

Спектральные характеристики источников акустической эмиссии в горных породах

Р. А. Пашченко*

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики Земли
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
(Поступила в редакцию 05.06.2024; подписана в печать 10.07.2024)*

Работа посвящена исследованию спектральных характеристик источников акустической эмиссии (АЭ) в горных породах. Осуществлен анализ данных ранее проведенных экспериментов на образцах песчаника и гранита с целью анализа акустических сигналов, возникающих при механических напряжениях, и определения их соответствия сейсмическим процессам. В работе описана калибровка системы, выполнен анализ учёта затухания волн и геометрических факторов. Основной задачей исследования стало определение корнер-частоты для оценки размеров трещин-излучателей. В ходе анализа было обнаружено, что для 99% событий корнер-частоты не выявлены в диапазоне 100–1250 кГц. Оставшиеся 1% событий дали корнер-частоты порядка 1080 кГц для песчаника и 975 кГц для гранита, что соответствует максимальным размерам трещин 0.5 мм и 1 мм соответственно. Результаты демонстрируют необходимость дальнейших исследований и корректировок методик, чтобы повысить точность измерений и понять физическую природу спектральных характеристик.

PACS: 43.20.Fn, 43.35.Cg, 91.30.-f, 91.30.Cd, 91.30.Px

УДК: 534.2, 550.34

Ключевые слова: акустическая эмиссия, спектральный анализ, корнер-частота, пьезоэлектрические датчики, модель Брюна, частотнозависимое затухание.

ВВЕДЕНИЕ

Акустическая эмиссия, возникающая в горных породах под действием механических напряжений, является результатом микроструктурных изменений, таких как образование новых трещин или рост уже существующих. Это явление характеризуется генерацией упругих колебаний, распространяющихся от источников эмиссии и взаимодействующих с различными дефектами и границами в материале, образуя сложные волновые картины. В рамках лабораторных испытаний очаги акустической эмиссии анализируются как микроскопические сдвиговые разрывы. Это позволяет провести параллель между механизмами возникновения микро- и макроразрывов на различных уровнях масштаба. Разработка моделей разрывов в условиях лаборатории, учитывая фрактальное и самоподобное строение коры Земли, предлагается как эффективный подход к моделированию процессов, приводящих к землетрясениям на реальных геологических масштабах.

Данная работа нацелена на анализ спектральных характеристик очагов акустической эмиссии, идентифицированных в ходе лабораторных экспериментов с образцами горных пород. Цель исследования — оценить, в какой степени спектральные параметры этих событий могут быть сопоставимы с характеристиками реальных землетрясений. Основной исследуемой характеристикой является корнер-частота. Она используется для оценки размеров разрывов и динамических характеристик источников землетрясений. Корнер-частоты широко применяются в моделировании сейсмических

источников и прогнозировании сейсмических воздействий. В статье [1] анализируются различные методы оценки корнер-частот, а также подчеркивается важность дальнейших исследований в данной области.

Важно отметить, что, несмотря на предполагаемую аналогию между акустической эмиссией и сейсмическими процессами, на данном этапе исследований мы не можем с уверенностью утверждать о её абсолютной достоверности. Данное предположение требует дальнейшего тщательного анализа и сопоставления экспериментальных данных с натурными наблюдениями.

Описываемая работа открывает перспективы для дальнейшего изучения возможных связей с механизмами землетрясений. Это, в свою очередь, может стать основой для разработки новых подходов к предсказанию и мониторингу сейсмической активности, хотя и требует более глубокого анализа и проверки гипотез на более широком массиве данных.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Испытания проводились на образцах песчаника с пористостью 18–20% и образцах гранита с пористостью 0.01%. Образцы подвергались одноосному сжатию, производимому управляемым гидравлическим прессом INOVA [2] в геофизической обсерватории Борок. Образцы зерна высотой 60 мм и диаметром 30 мм запаивались в медный жакет толщиной 0.1 мм и устанавливались в ячейку для испытания. Система регистрации акустических волн состояла из 16 пьезоэлектрических датчиков, расположенных на поверхности образца. Система записывала волновые формы сигналов акустической эмиссии со всех 16 датчиков с разрешением 12 бит и частотой оцифровки 2.5 МГц на канал.

