеся во времени. Их вероятность оказывается существенно выше, чем следует из закона повторяемости. Например, такими “характеристическими” событиями являются регулярно повторяющиеся землетрясения с магнитудой $M \sim 6$ в районе Паркфилда (Калифорния) [38].

3. ОБСУЖДЕНИЕ

При обсуждении наблюдаемых акустико-эмиссионных эффектов мы опираемся на представления о том, что динамические события обусловлены формированием в зоне межблокового контакта конгломератов нагруженных частиц (силовых цепочек) и последующим их разрушением. Данные цепочки в совокупности формируют силовой скелет, характеризующийся определенной пространственной структурой и прочностными характеристиками. Как и большинство объектов в природе [39], силовой скелет можно

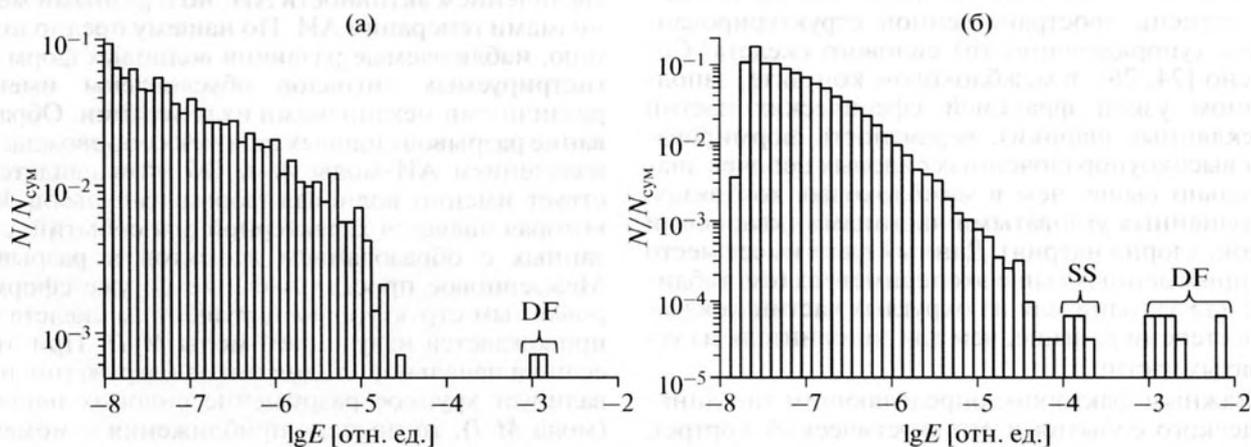


Рис. 8. Распределение АИ по энергиям: (а) регулярный режим, (б) нерегулярный режим. SS – “косейсмический” АИ, регистрируемый при медленном срыве; DF – то же при динамическом срыве.

рассмотреть как пространственную фрактальную структуру [24]. В процессе деформирования изменение напряженно-деформированного состояния среды приводит к локальным разрушениям скелета. На начальном этапе повреждения локализуются на отдельных контактах, дальнейшая эволюция системы выводит процессы деструкции на более высокие иерархические уровни, что в результате приводит к сдвигу берегов трещины. Будучи разрушенными в процессе деформирования, силовые цепочки способны замещаться аналогичными структурами под влиянием сил межгранулярного взаимодействия, когда внешнее воздействие будет полностью скомпенсировано. Такая картина неоднократно наблюдалась как в лабораторных [40], так и в численных [41] экспериментах. В этой связи разумно предположить, что и в наших экспериментах имеют место аналогичные процессы.

Структурные изменения, происходящие при подготовке динамического события, сопровождаются излучением “межсейсмических” АИ. Анализ параметров обратного закона Омори (2) позволяет получить важные сведения о внутренних характеристиках межблокового контакта. Для накопления упругой энергии деформации необходимо формирование силового скелета – консолидация межблокового контакта, поэтому регистрация ненулевой активности $R(t)$ свидетельствует о наличии в зоне межблокового контакта слабо нагруженных и неконсолидированных областей. Мы полагаем, что величина R_0 характеризует удельное количество изначально консолидированных гранул, образующих силовой скелет, и более низкому значению R_0 соответствует более высокое количество консолидированных гранул. Наблюдаемый при подготовке динамического события степенной рост активности АИ, согласно [42], указывает на формирование масштабно-инвариантной внутренней структуры. При этом показатель степени p_b характеризует фрактальную размерность пространственного распределения элементов силового скелета: чем выше показатель степени p_b , тем выше степень пространственной структурированности (упорядоченности) силового скелета. Согласно [24, 26], в межблоковом контакте, заполненном узкой фракцией сферических частиц (стеклянные шарики), вероятность формирования высокоупорядоченных силовых цепочек значительно выше, чем в межблоковых контактах, заполненных угловатыми частицами (кварцевый песок, хлорид натрия). Данный факт имеет место и в приведенных выше экспериментах (см. таблицу): для заполнителя из округлых частиц показатель степени p_b выше, чем для заполнителя из угловатых частиц.

