

ПАРАМЕТРЫ ГРУППИРОВАНИЯ СОБЫТИЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО РАЗРУШЕНИЮ ГОРНЫХ ПОРОД

© 2024 г. С. Д. Маточкина^{1,2, *}, П. Н. Шебалин^{1,3},
В. Б. Смирнов^{2,4}, А. В. Пономарев⁴, П. А. Малютин^{1,2,4}

¹Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия

³Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия

⁴Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: sofijamat@mail.ru

Поступила в редакцию 04.03.2024 г.

После доработки 22.03.2024 г.

Принята к публикации 27.04.2024 г.

В данной работе проводится проверка выполнения закона продуктивности землетрясений [Shebalin et al., 2020a] в лабораторных экспериментах по разрушению горных пород. Образцы гранита Вестерли и песчаника Бенхайм подвергались одноосному нагружению в условиях все-стороннего сжатия. Система регистрации акустической эмиссии (АЭ) позволяла сформировать каталоги источников АЭ подобные каталогам землетрясений. Анализировались данные экспериментов, проведенных в Лаборатории трения горных пород (Rock friction laboratory, USGS, Menlo Park, USA) и Лаборатории геомеханики и реологии (GFZ, Potsdam). Выявлено, что для событий АЭ в рассмотренных образцах характерно одномодальное распределение функции близости до ближайшего соседа. Показано выполнение закона продуктивности для событий акустической эмиссии в лабораторных экспериментах по разрушению образцов горных пород, что дает основание говорить о подобии процессов группирования в реальной сейсмичности и в лабораторных условиях.

Ключевые слова: лабораторный эксперимент, акустическая эмиссия, функция близости, продуктивность, закон продуктивности землетрясений.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724050066>, **EDN:** EJYLGC

ВВЕДЕНИЕ

В статистической сейсмологии продуктивность землетрясения (число сейсмических событий в определенном диапазоне магнитуды, имеющих причинно-следственную связь с данным землетрясением) является ключевым параметром, определяющим опасность афтершоков [Баранов, Шебалин, 2019]. При анализе сейсмических событий было выявлено, что с использованием относительного порога магнитуды ΔM для учета масштабной инвариантности, продуктивность, связанная с каждым событием, является случайной величиной, которая следует экспоненциальному распределению [Shebalin et al., 2020a], что не согласуется с существующими моделями сейсмического режима, в которых распределение количеств событий в группах

принимается пуассоновским [Marsan, Lengline, 2008; Ogata, 1989].

Для определения зависимостей между событиями и их разделения в каталоге на кластеризованные и фоновые для последующего анализа продуктивности связанных событий используется метод “ближайшего соседа”, устанавливающий однозначную связь двух событий друг с другом в пространстве, времени и энергии (магнитуде) [Zaliapin et al., 2008]. В качестве “меры близости” между землетрясениями используется функция [Baiesi, Paczuski, 2004]:

$$\eta_{ij} = \begin{cases} t_{ij} (r_{ij})^d 10^{-bm_i}, & t_{ij} > 0 \\ +\infty, & t_{ij} \leq 0, \end{cases} \quad (1)$$

где индексы указывают порядковый номер землетрясения во времени; $t_{ij} = t_j - t_i$ — время между

землетрясениями i (произошло раньше во времени) и j (произошло позже во времени); r_{ij} — пространственное расстояние между эпицентрами; d — фрактальная размерность распределения эпицентров; b — наклон графика повторяемости; m_i — магнитуда первого по времени события. Фактически эта величина пропорциональна вероятности проявления двух событий на данном расстоянии между гипоцентрами и с данной разностью по времени с учетом фрактальной структуры сейсмичности в пространстве и закона Гутенберга—Рихтера для магнитудно-частотного распределения землетрясений: чем меньше величина η_{ij} , тем меньше вероятность случайного возникновения такой пары в случае независимости событий [Baiesi, Paczuski, 2004].

При подсчете функции близости для анализа каталогов акустических событий в нашей работе использовались, соответственно, время между акустическими событиями, евклидово расстояние между событиями, корреляционная фрактальная размерность распределения эпицентров [Grassberger, Procaccia, 1983], наклон графика повторяемости и энергетический класс первого по времени события.

Минимальное расстояние, в терминах функции близости, между событиями i и j — расстояние до “ближайшего соседа”. В этом случае событие с номером i называется “родителем”, а j — “потомком” i . С увеличением интенсивности потока событий увеличивается количество событий, занимающих одинаковый объем. При более высокой интенсивности, среднее расстояние между событиями будет меньше. Поскольку связанные события имеют более высокую интенсивность, чем фоновые, то расстояние до “ближайшего соседа” между кластеризованными событиями будет меньше, чем между несвязанными [Zaliapin et al., 2008]. Следовательно, вводя порог η_0 , можно разделить фоновые (несвязанные, некластеризованные, негруппированные) ($\eta > \eta_0$) и связанные (кластеризованные, группированные) ($\eta \leq \eta_0$) события [Zaliapin, Ben-Zion, 2013; Баранов, Шебалин, 2019]. При этом, однако, следует учитывать, что высокая интенсивность может сопровождать и разнесенные связанные события, например, возбуждаемые общим источником. Поэтому проверка отсутствия такого рода несвязанных с изучаемым явлением факторов требует специального исследования.

Предложенная в работах [Zaliapin, Ben-Zion, 2013; 2016] процедура определения η_0 основана на том, что распределение функции близости до

ближайшего соседа состоит из линейной комбинации двух логнормальных распределений. Однако далеко не всегда такая аппроксимация оказывается удачной для устойчивого определения порога η_0 . Например, если нет четкой бимодальной формы распределения, то этот метод дает фактически равновероятные оценки η_0 в очень широком диапазоне значений. Применение более сложных вариантов композитных распределений, например, с использованием гамма-распределения и распределения Вейбулла [Bayliss et al., 2019] обычно дает несколько лучшую аппроксимацию, чем метод Заляпина—Бен-Зиона [Zaliapin, Ben-Zion, 2013], но так же неприменим в случае одномодального распределения. В работе [Shebalin et al., 2020b] был предложен альтернативный метод определения порогового значения η_0 . Этот метод позволил найти устойчивое пороговое значение η_0 в случае одномодального распределения функции близости до ближайшего соседа при анализе техногенной сейсмичности [Баранов и др., 2020]. Здесь мы используем этот подход для разделения фоновых и кластеризованных событий акустической эмиссии, возникающих в экспериментах по разрушению образцов горных пород. Более того, этот метод, как и подход Заляпина—Бен-Зиона, является нечувствительным к минимальной магнитуде регистрируемых событий и вариации параметров b и d [Zaliapin, Ben-Zion, 2013; Баранов, Шебалин, 2019; Shebalin et al., 2020a], что исключает необходимость оценки погрешностей этих параметров функции близости.