* E-mail: pashchenko.ra20@physics.msu.ru

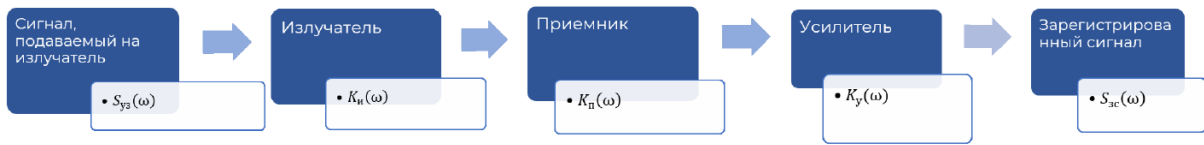


Рис. 1. Ход калибровочного сигнала. $S_{y3}(\omega)$ — спектр подаваемого ультразвукового сигнала; $K_n(\omega)$ — АЧХ излучателя; $K_p(\omega)$ — АЧХ приемника; $K_y(\omega)$ — АЧХ усилителя; $S_{zc}(\omega)$ — спектр зарегистрированного сигнала

1.1. Калибровка датчиков

Так как работа посвящена исследованию спектральных характеристик очагов акустической эмиссии, необходимо помнить, что, предполагая линейность всех преобразований сигнала, спектр выходного сигнала S_{out} связан со спектром входного сигнала S_{in} следующим соотношением:

$$S_{out} = K(\omega)S_{in}, \quad (1)$$

где $K(\omega)$ — амплитудно-частотная характеристика цепи.

Если применить быстрое преобразование Фурье к сигналу, который был получен в эксперименте, результат можно обозначить S_{out} , а очаговый спектр, в свою очередь, назовем S_{in} . Соответственно, чтобы иметь возможность приступить к изучению очаговых спектров S_{in} , необходимо выяснить вид АЧХ приемно-передающего тракта.

В исследовании необходимо было получить АЧХ приемно-передающего тракта в относительных единицах, то есть провести калибровку. Важно отметить, что абсолютная калибровка не проводилась. Чтобы выяснить вид АЧХ тракта, использовался алюминиевый образец, который обладает высокой добротностью и, соответственно, малым затуханием сигнала. К образцу алюминия, как и к образцам горной породы, были присоединены датчики акустической эмиссии. В эксперименте использовались пьезоэлектрические датчики. Пользуясь фактом обратимости пьезоэффекта, можно сделать вывод, что используемые датчики могут являться как приемниками, так и излучателями сигнала [3]. Так как используемые датчики одинаковы, калибровка была проведена только для одной пары датчиков. Принципиальная схема хода калибровочного сигнала изображена на рис. 1. На датчик-излучатель подавался ультразвуковой сигнал, который доходит до приемника и после усиления записывается. Частота дискретизации этого сигнала составляет 40 МГц. Пользуясь приведенным рисунком, перепишем выражение (1) для калибровочного испытания:

$$S_{zc} = K_n(\omega)K_p(\omega)K_y(\omega)S_{y3}, \quad (2)$$

где $K_n(\omega)$ и $K_p(\omega)$ — АЧХ излучателя и приемника соответственно. S_{zc} — спектр зарегистрированного сигнала, S_{y3} — спектр подаваемого ультразвукового сигнала. $K_y(\omega)$ — АЧХ усилителя.

АЧХ усилителя $K_y(\omega)$ известна и в диапазоне 50–1250 кГц характеристика плоская, как и спектр S_{y3} сигнала, подаваемого на излучатель.

Разнесем в разные стороны множители, касающиеся аппаратуры, и слагаемые, относящиеся к самому сигналу:

$$K_n(\omega)K_p(\omega)K_y(\omega) = \frac{S_{zc}}{S_{y3}}. \quad (3)$$

Как было сказано выше, пьезоэлектрический эффект является обратимым, из чего следует, что $K_n(\omega) = K_p(\omega)$. Тогда:

$$K_n(\omega) = \sqrt{\frac{1}{K_y(\omega)} \frac{S_{zc}}{S_{y3}}}. \quad (4)$$

Полученный результат (см. рис. 2) — АЧХ приемно-передающего тракта, которую мы и хотели найти, чтобы избавиться от влияния системы на вид очагового спектра. В дальнейшем будем называть величину $K_n(\omega)$ калибровочным спектром.