Важным фактором, определяющим тип динамического события и его акустический портрет, является межгранулярное взаимодействие. Анализ таблицы показывает, что при слабом межгранулярном взаимодействии (стеклянные шарики)

рост активности АИ начинается задолго до события (продолжительность стадии роста t_c составляет более 30% от рекуррентного времени T между последовательными событиями). При сильном межгранулярном взаимодействии (хлорид натрия) разупрочнение контакта начинается непосредственно перед динамическим событием при напряжениях, близких к максимальным. В ряде случаев процесс деструкции может развиваться так быстро, что стадия увеличения активности АИ может полностью отсутствовать. Таким образом, параметром, характеризующим особенности межгранулярного взаимодействия, может являться продолжительность роста активности t_c .

Стоит отметить случай $p_b = -0.6$, наблюдаемый при деформировании крупной (315–400 мкм) фракции хлорида натрия. Гранулы данного заполнителя имеют угловатую форму с заостренными краями. На начальной стадии цикла нагружения силовые цепочки характеризуются малой эффективной площадью контакта между гранулами сечения вследствие угловатой формы гранул. В процессе деформирования по мере увеличения сдвиговых напряжений, с одной стороны, должно происходить разрушение силовых цепочек, с другой стороны, должна увеличиваться прочность цепочек вследствие увеличения площади межгранулярного контакта. Вероятнее всего, для фракции 315–400 мкм хлорида натрия процесс упрочнения силовых цепочек превалирует над процессом разупрочнения, поэтому наблюдается уменьшение активности АИ при приближении к моменту динамического события, и показатель p_b имеет отрицательные значения.

В процессе сдвига постепенное разрушение силового скелета приводит к увеличению площади неконсолидированной области межблокового контакта. В неконсолидированных областях действие сдвиговых напряжений проявляется в межзерновом проскальзывании гранул заполнителя [43]. Таким образом, эволюция межблокового контакта должна сопровождаться не только увеличением активности АИ, но и разными механизмами генерации АИ. По нашему предположению, наблюдаемые различия волновых форм регистрируемых сигналов обусловлены именно различными механизмами их генерации. Образование разрывов силовых цепочек сопровождается излучением АИ-моды $M-I$. Об этом свидетельствует именно волновая форма импульсов $M-I$, которая является характерной для событий, связанных с образованием дефектов и разрывов. Межзерновое проскальзывание по уже сформированному структурным нарушениям скелета сопровождается излучением моды $M-II$. При этом если на начальной стадии цикла нагружения превалирует хрупкое разрушение силовых цепочек (мода $M-I$), то по мере приближения к моменту динамического события начинает все больше проявляться межзерновое проскальзывание гранул (мода $M-II$). Именно изменение механизма

генерации, на наш взгляд, является причиной смещения спектрального центроида в область низких частот (см. рис. 6). Подобные эффекты изменения спектральных характеристик наблюдаются и в природе. Так, Г.А. Соболев и А.А. Любушин перед несколькими землетрясениями наблюдали появление в спектре микросейсм специфических низкочастотных колебаний [44]. Поскольку изменение активности АИ может быть обусловлено не только внутренними структурными изменениями, но также и изменением условий нагружения [45, 46], более надежным индикатором подготовки динамического события, на наш взгляд, является именно изменение спектрально-го центроида регистрируемого сигнала.

Инициированные на заключительной стадии нагружения динамические события характеризуются наличием в спектрах “косейсмических” АИ высокочастотного максимума f_1 , характерного для моды $M-I$ “межсейсмических” АИ. Поскольку мода $M-I$ характеризует разрушение силовых цепочек, то наличие в “косейсмических” спектрах максимума f_1 , вероятно, указывает на доразрушение силового скелета во время динамического события и его последующую полную перестройку.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные лабораторные эксперименты позволили установить особенности акустических эмиссионных эффектов, наблюдаемые при сдвигом деформировании нарушения сплошности. Показано, что наблюдаемый акустический портрет определяется не столько прочностными характеристиками материала-заполнителя, сколько его структурой на мезоуровне. При нагружении статистика АИ подчиняется степенным законам Омори и Гутенберга–Рихтера, что позволяет рассматривать процесс деформирования трещины как эволюцию самоорганизующейся системы, а динамические события — как заключительный этап процесса самоорганизации.

В процессе нагружения эволюция межблокового контакта сопровождается изменением механизма генерации АИ, и индикатором данного процесса является спектральный центроид регистрируемого сигнала. По мере приближения к динамическому событию наблюдается смещение спектрального центроида в область низких частот, что, по нашим представлениям, свидетельствует о превалировании на заключительной стадии процесса межзернового проскальзывания гранул.