При подсчете продуктивности используется интервал относительной магнитуды ΔM для учета масштабной инвариантности процесса инициирования: $M_{\text{потомка}} > M_{\text{родителя}} - \Delta M$, а также выполняется условие корректности порога: $M_{\text{родителя}} \geq M_c + \Delta M$ [Shebalin et al., 2020a], где M_c — представительная магнитуда в каталоге. Поскольку подсчет ведется в относительном интервале магнитуд, продуктивность получила название ΔM -продуктивности [Shebalin et al., 2020a], и она определяется как число “потомков” у данного события. В работе было установлено, что ΔM -продуктивность не зависит от магнитуды “родителя”, может меняться в широком диапазоне значений, и ее распределение имеет вид экспоненциального:

$$f(\lambda) = \frac{1}{\Lambda_{\Delta M}} e^{-\frac{\lambda}{\Lambda_{\Delta M}}}. \quad (2)$$

ΔM -продуктивность, как и магнитуду, можно рассматривать как свойство, присущее каждому землетрясению. В этом случае это значение

необязательно должно быть целым числом. Обозначим эту величину λ . Наблюдаемая величина в данном случае является конкретной реализацией “потенциальной” продуктивности λ . Можно предположить, что конкретная выборка представляет собой случайную Пуассоновскую величину с параметром λ . Это не противоречит и строгому определению ΔM -продуктивности как целочисленной величины. В этом случае, по закону продуктивности, эта величина имеет геометрическое распределение. В работе [Shebalin et al., 2020a] было показано, что целочисленная величина, имеющая распределение Пуассона с переменным параметром, подчиняющимся уравнению (2), имеет геометрическое распределение, так же с единственным параметром $\Lambda_{\Delta M}$.

$$P(N = k) = \frac{1}{1 + \Lambda_{\Delta M}} \left(\frac{\Lambda_{\Delta M}}{1 + \Lambda_{\Delta M}} \right)^k. \quad (3)$$

В обоих случаях оценкой параметра $\Lambda_{\Delta M}$ является среднее число инициированных на одно инициирующее событие:

$$\Lambda_{\Delta M} = \frac{\sum_{i=1}^N k_i}{N}, \quad (4)$$

где N – число событий; k_i – ΔM -продуктивность i -го события. Этот единственный параметр распределений (2) и (3) мы будем называть параметром кластеризации.

В работе [Shebalin et al., 2020a] было установлено, что продуктивность уменьшается с глубиной землетрясений. Ранее продуктивность, рассматриваемая как число афтершоков с магнитудой выше заданного абсолютного порога, также анализировалась в работах [Zaliapin, Ben-Zion, 2016; Marsan, Helmstetter, 2017; Utsu, 1969; Hainzl et al., 2019]. Авторы пытались связать продуктивность с тепловым потоком, установили вариативность продуктивности, выявили ее связь с магнитудой. Также они показали, что продуктивность выше в местах сцепления литосферных плит. В работе [Баранов и др., 2020] был установлен экспоненциальный вид распределения ΔM -продуктивности для техногенных землетрясений, тем самым подтверждена универсальность закона продуктивности землетрясений в разных средах. Авторы работы [Моторин и др., 2024] при анализе техногенных землетрясений обнаружили эффект увеличения реакции среды на возрастание уровня обводненности массива горных пород, проявляющийся в росте сейсмической активности и увеличении продуктивности сейсмических событий. Тем не менее, в настоящее время вопрос о природе закона продуктивности

землетрясений и факторов, определяющих значения его параметра, остается открытым.

Изучение процессов разрушения горных пород в зависимости от изменений параметров напряженно-деформированного состояния среды и ее физических характеристик может быть проведено в рамках лабораторного исследования. Современное оборудование позволяет проводить опыты по нагружению образцов с известными, контролируемыми условиями. Так, при помощи экспериментов были исследованы закон Гутенберга–Рихтера, фрактальная размерность, закон Омории другие параметры и закономерности сейсмичности [Hirata et al., 1987; Baró et al., 2013; Vilhelm et al., 2017; Смирнов, Пономарев, 2020]. Было выявлено, что акустический режим (совокупность событий акустической эмиссии) имеет сходие с сейсмическим режимом закономерности, а возбуждаемые в результате скачков нагрузки в образцах горных пород афтершоковые последовательности подчиняются тем же статистическим закономерностям, что и натурные афтершоки [Lei, Ma, 2014; Смирнов и др., 2019].

В настоящей статье анализируются эксперименты, описанные в работах [Смирнов и др., 2019; Смирнов, Пономарев, 2020], с целью исследования подобия закономерностей сейсмических и акустических событий. Используемое в опытах оборудование и методика экспериментов обеспечивают выполнение критериев подобия лабораторного и натурального процессов по некоторым параметрам [Смирнов, Пономарев, 2020].

В работе [Смирнов, Пономарев, 2020] рассматриваются эксперименты по квазитрехосному нагружению гранита Вестерли с обратной связью – формирование аналога разломной зоны. Для предотвращения “взрывного” разрушения образца из-за накопленной в нем упругой энергии уменьшалась скорость нагружения, когда процесс разрушения начинал ускоряться [Смирнов и др., 2001]. Также эти опыты описывались и анализировались в других работах, например, в работах [Lockner et al., 1991; Соболев, Пономарев, 1999].

Последующие исследования механизмов локализации напряжений и деформации, приводящих к хрупкому разрушению пород, выполненные с помощью рентгеновской микротомографии показали, что макроскопическая неустойчивость возникает, когда скорость локализации сети трещин увеличивается. Эти данные дают ценную информацию о корреляции между эволюцией микроструктуры горных

пород (пористости, проницаемости) и макроскопической деформацией при разрушении породы [McBeck et al., 2021; Kandula et al., 2022].

Авторы работы [Смирнов и др., 2019] в экспериментах с песчаником анализировали поведение параметров акустического режима при различных осевых напряжениях, давлении всестороннего сжатия, постоянном поровом давлении. Авторы обнаружили, что с ростом осевых напряжений b -value и параметр задержки начала релаксации c уменьшаются, а параметр релаксации Омори p увеличивается. При разрушении целого образца значение p остается неизменным с увеличением осевых напряжений, в то время как значение параметра c лишь незначительно увеличивается. Также было выявлено, что c растет с ростом давления всестороннего сжатия.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В исследовании использовались серии каталогов по нагружению гранита, обозначенные шифрами АЕ, и песчаника — BS.

Серия АЕ из трех экспериментов под кодовыми названиями АЕ36, АЕ39 и АЕ42 над цилиндрическими сухими образцами гранита Вестерли (диаметр 76.2 мм, высота 190.5 мм) проводились в Лаборатории трения горных пород (Rock friction laboratory, USGS, Menlo Park, USA) [Lockner, Byerlee, 1980; Смирнов, Пономарев, 2020].

Образцы деформировались одноосной нагрузкой в условиях постоянного всестороннего сжатия. В каждом опыте выделяются три стадии: рост дифференциального напряжения (разности осевого и всестороннего напряжений); стадия

почти постоянного дифференциального напряжения — “растянутый во времени процесс макроразрыва”; падение дифференциального напряжения вследствие начала макроразрушения — формирование аналога разломной зоны (рис. 1а) [Смирнов, Пономарев, 2020].