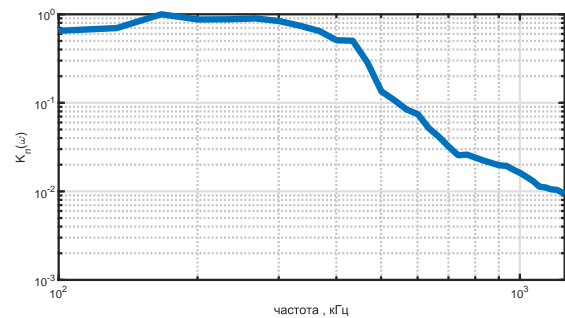


Рис. 2. Калибровочный спектр $K_n(\omega)$

Возвращаясь к формуле (1) в терминах очагового спектра S_{in} , спектра записанного сигнала S_{out} и АЧХ приемно-передающего тракта $K(\omega)$, теперь, зная, что $K(\omega) = K_n(\omega) = \sqrt{\frac{1}{K_y(\omega)} \frac{S_{zc}}{S_{y3}}}$, запишем выражение для очагового спектра:

$$S_{in} = \frac{S_{out}}{K_n(\omega)} = \frac{S_{out}}{\sqrt{\frac{1}{K_y(\omega)} \frac{S_{zc}}{S_{y3}}}}. \quad (5)$$

Таким образом, был получен спектр-делитель, который в дальнейшем будет использоваться нами для по-

лучения очаговых спектров. Важно отметить, что резкий спад полученной АЧХ тракта выше 400 кГц является сингулярной частью спектра.

2. ПОЛУЧЕНИЕ ОЧАГОВЫХ СПЕКТРОВ

На рис. 3 представлен типичный вид акустического сигнала, записанного одним из датчиков. Однако, в настоящей работе для получения спектров бралась не вся длина сигнала. Согласно теории сейсмического момента [4], очаговый спектр — это спектр первого вступления Р-волны. Кроме того, в процессе распространения акустической волны в объеме образца, волна претерпевает множественные реверберации. Опираясь на эти два факта, для анализа был взят не весь приведенный сигнал, а только один период, отвечающий первому вступлению Р-волны. В диапазон, рав-

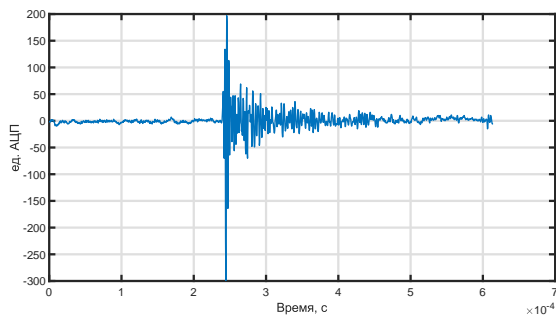


Рис. 3. Сигнал акустической эмиссии

ный одному периоду попадает не более 15 точек. Соответственно, после применения к этой части сигнала быстрого преобразования Фурье, остается не более 7 точек (необходимо учесть, что мы учитываем только положительную часть спектра, а также не исключаем точку, соответствующую частоте Найквиста). В связи с этим, возникает необходимость интерполировать спектр. Для этого был использован метод дополнения нолями или Zero-padding [5]. С помощью этого метода длина рассматриваемого сигнала была увеличена до 70 точек.

Для нахождения первого вступления использовался информационный критерий Акаике (AIC) [6]. Это статистический инструмент, используемый для оценки и сравнения моделей. Он оценивает качество каждой модели, учитывая количество параметров в модели и соответствие модели данным. AIC рассчитывается по формуле $AIC(t) = n \log(\sum_{i=1}^n x_i^2) - 2t$, где n — количество точек данных в окне, x_i — амплитуды сейсмического сигнала, а t — время, соответствующее конкретному временному окну. Для определения времени первого вступления сейсмических волн с помощью AIC сейсмические данные делятся на временные окна, для каждого из которых рассчитывается значение AIC. Момент времени, соответствующий окну с наи-

меньшим значением AIC, определяется как время первого вступления волн. Это позволяет автоматически выявить начало сейсмического события.