Полученные результаты демонстрируют необходимость более детального анализа наблюдаемого материала, получаемого при сейсмическом мониторинге. Анализ должен включать не только выявление слабых землетрясений, но и анализ спектральных характеристик микросейсмического шума. Выявление характерных особенностей сейсмоакустического режима локального участка, содержащего разлом или крупные

тектонические трещины, будет весьма полезным как для определения напряженного состояния и деформационных характеристик горного массива [47, 48], так и для понимания механизмов изменения сейсмического режима при техногенном воздействии [17, 49].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-17-00719).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reid H.F. The mechanisms of the earthquake. The California earthquake of April 18, 1906 // Report of State Investigation Commission. 1910. V. 2. P. 16–28.
2. Steinbrugge K.V., Zacher E.G., Tocher D., Whitten C.A., Claire C.N. Creep on the San Andreas fault – creep rate and related measurements at Vineyard, California // Bull. Seism. Soc. Am. 1960. V. 50. № 3. P. 389–415.
3. Peng Z., Gombert J. An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena // Nature Geosciences. 2010. V. 3. № 9. P. 599–607.
4. Wei M., Kaneko Y., Liu Y., McGuire J.J. Episodic fault creep events in California controlled by shallow frictional heterogeneity // Nature Geosciences. 2013. V. 6. № 7. P. 566–570.
5. Kocharyan G.G., Kishkina S.B., Novikov V.A., Ostapchuk A.A. Slow slip events: parameters, conditions of occurrence, and future research prospects // Geodynamics & Tectonophysics. 2014. V. 5. № 4. P. 863–891.
6. Little C. M7 slow release earthquake under Wellington. Earthquake-Geonet. Available from: <http://info.geonet.org.nz/display/quake/2013/05/27/>. 2013.
7. Sibson R.S. Thickness of the seismic slip zone // BSSA. 2003. V. 93. № 3. P. 1169–1178.
8. Biegel R.L., Sammis C.G. Relating fault mechanics to fault zone structure // Advance in Geophysics. 2004. V. 47. P. 65–111.
9. Heesakkers V., Muphy S., Reches Z. Earthquake rupture at focal depth. Part I: Structure and rupture of the Pretorius fault, TauTona mine, South Africa // PAGEOPH. 2011. V. 168. P. 2395–2425.
10. Wibberley C.A.J., Shimamoto T. Internal structure and permeability of major strike-slip fault zones: the median tectonic line in Mie prefecture, southwest Japan // J. Struct. Geol. 2003. V. 25. P. 59–78.
11. Sammis C., King G., Biegel R. The kinematics of gouge deformation // PAGEOPH. 1987. V. 125. № 5. P. 777–812.
12. Liu C.-H., Nagel S.R., Schechter D.A., Coppersmith S.N., Majumdar S., Narayan O., Witten T.A. Force fluctuations in bead packs // Science. 1995. V. 269. P. 513–515.
13. Cates M.E., Wittmer J.P., Bouchaud J.-P., Claudin P. Jamming, force chains, and fragile matter // PRL. 1998. V. 81. № 9. P. 1841–1844.
14. Turcotte D.L., Newman W.I., Scherbakov R. Micro and macroscopic models of rock fracture // J. Geophys. Int. 2003. V. 152. P. 718–728.
15. Anthony J.L., Marone C. Influence of particle characteristics on granular friction // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. B08409.
16. Higashi N., Sumita I. Experiments on granular rheology: effects of particle size and fluid viscosity // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. B04413.
17. Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A., Markov V.K., Pavlov D.V. Some questions of geomechanics of the