Авторы работы [Смирнов, Пономарев, 2020] предположили, что такой способ разрушения горной породы в опыте с обратной связью по акустической активности можно рассматривать как некий аналог разломной зоны в естественных условиях: обратная связь дает возможность достаточно долго и технически точно сохранять нагружение с постоянным напряжением при разрушении образца.

Опыты были проведены на гидравлическом прессе с горизонтальной камерой высокого давления с возможностью вести эксперименты в условиях всестороннего сжатия до 500 МПа при осевой нагрузке до 7500 кН. Непосредственно на поверхности образца монтировались шесть идентичных резонансных пьезоэлектрических датчиков для приема акустических сигналов. Точность локации источников акустической эмиссии около 2–3 мм. Для двух серий экспериментов, аналогично землетрясениям, каждому акустическому событию приписывался энергетический класс, пропорциональный логарифму относительной энергии события ($K = 2\lg 4$) [Смирнов, Пономарев, 2020].

Каталог событий акустической эмиссии по нагружению образца АЕ36 состоит из 30 649 событий, из которых 29 815 — после магистрального разлома. Представительность каталога

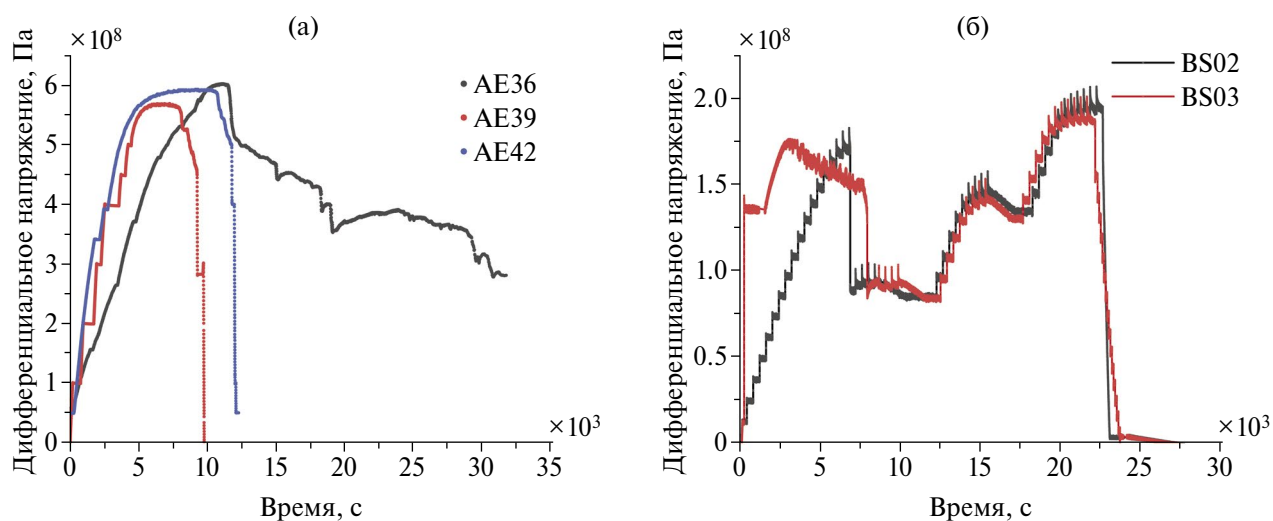


Рис. 1. История нагружения образцов (дифференциальные напряжения) в экспериментах: (а) — АЕ36, АЕ39, АЕ42 и (б) — BS02, BS03.

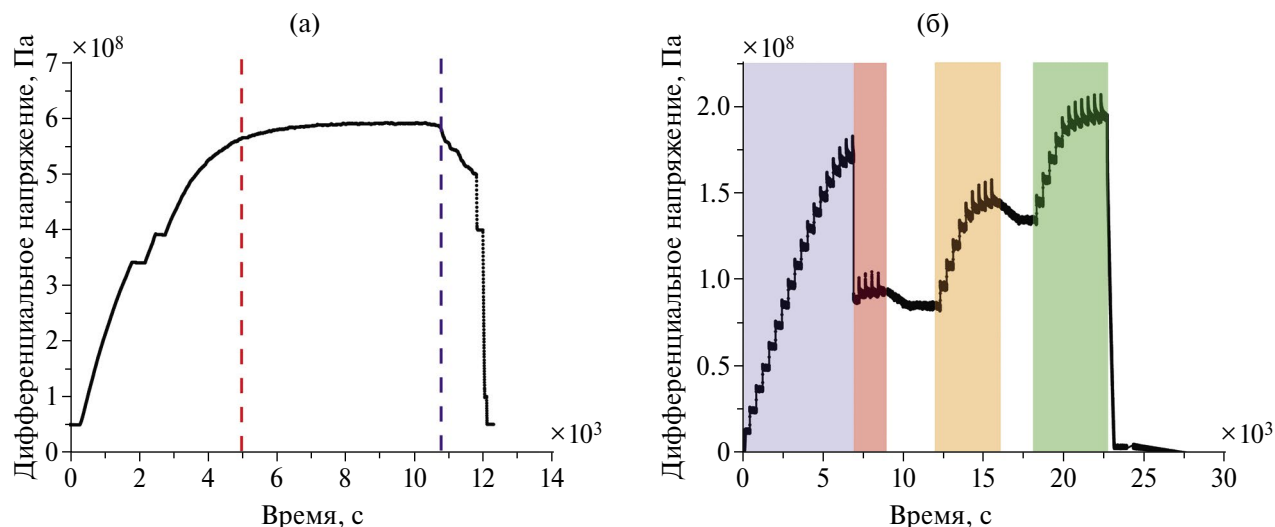


Рис. 2. Графики нагружения образцов с обозначенными на них областями для анализа: (а) АЕ42 — пунктирными линиями разделены три участка: рост дифференциального напряжения — до красной пунктирной линии; стадия почти постоянного дифференциального напряжения — от красной до синего пунктира; спад дифференциального напряжения — после синего пунктира; (б) BS02 — цветными прямоугольниками выделены: синим — область до магистрального разлома и области после него с повышенной акустической активностью (красным — после разлома 1, оранжевым — после разлома 2, зеленым — после разлома 3).

$K_c = 2$. Каталог АЕ39 с $K_c = 1.91$ включает в себя 12 584 события, 2463 из которых — афтершоки. В случае эксперимента над АЕ42 было зарегистрировано 27 572 события, 9027 произошли после “основного толчка”, отдельно анализировались области, обозначенные на рис. 2а. Представительный энергетический класс равен 1.6.

Серия BS из двух экспериментов (обозначения — BS02, BS03) проводилась над цилиндрическими образцами водонасыщенного песчаника Бенхайм в Лаборатории геомеханики и реологии (GFZ, Potsdam) [Смирнов и др., 2019].