Ранее мы получили спектр-делитель, на который мы будем делить спектры записанных сигналов акустической эмиссии (АЭ). Однако, поскольку частоты дискретизации калибровочного спектра и спектров сигналов акустической эмиссии различаются, необходимо адаптировать калибровочный спектр к частоте дискретизации сигналов акустической эмиссии. Для этого используется ресемплинг данных: выбирается новая частотная сетка, на которой для калибровочного спектра и спектра сигнала акустической эмиссии вычисляются значения амплитуд путем интерполяции. Результат для одного из событий представлен на рис. 4. Все кривые были сглажены методом скользящей средней по 9 точкам. На рис. 5 представлено схематическое изображе-

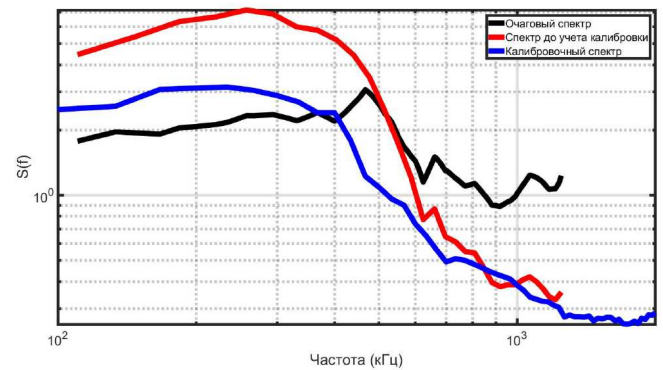


Рис. 4. Спектр сигнала акустической эмиссии, калибровочный спектр и очаговый спектр для одного из событий в образце песчаника

ние образца горной породы с датчиками АЭ. Красные линии схематически показывают расстояния, которые проходят акустические волны от источника до датчика. В дальнейшем для удобства мы будем называть эти линии трассами. Как видно из рисунка (который изображает одно из множества событий АЭ), расстояния от источника до разных датчиков различны, как и углы, под которым волны приходят к разным датчикам. В ходе анализа данных было обнаружено, что спектры акустической эмиссии, регистрируемые на различных датчиках, могут значительно отличаться. Основными факторами, способствующими этому, являются:

- Разные расстояния до источника: из-за геометрического расхождения волны амплитуда сигнала уменьшается с увеличением расстояния от источника к датчику.
- Разные углы подхода к датчикам: угол между направлением распространения волны и нормалью к поверхности датчика влияет на зарегистрированную амплитуду волны.
- Разные углы излучения (диаграмма направленности трещины-излучателя): ориентация трещины

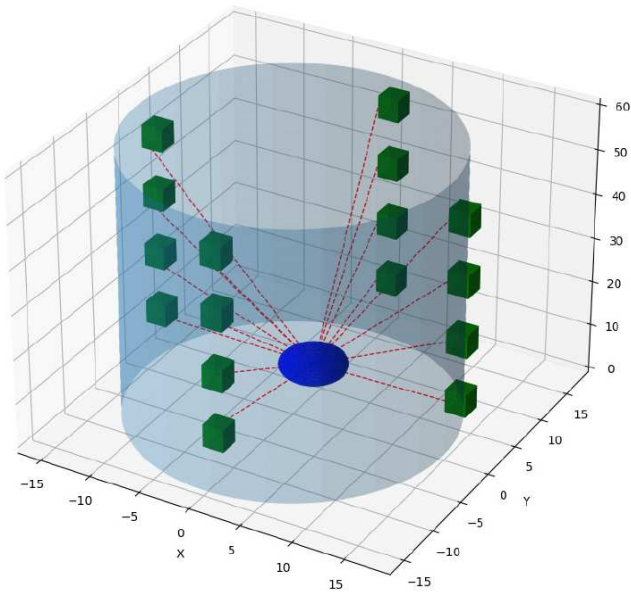


Рис. 5. Схематическое изображение образца горной породы с прикрепленными к нему пьезоэлектрическими датчиками (зеленые кубики), источником АЭ (синяя сфера) и трассами, соединяющими источник с разными датчиками

относительно датчика может влиять на характеристики сигнала из-за анизотропии излучения.