- faults in the continental crust // *Izvestiya, Phys. Solid Earth*. 2014. V. 50. № 3. P. 355–366.
18. *Voisin C., Grasso J.R., Larose E., Renard F.* Evolution of seismic signals and slip patterns along subduction zones: insights from a friction lab scale experiment // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L08302.
 19. *Zigone D., Voisin C., Larose E., Renard F., Campillo M.* Slip acceleration generates seismic tremor like signals in friction experiments // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L01315.
 20. *Johnson P.A., Ferdowsi B., Kaproth B.M., Scuderi M., Griffa M., Carmeliet J., Guyer R.A., Le Bas P.-Y., Trugman D.T., Marone C.* Acoustic emission and microslip precursors to stick–slip failure in sheared granular material // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40. P. 1–5.
 21. *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.
 22. *Haller K.C.E., Hedberg C.M.* Method for monitoring slow dynamics recovery // *Acoust. Phys.* 2012. V. 58. № 6. P. 713–717.
 23. *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.
 24. *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.
 25. *Остапчук А.А., Кочарян Г.Г., Марков В.К., Павлов Д.В., Салтыков Н.В.* Влияние структурных свойств нарушения сплошности на режим сдвигового деформирования / 2-й Всероссийский семинар-совещание “Триггерные эффекты в геосистемах” (Москва, 18–21 июня, 2013). М.: ГЕОС, 2013. С. 134–146.
 26. *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.
 27. *Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A.* The influence of viscosity of thin fluid films on the frictional interaction mechanism of rock blocks // *Doklady Earth Sciences*. 2015. V. 463. Pt. 1. P. 757–759.
 28. *Reber J.E., Hayman N.W., Lavier L.L.* Stick–slip and creep behavior in lubricated granular material: insights into the brittle–ductile transition // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 41. P. 3471–3477.
 29. *Nadeau R.M., Dolenc D.* Nonvolcanic tremors deep beneath the San Andreas fault // *Science*. 2005. V. 307. № 5708. P. 389.
 30. *Кочарян Г.Г., Новиков В.А.* Экспериментальное исследование различных режимов скольжения блоков по границе раздела. Часть 1. Лабораторные эксперименты // *Физическая мезомеханика*. 2015. Т. 18. № 4. С. 94–104.
 31. *Shiotani T., Ohtsu M., Ikeda K.* Detection and evaluation of AE waves due to rock deformation // *Construction and Building Materials*. 2001. V. 15. P. 235–246.
 32. *Ohtsu M.* Recommendation of RILEM TC 212-ACD: acoustic emission and related NDE techniques for crack detection and damage evaluation in concrete: Test method for damage qualification of reinforced concrete beams by acoustic emission // *Materials and Structures*. 2010. V. 43. № 9. P. 1183–1186.
 33. *Papazachos B.C.* The time distribution of reservoir-associated foreshocks and its importance to the prediction of the principal shock // *BSSA*. 1973. V. 63. P. 1973–1978.
 34. *Utsu T., Ogata Y., Matsu'ura R.S.* The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity // *J. Phys. Earth*. 1995. V. 43. P. 1–33.
 35. *Wyss M., Habermann R.E.* Precursory seismic quiescence // *PAGEOPH*. 1988. V. 126. P. 2–4.
 36. *Zmushko T., Turuntaev S., Kulikov V.* Mine seismicity of Vorkuta coal mines / *Rock Dynamics and Applications – State of the Art: Proceedings of the 1st International Conference on Rock Dynamics and Applications, RocDyn-1, 2013*. 2013.
 37. *Gutenberg B., Richter C.F.* *Seismicity of the Earth and its associated phenomena*. NJ, Princeton: Princeton University Press, 1949. 273 p.
 38. *Ben-Zion Y.* Collective behavior of earthquakes and faults: Continuum–discrete transitions, progressive evolutionary changes, and different dynamic regimes // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 46. RG4006.
 39. *Mandelbrot B.B.* *The fractal geometry of nature*. San Francisco: Freeman, 1982. 460 p.
 40. *Drescher A., de Josselin de Jong G.* Photoelastic verification of a mechanical model for the flow of a granular material // *J. Mech. Phys. Solids*. 1972. V. 20. № 5. P. 337–340.
 41. *Ruthbun A.P., Renard F., Abe S.* Numerical investigation of the interplay between wall geometry and friction in granular fault gouge // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2013. V. 118. P. 878–896.
 42. *Макаров П.В.* Самоорганизованная критичность деформационных процессов и перспективы прогноза разрушения // *Физическая мезомеханика*. 2010. Т. 13. № 5. С. 97–112.
 43. *Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Павлов Д.В., Ружич В.В., Батухтин И.В., Виноградов Е.А., Камай А.М., Марков В.К.* Экспериментальное исследование различных режимов скольжения блоков по границе раздела. Ч. 2. Полевые эксперименты и феноменологическая модель явления // *Физическая мезомеханика*. 2015. Т. 18. № 6. С. 75–85.
 44. *Соболев Г.А.* Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. М.: ИФЗ РАН, 2011. 56 с.
 45. *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.
 46. *Nemoto K., Moriya H., Niitsuma H.* Evaluation of parameter dependencies of AE accompanying sliding along a rough simulated fracture // *J. Acoust. Emission*. 2005. V. 23. P. 142–149.
 47. *Загорский Л.С., Шкуратник В.Л.* Применение почти-периодических функций для сейсмического профилирования // *Акуст. журн.* 2014. Т. 60. № 3. С. 272–278.
 48. *Николаев А.В., Беляков А.С., Лавров В.С., Жигалин А.Д.* Геоакустический контроль как средство изучения состояния литосферы и прогноза землетрясений // *Акуст. журн.* 2005. Т. 51. Приложение. С. 140–149.
 49. *Дрягин В.В.* Сейсмоакустическая эмиссия нефтепродуктивного пласта // *Акуст. журн.* 2013. Т. 59. № 6. С. 744–751.