Так как чаще всего особо крупные землетрясения, влекущие за собой большее число афтершоков, приурочены к разломным структурам, авторы работы [Смирнов и др., 2019] решили рассматривать афтершоковые процессы в экспериментах с предварительно сформированным макроразрывом (рис. 16). Этапы нагружения: формирование макроразрыва — подобия крупной разломной зоны проводилось в режиме ступенчатого увеличения осевой нагрузки с управлением по деформации и сопровождалось проскальзыванием по разрыву со сбросом осевых напряжений в случае BS02, в режиме нагружения с обратной связью по акустической эмиссии — в случае BS03; после чего моделировались афтершоковые последовательности путем ступенчатого увеличения прессом осевой нагрузки на образец (подобие эффекта увеличения напряжений, окружающих очаг крупного землетрясения). Такой способ генерации афтершоковых

последовательностей АЭ обеспечивает их регулярную генерацию со свойствами, сходными с натурными афтершоковыми процессами, что отличается от подхода, при котором афтершоки вызываются акустическим событием относительно большой величины. Так возникают неустойчивые подвижки типа “стик-слип” (*stick-slip*) [Brace, Byerlee, 1966; Scholz, 2019] с последовательностью афтершоков АЭ после каждой подвижки. Поверхность разрыва сглаживается после серии стик-слипов и нагрузка перераспределяется по неровностям, что ведет к существенному уменьшению сбросов напряжения и систематическому снижению остаточных напряжений после каждого последующего стик-слипа.

Эксперименты выполнялись на сервогидравлическом прессе MTS, обеспечивающем осевое усилие 4600 кН. Контроль сигналов акустической эмиссии и регистрация упругих волн проводились с использованием четырнадцати датчиков продольных колебаний. Точность локации оценивалась величиной не более 2 мм [Смирнов и др., 2019].

Каталог BS02 состоит из 273 167 событий, 237 768 из которых произошли после магистрального разлома, отдельно рассматривались участки нагружения, выделенные на рис. 2б. Эксперимент BS03 включает 526 873 события акустической эмиссии, 353 479 — афтершоков. Представительный энергетический класс данных каталогов равен 5.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ДАННЫХ

Для разделения событий акустической эмиссии на фоновые (некластеризованные, негруппированные) и связанные (кластеризованные, группированные) мы используем методику работы [Shebalin et al., 2020b]. Так же, как и в указанной работе, мерой близости событий с учетом времени, координат и магнитуды используется функция (1). В данном случае магнитуда заменена на энергетический класс, практически имеющий тот же смысл и линейно связанный с магнитудой. Как было показано в работе [Баранов и др., 2020], этот подход применим даже в случае одномодального распределения функции (1). Напомним, что в оригинальных работах [Zaliapin et al., 2008; Zaliapin, Ben-Zion, 2013] по “методу ближайшего соседа” для декластеризации каталогов землетрясений рассматриваются лишь бимодальные распределения функции (1).

В случае некластеризованных землетрясений распределение функции близости может быть смоделировано [Shebalin et al., 2020b] с использованием случайного каталога: в исходном каталоге грубо удаляются очевидные афтершоки, после чего времена событий случайно перемещаются относительно их координат и магнитуд, тем самым разрушаются временные связи между землетрясениями и получается случайное распределение. Предварительное грубое удаление очевидных афтершоков позволяет избавиться от чрезмерного пространственного группирования событий, которое невозможно “разрушить” при рандомизации каталога. Затем строятся графики функции плотности вероятности (p) и кумулятивной функции распределения (F) для наблюдаемого, случайного (рандомного) и кластеризованного случаев таким образом, чтобы выполнялись равенства:

$$\begin{aligned}(1-k)F_{\text{clust}}^*(\eta) &= F_{\text{real}}(\eta) - kF_{\text{rand}}(\eta), \\ (1-k)p_{\text{clust}}^*(\eta) &= p_{\text{real}}(\eta) - kp_{\text{rand}}(\eta).\end{aligned}\quad (5)$$

Здесь $F_{\text{clust}}^*(\eta)$ и $p_{\text{clust}}^*(\eta)$ моделируют фактическое распределение функции близости до ближайшего соседа для связанных событий. Поскольку они вычисляются как разность двух распределений с коэффициентами, величина $p_{\text{clust}}^*(\eta)$ может иметь отрицательные значения, а величина $F_{\text{clust}}^*(\eta)$ значения, большие 1. Коэффициент k подбирается таким образом, чтобы минимизировать значение $\max\{F_{\text{clust}}^*(\eta) - 1\}$.

Значение порога η_0 находится из условия равенства доли связанных событий с функцией близости выше η_0 и доли независимых событий с функцией

близости ниже η_0 : $F_{\text{rand}}(\eta_0) = 1 - F_{\text{clust}}^*(\eta_0)$. Коэффициент k определяет долю независимых событий от их общего числа.

Продуктивность, как и в работе [Shebalin et al., 2020a], определяется для каждого события акустической эмиссии с энергетическим классом K как число “потомков” ($\eta < \eta_0$) в интервале энергетического класса “потомков” ($K_{\text{потомок}} \geq K - \Delta K$).

Усреднением продуктивности по всем значениям по формуле (4) рассчитывается величина $\Lambda_{\Delta K}$ (интервал магнитуды ΔM заменен на интервал энергетического класса ΔK).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для определения порога функции близости η_0 , необходимого для подсчета продуктивности, были построены дифференциальные (выборочная плотность вероятности) и накопленные (выборочная функция) распределения функции близости до “ближайшего соседа” для каждого из образцов (по всему образцу в пространстве и после магистрального разлома во времени) и для разных частей нагружения для AE42 и BS02 с учетом представительности каталогов: $p_{\text{real}}(\eta)$, $p_{\text{rand}}(\eta)$, $p_{\text{clust}}^*(\eta)$, $F_{\text{real}}(\eta)$, $F_{\text{rand}}(\eta)$, $F_{\text{clust}}^*(\eta)$ (рис. 3–рис. 5).

В отличие от анализируемых ранее реальных землетрясений [Баранов, Шебалин, 2019; Shebalin et al., 2020a; 2020b], во всех рассматриваемых экспериментах и на различных этапах нагружения наблюдается одномодальное распределение функции близости до “ближайшего соседа”. Исключение составил лишь случай техногенной сейсмичности в Хибинах [Баранов и др., 2020]. На наш взгляд, одномодальный вид полученных в нашей работе распределений можно объяснить малыми масштабами: фоновые и связанные события слишком близко расположены друг к другу в терминах функции близости (во времени–пространстве–магнитуде), так что “рандомная” и “кластеризованная” моды сливаются, перекрывая друг друга. Также одномодальность распределения может быть следствием погрешности локации: в отличие от натурной сейсмичности, где погрешность локации меньше или сравнима с размером очага землетрясения, в лаборатории погрешность локации больше или много больше размера очага акустической эмиссии. Микротрещины имеют, по-видимому, размеры не более 1 мм, а для мелкозернистых материалов вроде гранита Вестерли – существенно меньше 1 мм, а погрешность локации оценивается в первые миллиметры. Поскольку