В целях коррекции этих различий в настоящей работе было проверено, какое влияние на разброс спектров по разным трассам оказывают учет геометрического расхождения, а также угла между направлением распространения фронта акустической волны и нормалью к точке крепления выбранного датчика к боковой поверхности образца. Поправка за угол может быть получена из следующего выражения:

$$A(0) = \frac{A(r)}{\cos \theta},$$

где $A(0)$ — амплитуда в источнике, θ — угол между направлением распространения акустической волны и нормалью к поверхности датчика.

Геометрическое расхождение — явление, при котором интенсивность волны уменьшается из-за увеличения площади, через которую она распространяется. Учитывая тот факт, что амплитуда объемной волны уменьшается обратно пропорционально пройденному волной расстоянию от источника, поправка за расстояние получается из следующего выражения:

$$A(0) = rA(r). \quad (6)$$

Так как нередко в рассматриваемых нами наборах данных, задающих спектры, присутствует некоторое количество экстремальных значений, дисперсия может оказаться значительно больше самих значений. Поэтому для того, чтобы оценить, насколько увеличивает-

ся разброс данных при учете тех или иных геометрических характеристик, рассчитывалось относительное отклонение от медианы [7].

По результатам расчета величины разброса спектров по разным трассам, проведенных для всех событий, был сделан вывод, что учет геометрического расхождения только увеличивает разброс спектров сигналов, приходящих на разные датчики. Хотя ожидался прямо противоположный результат. Таким образом, можно сделать вывод, что на данном этапе исследования мы не можем корректно учитывать эффект геометрического расхождения волны в нашем анализе. Это также может быть связано с некорректным определением положения события в образце.

2.1. Учет частотнозависимого затухания волн

Волны, распространяющиеся в горных породах, подвержены затуханию. Затухание может быть обусловлено как поглощением энергии из-за неупругости горных пород, так и рассеянием на упругих или неупругих неоднородностях.

Затухание вследствие поглощения или рассеяния принято описывать экспоненциальным законом:

$$A(f) = A_0 \exp(-\alpha(f)r), \quad (7)$$

где $A(f)$ — спектральная амплитуда сигнала в образце, A_0 — спектральная амплитуда исходного сигнала, r — расстояние от источника, $\alpha(f)$ — коэффициент затухания. В работе [8] была предложена аппроксимация $\alpha(f)r = a + bf^c$ и рассчитаны соответствующие коэффициенты a, b, c для тех же образцов горных пород, что описываются в настоящей работе.

Для оценки изменений в форме спектра при учете затухания вследствие поглощения была разработана метрика, которая сравнивает формы двух спектров, нормализуя их относительно максимальной амплитуды:

$$S_1^n = \frac{S_1}{\max(S_1)},$$

$$S_2^n = \frac{S_2}{\max(S_2)},$$

$$SSC = 1 - \frac{\|S_1^n - S_2^n\|}{\sqrt{n}},$$

где S_1, S_2 — спектры с учетом и без учета затухания соответственно; n — длина спектра, SSC — коэффициент подобия формы (shape similarity coefficient) [9]. Чем ближе значение SSC к 1, тем меньше различий в форме между спектрами, что означает, что изменение амплитуды не сопровождается значительным изменением формы спектра. Для песчаника указанный коэффициент составил более, чем 0.9, а для гранита более, чем 0.8. Медианные спектры для образца песчаника представлены на рис. 6.

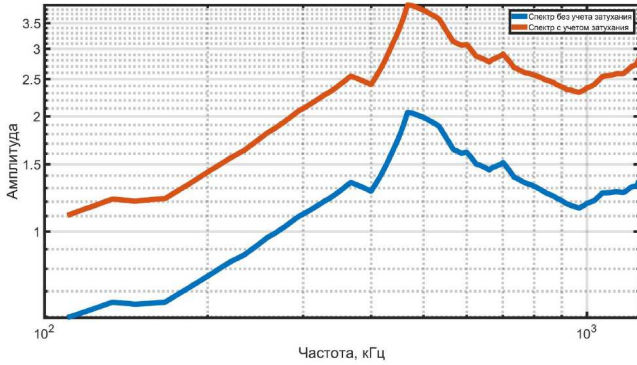


Рис. 6. Сравнение очаговых спектров с учетом затухания и без учета затухания для образца песчаника

Таким образом, учет затухания вследствие поглощения не вносит серьезные изменения в форму спектра, поэтому в дальнейшем анализе мы рассматривали спектры с учтенной поправкой на этот тип затухания.