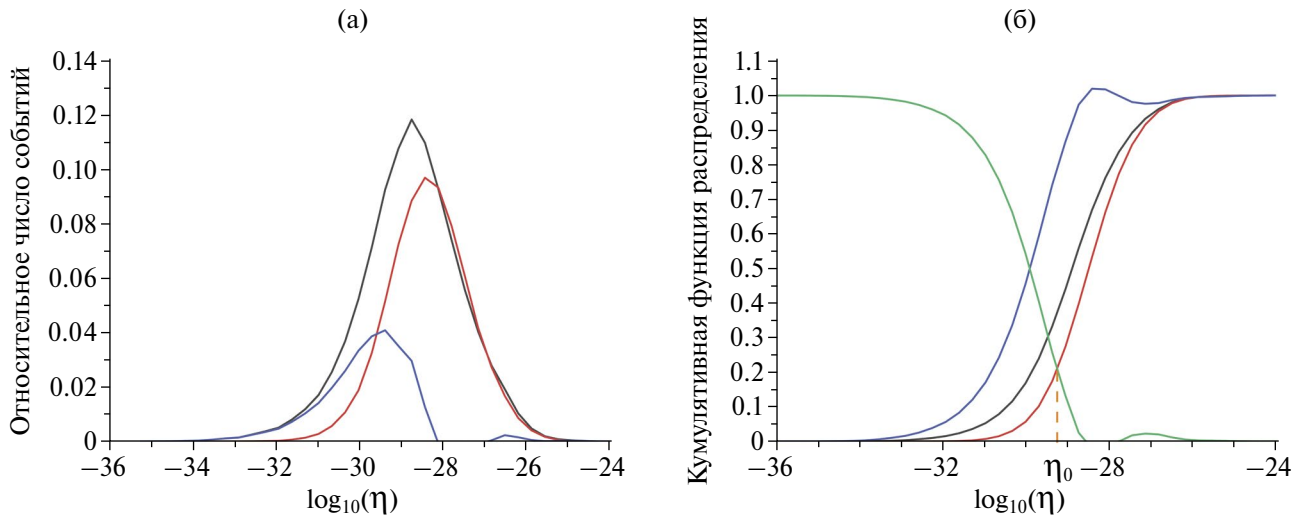


Рис. 3. Пример распределений для эксперимента BS02 после магистрального разлома: (а) – график выборочной плотности распределения функции близости до “ближайшего соседа”: черным цветом обозначено распределение $p_{\text{real}}(\eta)$; красным – $k p_{\text{rand}}(\eta)$; синим – $(1-k) p_{\text{clust}}^*(\eta)$; (б) – график кумулятивной функции распределения: черная линия – $F_{\text{real}}(\eta)$; красная – $F_{\text{rand}}(\eta)$; синяя – $F_{\text{clust}}^*(\eta)$; зеленая – $1 - F_{\text{clust}}^*(\eta)$.

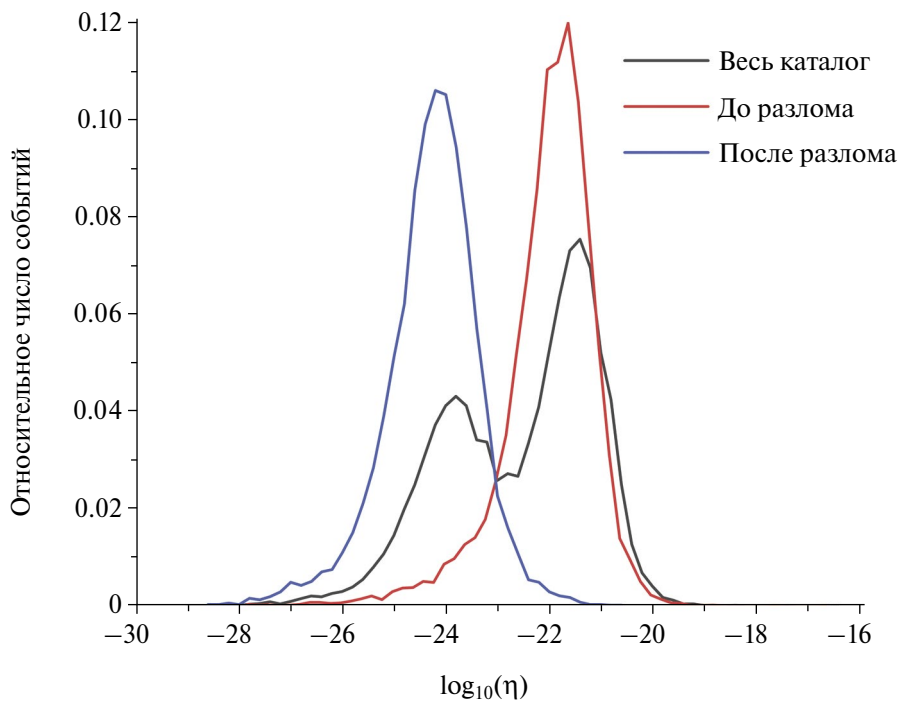


Рис. 4. Графики распределения функции близости до “ближайшего соседа” $p_{\text{real}}(\eta)$ для участков до, после магистрального разлома и всего каталога эксперимента AE42 с одинаковыми параметрами.

трещина искажает поле напряжений в области порядка своего размера, возможно, плохая локация не позволяет увидеть бимодальное распределение.

Бимодальное распределение получается лишь в случае эксперимента с образцом AE42 при рассмотрении полного каталога событий, это объясняется тем, что распределение состоит

из смеси двух потоков независимых событий с разной интенсивностью, а именно – частей до и после магистрального разлома (рис. 4).

Для экспериментов серии AE для участка с ростом дифференциального напряжения группировка не наблюдается (реальное и случайное распределения сливаются) (рис. 5). Скорее

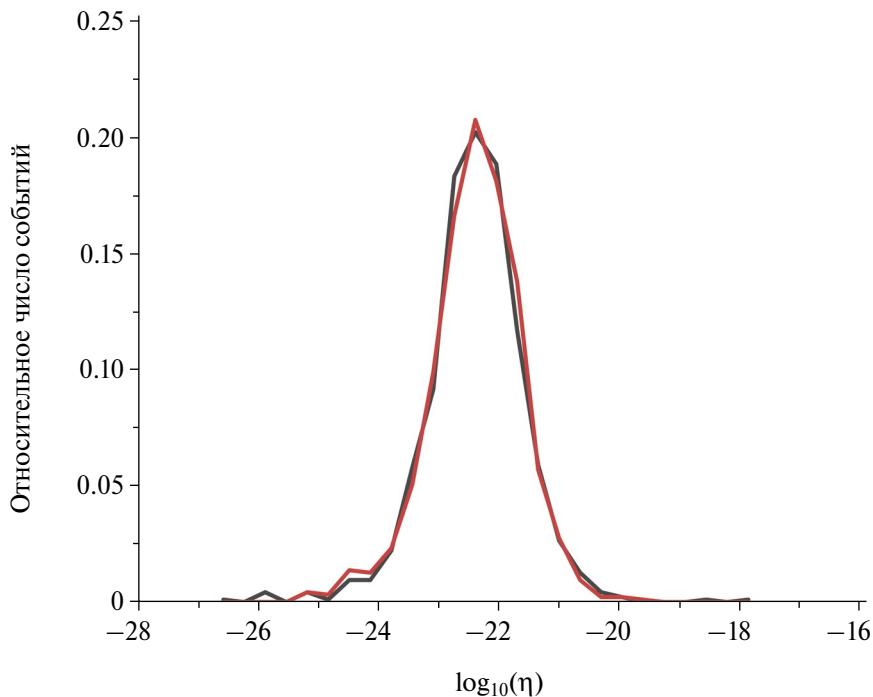


Рис. 5. Реальное (черная линия) и случайное (красная линия) распределения функции близости до “ближайшего соседа” для участка роста дифференциального напряжения образца AE42.