3. РАСЧЕТ КОРНЕР-ЧАСТОТЫ В ОЧАГОВЫХ СПЕКТРАХ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

3.1. Теория расчёта характеристик очагов АЭ

Согласно модели Брюна, очаговый спектр смещений полностью описывается уровнем плоского участка спектра и его точкой излома — корнер-частотой [10, 11]. Корнер-частота f_0 является точкой пересечения в двойном логарифмическом масштабе двух прямых, а именно плоского ($\sim f^0$) участка спектра на низких частотах и его асимптотически прямолинейного спада по $\sim f^{-2}$ на высоких частотах. Низкочастотное плато связано с корнер-частотой приведенным ниже соотношением:

$$\Omega(f) = \frac{\Omega_0}{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}, \quad (8)$$

где Ω_0 — амплитуда низкочастотной области спектра смещений.

Корнер-частота f_0 связана с размером очага (радиусом трещины) следующим соотношением [12]:

$$r = \frac{0.37C_s}{f_0}, \quad (9)$$

где r — радиус трещины; C_s — скорость поперечной волны.

3.2. Сравнение экспериментальных спектров с модельным и расчет f_0

В работе было проанализировано более 59000 событий акустической эмиссии в образце песчаника и бо-

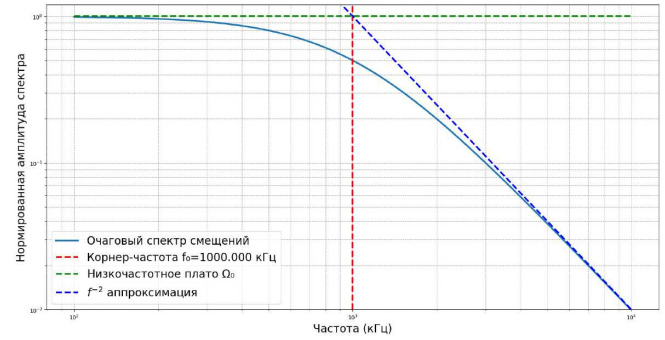


Рис. 7. Очаговый спектр смещений в модели Брюна

лее 30000 событий в образце гранита. С помощью метода наименьших квадратов подбирались такие значения Ω_0 и f_0 , при которых теоретически рассчитанный спектр наилучшим образом соответствует измеренным данным. Для достижения этой цели формулируется функция потерь как сумма квадратов разностей между измеренными и моделируемыми значениями на всем диапазоне частот:

$$E(\Omega_0, f_0) = \sum_i^N \left[S_{data}(f_i) - \frac{\Omega_0}{1 + \left(\frac{f_i}{f_0}\right)^2} \right]^2,$$

где $E(\Omega_0, f_0)$ — функция ошибки; $S_{data}(f_i)$ — измеренные значения спектра на частоте f_i ; N — количество точек данных.

Для нахождения оптимальных Ω_0 и f_0 функция ошибок минимизировалась с помощью метода Нелдера–Мида [13].

По результатам статистического анализа для более чем 99% событий не удалось обнаружить корнер-частоты в рассматриваемом нами частотном диапазоне 100–1250 кГц. По результатам анализа оставшегося 1% событий, были рассчитаны средние значения корнер-частот: 1080 кГц для образца песчаника, 975 кГц для образца гранита. На рис. 8 представлено сравнение экспериментального спектра с модельным для отдельного события.

В эксперименте были измерены скорости продольных волн: $C_p^{\text{песчаник}} \approx 2500$ м/с; $C_p^{\text{гранит}} \approx 5000$ м/с. Считая коэффициент Пуассона $\nu \approx 0.25$, получаем, что $C_s^{\text{песчаник}} = \frac{C_p^{\text{песчаник}}}{1.7} \approx 1500$ м/с; $C_s^{\text{гранит}} = \frac{C_p^{\text{гранит}}}{1.7} \approx 2900$ м/с. Пользуясь рассчитанным средним значением корнер-частоты, формулой (9), а также приведенными значениями скоростей, были вычислены предполагаемые радиусы трещин, составляющие ~ 0.5 мм для песчаника и ~ 1 мм для гранита. Чтобы понять, соответствуют ли рассчитанные размеры трещин реальности, можно сравнить размер трещины с размерами зерен в породе, считая, что трещины формировались на границах зерен. В статье [14] приведены расчеты максимального размера зерна, составляющего ~ 0.3 мм, в образцах песчаников, схожих с теми, что были рассмотрены в настоящей работе. То есть рассчитанные двумя