всего отсутствие группируемости на данном этапе объясняется тем, что кластеры событий только начинают образовываться. Соответственно, продуктивность на этих участках равна 0. На участке с постоянным дифференциальным напряжением в случае AE42 также нет группируемости событий. Поэтому мы рассматриваем только часть после разлома.

По полученным пороговым значениям функции близости были построены распределения продуктивности для каждого анализируемого лабораторного эксперимента и этапов нагружения (рис. 6, рис. 7). Как оказалось, продуктивность во всех рассмотренных экспериментах подчиняется экспоненциальному виду распределения.

В нашей работе относительный порог энергетического класса ΔK в каждом из рассматриваемых случаев выбирался таким образом, чтобы сохранялось достаточное число событий для анализа с учетом представительности каталога. Так, для этапа после разлома 1 в эксперименте над BS02 $\Delta K = 2$ оказался большим. Вышеописанные условия для относительного порога энергетического класса оставляют лишь 30–40 событий для подсчета продуктивности — недостаточно данных для получения явного вида зависимости. При варьировании значения порога выявляется более четкое экспоненциальное распределение (рис. 8а).

Была построена зависимость среднего значения $\Lambda_{\Delta K}$ от относительного ширины интервала энергетического класса ΔK : аналогично реальным событиям наблюдается лог-линейное увеличение параметра кластеризации с расширением интервала ΔK , соответствующее закону Гутенберга–Рихтера [Shebalin et al., 2020a; Баранов и др., 2020] (рис. 8б).

Другой параметр кластеризации — параметр k , определяемый при нахождении порога η_0 , — доля фоновых событий в каталоге. При анализе данных мы установили тенденцию уменьшения коэффициента k сразу после магистрального разлома. Эта тенденция сохранялась при разных способах рандомизации каталога. Например, в случае образца BS02 на участке до разлома $k = 0.87$, сразу после $k = 0.71$ при одном методе рандомизации и $k = 0.83$ до, $k = 0.73$ сразу после — при другом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Продуктивность землетрясения как число инициированных им событий в определенном диапазоне магнитуд характеризует кластеризацию сейсмичности в пространстве и времени. Выявление подобия закономерных свойств кластеризации в лабораторных экспериментах и натурных исследованиях, включая закон продуктивности, помогло бы ускорить процесс

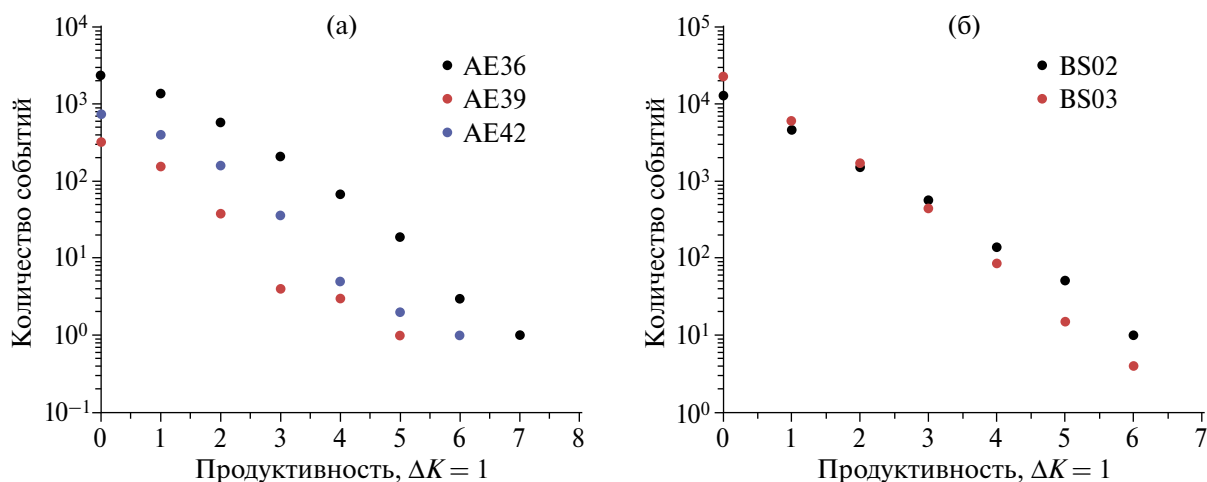


Рис. 6. Распределение продуктивности событий акустической эмиссии для областей экспериментов после магистрального разлома (областей афтершоковых событий): (а) – серия АЕ; (б) – серия ВS.

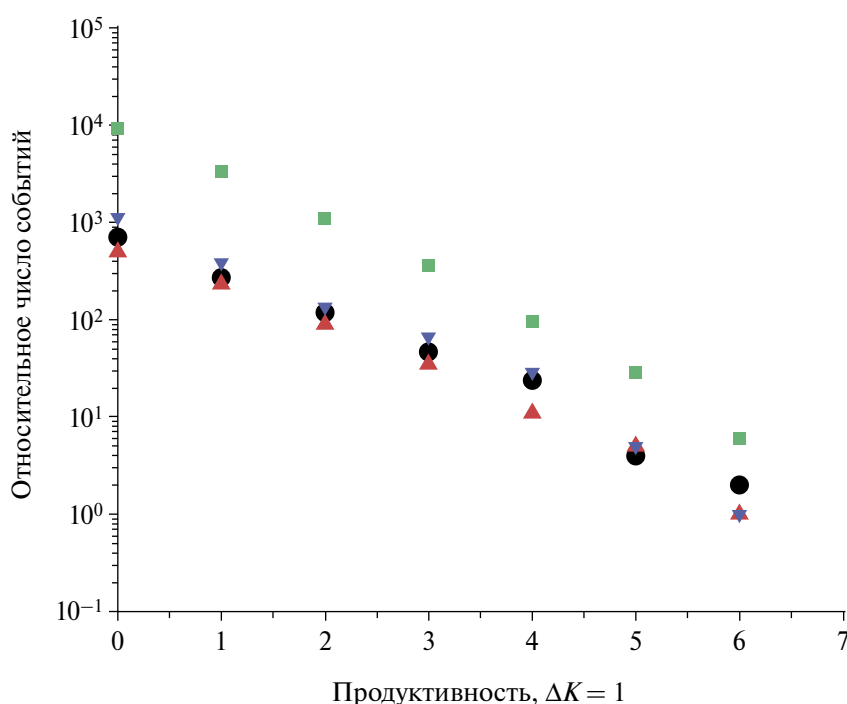


Рис. 7. Распределение продуктивности событий акустической эмиссии для различных областей нагружения в опыте BS02 (рис. 2б): черными кругами обозначено распределение до магистрального разлома; красными треугольниками – после разлома 1; синими треугольниками – после разлома 2; зелеными квадратами – после разлома 3.

изучения природы группирования и зависимости его параметров от различных условий. В отличие от натурных исследований, в лабораторных экспериментах возможно задание определенных параметров нагружения.

Изучение продуктивности возможно при условии установления однозначных связей инициирующее событие (“родитель”) – инициируемое событие (“потомок”). Простой и эффективный

способ определения таких связей был предложен авторами работ [Zaliapin et al., 2008; Zaliapin, Ben-Zion, 2013] на основе метода “ближайшего соседа”. Близость двух событий в этом методе определяется временем и расстоянием между ними с учетом фрактальных свойств среды и магнитуды событий [Baiesi, Paczuski, 2004]. В оригинальном подходе [Zaliapin, Ben-Zion, 2013] распределение функции близости до “ближайшего соседа” имеет

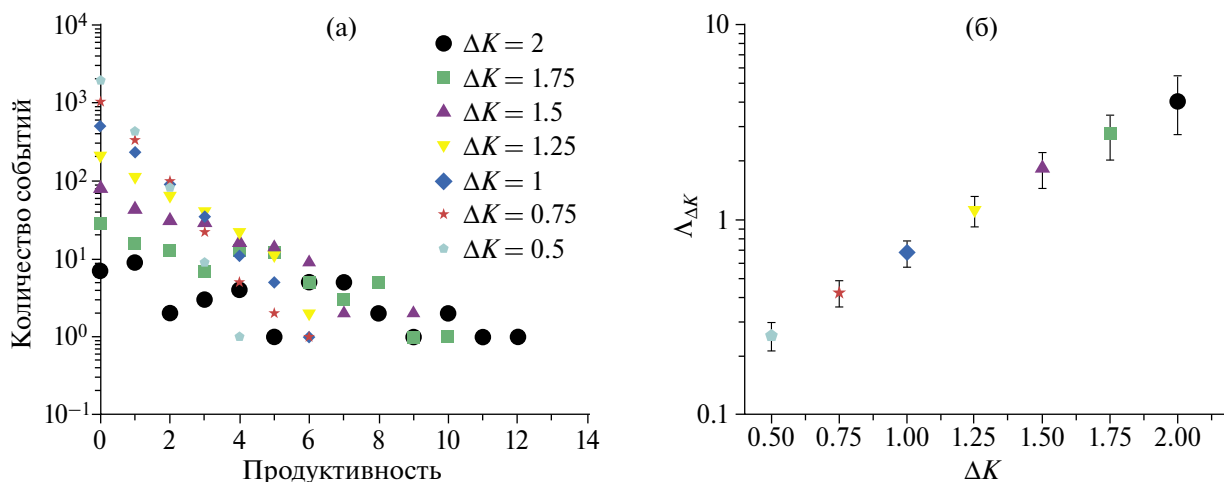


Рис. 8. (а) — Распределение продуктивности событий акустической эмиссии для области “после разлома 1” на рис. 2б, с разными ΔK : при разных значениях порога сохраняется экспоненциальная зависимость; (б) — средняя продуктивность событий акустической эмиссии в зависимости от относительного порога ΔK .

бимодальный вид и аппроксимируется суммой двух лог-нормальных распределений. В работе [Shebalin et al., 2020a] был предложен модельно-независимый способ разделения событий на фоновые и связанные, основанный на предположении, что правая часть распределения, соответствующая фоновым событиям, может моделироваться рандомизацией каталога землетрясений. Этот подход оказалось возможным использовать при анализе техногенных землетрясений, для которых обнаружилось одномодальное распределение функции близости до “ближайшего соседа” [Баранов и др., 2020].

При анализе в данной работе событий акустической эмиссии в лабораторных условиях также наблюдается одномодальное распределение функции близости до ближайшего соседа. Для определения порогового значения функции близости, разделяющего фоновые и связанные события, в нашей работе успешно применен подход, основанный на рандомизации каталога [Shebalin et al., 2020b; Баранов и др., 2020]. Этот подход позволил выявить случаи даже полного отсутствия кластеризации. Полученные нами одномодальные распределения указывают на то, что плотность фоновых событий акустической эмиссии в пространстве и времени сравнима с плотностью связанных событий. Отличие АЕ42 от других экспериментов вполне объясняется смесью двух потоков независимых событий с разной интенсивностью.

Одномодальный вид распределения может также быть вызван большой погрешностью локации. В данном исследовании это не так. Погрешность локации составляет 2–3 мм [Смирнов

и др., 2019; Смирнов, Пономарев, 2020] — много меньше среднего расстояния между событиями акустической эмиссии, которое мы оцениваем в пределах от 39.2 до 58.4 мм в зависимости от эксперимента. Тем не менее, именно одномодальный вид распределения послужил основанием для дополнительной проверки точности локации в некоторых экспериментах, анализ которых оказался за пределами рассмотрения в данной работе из-за возникшего сомнения в оценках погрешности локации событий.

Исследование продуктивности событий акустической эмиссии в рассмотренных лабораторных экспериментах показало, что экспоненциальный характер распределения как в случае всего каталога событий, так и в случае областей афтершоковых серий после магистрального разлома в рассматриваемых экспериментах, сохраняется при различных значениях относительного порога энергетического класса (при условии достаточной статистики).

Средняя продуктивность событий акустической эмиссии (параметр кластеризации) растет с ростом относительного порога ΔK аналогично ранее анализированным натурным событиям [Shebalin et al., 2020a; Баранов и др., 2020], что говорит об уменьшении параметра кластеризации в соответствии с наклоном графика повторяемости.

Коэффициент k соотношений (5), определяемый в рамках адаптивного подхода, является дополнительной величиной, определяющей долю фоновых событий в каталоге. Была установлена тенденция уменьшения коэффициента k сразу

после формирования магистрального разлома. Напротив, в случае экспериментов серии АЕ с растянутым во времени процессом разрушения до главного события связанных событий выделить не удастся.

На возникновение землетрясений прежде всего влияет наличие разломных зон, в том числе обуславливающих напряженное состояние горной породы [Кочарян, 2016]. Поэтому вполне естественно, что аналогия между зависимостями событий акустической эмиссии и землетрясениями наиболее отчетливо прослеживается на этапах с уже сформировавшимися разломами. Для АЕ серии до разлома группируемость не наблюдается, а для BS доля группируемых событий до формирования магистрального разлома меньше, чем после него.

Новое подтверждение закона продуктивности в случае событий акустической эмиссии при разрушении горных пород дает основание рассматривать экспоненциальное распределение продуктивности как общее свойство сейсмических событий разной природы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 20-17-00180-П).