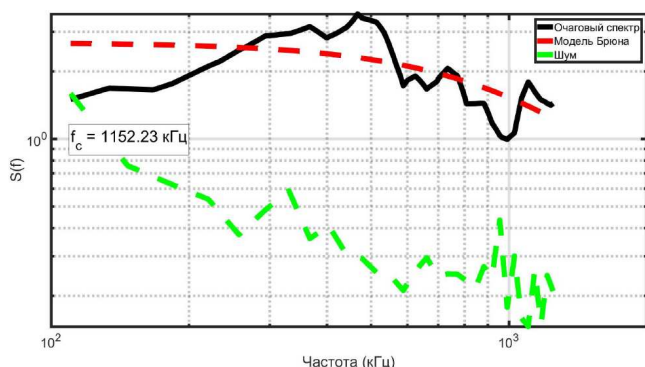


Рис. 8. Сравнение очагового спектра в образце песчаника с моделью Брюна

разными способами оценки размеров трещин схожи, что может свидетельствовать о применимости модели Брюна для описания песчаников, если речь идет о трещинах порядка 0.5 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных, полученных в ходе экспериментов в обсерватории Борок ИФЗ РАН, выполнен спектральный анализ первых вступлений волн, излучаемых источниками акустической эмиссии в образцах песчаника и гранита.

Одним из ключевых результатов является тот факт, что в большинстве (99%) проанализированных событий акустической эмиссии не были обнаружены корнер-частоты в рассматриваемом частотном диапазоне (100–1250 кГц). Это объясняется тем, что величина корнер-частоты обратно пропорциональна размеру источника. Большинство трещин, возникших в образцах во время эксперимента, имеют размеры настолько малые, что их корнер-частоты превышают аппаратный предел в 1250 кГц. На графиках спектров мы видим только низкочастотное плато.

Для примерно 1% событий обнаружен излом спектра и определена корнер-частота около 1080 кГц для песчаника и 975 кГц для гранита. Однако, диапазон частот 0.4–1.25 МГц приходится на нерегулярную область АЧХ тракта: в этом диапазоне калибровочный спектр имеет резкий спад, обусловленный характеристиками самих датчиков (резонанс на частотах 350–400 кГц). Кроме того, калибровка проводилась при частоте дискретизации сигнала 40 МГц, а частота квантования сигналов при реальных измерениях составляла 2.5 МГц. Калибровка не учитывает эффект зеркальных частот, что может вызвать искажения в данных. Соответственно, нельзя уверенно говорить о физиче-

ской природе спада спектра и наличии корнер-частот выше 400 кГц.

Если допустить, что спад спектров АЭ в районе 1 МГц имеет физическую природу, то оценки размеров трещин-излучателей по модели Брюна дают величины около 0.5 мм для песчаника и около 1 мм для гранита. Эти размеры являются максимальными для данных экспериментов, что означает, что большинство трещин-излучателей имеют размеры меньше 0.5 мм в песчанике и 1 мм в граните. Это согласуется с представлениями о возможных размерах трещин на основании других данных. Отсутствие трещин больших размеров подтверждается отсутствием соответствующих корнер-частот в частотном диапазоне 0.1–0.4 МГц. Таким образом, текущая аппаратура не позволяет исследовать параметры очагов АЭ в рассмотренных материалах.

Вид спектра источников АЭ в обеспечиваемом аппаратурой частотном диапазоне не соответствует излучению трещиной в рамках модели Брюна, если размеры трещин меньше 0.5–1 мм. Такие размеры излучателей представляются наиболее вероятными.

Калибровка тракта АЧХ может быть слишком грубой и не соответствовать действительности, особенно в области резкого спада АЧХ около 1 МГц. Для решения этой проблемы предполагается проведение дополнительных исследований для более точной оценки характеристик тракта регистрации, таких как АЧХ и ФЧХ, и выяснения того, какую характеристику движений (смещения, скорость, ускорение) регистрирует аппаратура.