БЛАГОДАРНОСТИ

Также авторы хотят выразить свою благодарность Т.Г. Елениной за ценные советы и замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баранов С.В., Жукова С.А., Корчак П.А., Шебалин П.Н. Продуктивность техногенной сейсмичности // *Физика Земли* 2020. № 3. С. 40–51.
- Баранов С.В., Шебалин П.Н. Закономерности постсейсмических процессов и прогноз опасности сильных афтершоков. М.: РАН. 2019. 218 с.
- Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М.: ГЕОС. 2016. 424 с.
- Моторин А.Ю., Жукова С.А., Баранов С.В., Шебалин П.Н. Воздействие обводненности среды на продуктивность природно-техногенной сейсмичности (на примере Хибинского массива) // *Физика Земли*. 2024. № 2. С. 3–14.
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Сергеева С.М. О подобии и обратной связи в экспериментах по разрушению горных пород // *Физика Земли*. 2001. № 1. С. 89–96.
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В. Физика переходных режимов сейсмичности. М.: РАН. 2020. 412 с.
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Станчиц С.А., Потанина М.Г., Патонин А.В., Dresen G., Narteau C., Bernard P., Строганова С.М. Лабораторное моделирование афтершоковых последовательностей: зависимость параметров Омори и Гутенберга–Рихтера от напряжений // *Физика Земли*. 2019. № 1. С. 149–165.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Акустическая эмиссия и стадии подготовки разрушения в лабораторном эксперименте // *Вулканология и сейсмология*. 1999. № 4–5. С. 50–62.
- Baiesi M., Paczuski M. Scale-free networks of earthquakes and aftershocks // *Physical review E*. 2004. V. 69. № 6. P. 066106.
- Baró J., Corral Á., Illa X., Planes A., Salje E.K.H., Schranz W., Vives E. Statistical similarity between the compression of a porous material and earthquakes // *Physical review letters*. 2013. V. 110. № 8. P. 088702. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.088702>
- Bayliss K., Naylor M., Main I.G. Probabilistic identification of earthquake clusters using rescaled nearest neighbour distance networks // *Geophysical Journal International*. 2019. V. 217. № 1. P. 487–503.
- Brace W.F., Byerlee J.D. Stick slip as a mechanism for earthquakes // *Science*. 1966. V. 153. P. 990–992.
- Grassberger P., Procaccia I. Measuring the Strangeness of Strange Attractors // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1983. V. 9. P. 189–208. DOI: 10.1016/0167-2789(83)90298-1
- Hainzl S., Sippl C., Schurr B. Linear relationship between aftershock productivity and seismic coupling in the Northern Chile subduction zone // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2019. V. 124. № 8. P. 8726–8738.
- Hirata T., Satoh T., Ito K. Fractal structure of spatial distribution of microfracturing in rock // *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. 1987. V. 90. № 2. P. 369–374. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1987.tb00732.x>
- Kandula N., Mc Beck J., Cordonnier B., Weiss J., Dysthe D.K., Renard F. Synchrotron 4D X-ray imaging reveals strain localization at the onset of system-size failure in porous reservoir rocks // *Pure and Applied Geophysics*. 2022. P. 1–26.
- Lei X., Ma Sh. Laboratory acoustic emission study for earthquake generation process // *Earthquake Science*. 2014. V. 27. № 6. P. 627–646. DOI: 10.1007/s11589-014-0103-y
- Lockner D.A., Byerlee J.D. Development of fracture planes during creep in granite. In Proc. 2-nd Conference on Acoustic Emission. Microseismic Activity in Geological Structures and Materials / H. R. Hardy, W. F. Leighton (eds.). Trans-Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany. 1980. P. 11–25.
- Lockner D. A., Byerlee J. D., Kuksenko V., Ponomarev A., Sidorin A. Quasi-static fault growth and shear fracture // *Nature*. 1991. V. 350. № 6313. P. 39–42.
- Marsan D., Helmstetter A. How variable is the number of triggered aftershocks? // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2017. V. 122. P. 5544–5560.

- Marsan D., Lengline J. Extending Earthquakes' Reach Through Cascading // *Science*. 2008. V. 319. P. 1076–1079. DOI: 10.1126/science.1148783
- McBeck J., Ben-Zion Y., Renard F. Fracture network localization preceding catastrophic failure in triaxial compression experiments on rocks // *Frontiers in Earth Science*. 2021. V. 9. P. 778811.
- Ogata Y. Statistical model for standard seismicity and detection of anomalies by residual analysis // *Tectonophysics*. 1989. V. 169. № 1–3. P. 159–174.
- Scholz C.H. The Mechanics of earthquakes and faulting (3-rd edition). Cambridge Univ. Press. 2019. 512 p. ISBN: 9781316615232
- Shebalin P.N., Narteau C., Baranov S.V. Earthquake productivity law // *Geophysical Journal International*. 2020a. V. 222. № 2. P. 1264–1269.
- Shebalin P.N., Narteau C., Baranov S.V. Earthquake productivity law // *Geophysical Journal International* (Supporting information). 2020b. V. 222. № 2. P. 1264–1269.
- Utsu T. Aftershocks and earthquake statistics (1): Some Parameters Which Characterize an Aftershock Sequence and Their Interrelations // *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University*. 1969. Series 7. Geophysics. 1970. V. 3. № 3. P. 129–195.
- Vilhelm J., Rudajev V., Ponomarev A.V., Smirnov V.B., Lokajčiek T. Statistical study of acoustic emissions generated during the controlled deformation of migmatite specimens // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017. V. 100. P. 83–89.
- Zaliapin I., Ben-Zion Y. Earthquake clusters in southern California I: identification and stability // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118. P. 2847–2864.
- Zaliapin I., Ben-Zion Y. A global classification and characterization of earthquake clusters // *Geophysical Journal International*. 2016. V. 207. № 1. P. 608–634.
- Zaliapin I., Gabrielov A., Keilis-Borok V., Wong H. Clustering analysis of seismicity and aftershock identification // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 101. № 1. P. 018501.

Acoustic Emission Events Clustering Parameters in Laboratory Rock Fracture Experiments

S. D. Matochkina^{a,b,*}, P. N. Shebalin^{a,c}, V. B. Smirnov^{b,d},
A. V. Ponomarev^d, and P. A. Malyutin^{a,b,d}

^a*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia*

^b*Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia*

^c*Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119296 Russia*

^d*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123995 Russia*

*e-mail: sofijamat@mail.ru

Received March 4, 2024

revised March 22, 2024

accepted April 27, 2024

Abstract — This paper verifies the compliance of the earthquake productivity law (Shebalin et al., 2020a) in laboratory experiments on rock destruction. Westerly granite and Benheim sandstone specimens were subjected to uniaxial loading under uniform compression. An acoustic-emission (AE) recording system made it possible to create catalogues of AE sources similar to earthquake catalogues. The data from experiments conducted at the Rock Friction Laboratory (USGS, Menlo Park, United States) and the Geomechanics and Rheology Laboratory (GFZ, Potsdam) were analyzed. It was found that the AE events in the considered samples are characterized by a unimodal distribution of the nearest-neighbor proximity function. The compliance of the productivity law for acoustic-emission events in laboratory experiments on the destruction of rock samples is shown, which gives grounds to speak about the similarity of grouping processes in real seismicity and in laboratory conditions.

Keywords: laboratory experiment, acoustic emission, proximity function, productivity, earthquake productivity law