Возможно, излучателями сигналов АЭ являются не трещины. Существуют другие механизмы излучения акустических волн, такие как схлопывание пор, разрушение межпоровых перегородок, скольжение и поворот зерен и др. В этом случае соотношение размеров излучателей и соответствующих корнер-частот будет иным, и модель Брюна не применима.

Благодарности

Автор выражает признательность канд. биол. наук ст. науч. сотруднику ГО «Борок» Шиховой Наталье Михайловне и канд. техн. наук ст. науч. сотруднику ГО «Борок» Патонину Андрею Викторовичу за предоставленные экспериментальные данные, а также глубокую благодарность доктору физ.-мат. наук зав. кафедрой физики Земли Смирнову Владимиру Борисовичу и доктору физ.-мат. наук гл. науч. сотруднику Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН Пономареву Александру Вениаминовичу за ценное обсуждение и полезные советы.

[1] Baltay A., Abercrombie R.E., Chu S., Taira T. // *Seismica*, 3(1) (2024).

[2] Патонин А.В., Пономарев А.В., Смирнов В.Б. // *Сейсмические приборы*. 49, № 1. 19 (2013).

- [3] *McLaskey G.C., Glaser S.D.* // *Journal of Nondestructive Evaluation*. Springer Science+Business Media, LLC (2012).
- [4] *Касахара К.* // *Механика землетрясений*: Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 264 с.
- [5] *Julius O., Smith III* // W3K Publishing, 2011, ISBN 978-0-9745607-3-1.
- [6] *Turino Ch., Morasca P., Ferretti G.* et al. // *Journal of Seismology*. **14**, 393 (2009).
- [7] *Dodge Y.* // *The concise encyclopedia of statistics*. New York: Springer. ISBN 978-0-387-32833-1.
- [8] *Румянцев И.В.* // *Бакалаврская работа*, Москва, 2023.
- [9] *Shanglin Liang, Tianyue Hu, Dong Cui, Pengcheng Ding* // *Journal of Geophysics and Engineering*. **17**, N 6. 1005 (2020).
- [10] *Brune J.N.* // *J. Geophys. Res.* **75**. 4997 (1970).
- [11] *Brune J.N.* // *J. Geophys. Res.* **76**. 5002 (1971).
- [12] *Аки К., Ричардс П.* // *Количественная сейсмология. Теория и методы*. Том. 2. М.: Мир, 1983. 772 с.
- [13] *Nelder J.A., Mead R.* // *Computer Journal*. **7**, 308 (1965).
- [14] *Подымова Н.Б., Пономарев А.В., Морозов Ю.А.* и др. // *Геофизические процессы и биосфера*. **22**, № 4. 13 (2023).

Spectral characteristics of acoustic emission sources in rocks

R. A. Pashchenko

*Department of Physics of the Earth, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia
E-mail: pashchenko.ra20@physics.msu.ru*

The work is devoted to the study of the spectral characteristics of acoustic emission sources (AE) in rocks. The analysis of data from previously conducted experiments on sandstone and granite samples was carried out in order to analyze acoustic signals arising from mechanical stresses and determine their compliance with seismic processes. The paper describes the calibration of the system, analyzes the consideration of wave attenuation and geometric factors. The main task of the study was to determine the corner frequency for estimating the size of the radiator cracks. During the analysis, it was found that for 99% of the events, the corner frequencies were not detected in the range of 100–1250 kHz. The remaining 1% of events produced corner frequencies of the order of 1080 kHz for sandstone and 975 kHz for granite, which corresponds to maximum crack sizes of 0.5 mm and 1 mm, respectively. The results demonstrate the need for further research and adjustments of techniques to improve measurement accuracy and understand the physical nature of spectral characteristics.

PACS: 43.20.Fn, 43.35.Cg, 91.30.-f, 91.30.Cd, 91.30.Px

Keywords: acoustic emission, spectral analysis, corner frequency, piezoelectric sensors, Brune model, frequency-dependent attenuation.

Received 05 June 2024.

Сведения об авторе

Пашченко Ростислав Александрович — студент 5-го курса кафедры физики Земли;
e-mail: pashchenko.ra20@physics.msu.ru.