

УДК 534.231.2:550.343.3

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРА РАЗВИТИЯ ОЧАГА
РАЗРУШЕНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА**

И. Ю. Рассказов¹, С. В. Цирель², А. О. Розанов², А. А. Терешкин¹, А. В. Гладырь¹

¹*Институт горного дела ДВО РАН, E-mail: adm@igd.khv.ru,
ул. Тургенева, 51, 680000, г. Хабаровск, Россия*

²*Санкт-Петербургский горный университет, E-mail: post@spmi.ru,
21-я линия В. О., 2, 199106, г. Санкт-Петербург, Россия*

На примере анализа измерений акустической эмиссии в двух горных выработках Объединенного Кировского рудника АО “Апатит” показан новый подход к решению проблемы локальной удароопасности и прогноза горных ударов. Он основан на спектрально-корреляционном анализе сигналов акустической эмиссии, с одной стороны, и на рассмотрении модели трещины Гриффитса – Ирвина — с другой. Регистрация сигналов акустической эмиссии проводилась с помощью портативного прибора локального контроля удароопасности нового поколения “Prognoz-L”, который обеспечивает цифровую регистрацию и обработку широкого ряда параметров акустических сигналов. На основании анализа спектральных параметров сигналов сделан вывод, что применение разрабатываемого программно-аппаратного комплекса является перспективным для прогнозирования динамических явлений в горном массиве.

Динамические проявления горного давления, геомеханика, сейсмика, акустическая эмиссия, механика трещинообразования, спектрально-корреляционный анализ случайных процессов

Одна из основных задач геомеханического мониторинга на удароопасных рудниках — оценка локальной опасности (прогноз вероятности динамических событий вблизи выработки). Для этого используется базовый геомеханический метод, основанный на эффекте дискования керна при колонковом бурении, но он весьма трудоемкий и требует длительного нахождения людей в опасной зоне. Чаше проводятся визуальные наблюдения за процессами на контуре выработок (деформирования, заколообразования, стреляния, шелушения и др.), более простые в применении, но не дающие обоснованного прогноза.

Весьма перспективным методом контроля состояния массива горных пород является метод акустической эмиссии (АЭ), осуществляемый с помощью стационарных или портативных приборов [1, 2]. Известно, что процессу разрушения, или трещинообразования, в горных породах сопутствует формирование акустического поля — явление акустической эмиссии [3]. Информативность акустической эмиссии при контроле процесса разрушения предполагает наличие регулярных, почти однозначных связей между источником излучения (развивающейся трещиной), свойствами контролируемой среды и параметрами акустического поля. В [4, 5] приведен

подробный анализ спектров акустической энергии, излучаемой в результате упругого соударения. Показано, что акустическая энергия в твердом изотропном теле при ударе перераспределяется на два различных процесса — волновое движение и стоячие колебания. Этот результат определил перспективный подход к интерпретации спектров АЭ, рассмотренный в работе.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

После установления связи параметров акустического поля со свойствами источника АЭ возникает задача определения напряженного состояния контролируемой среды, характеризующего формированием источников определенного типа. Практический интерес использования акустического метода на горнодобывающем предприятии связан с анализом так называемой динамической задачи. Решение динамической задачи для сейсмического источника (или акустического источника при измерениях менее интенсивных событий в высокочастотном диапазоне) направлено на выявление механизмов формирования в геосредах очагов разрушения и мгновенной релаксации распространяющимся разрывом накопленных вследствие медленных деформационных процессов напряжений в массиве горных пород. При этом большое значение имеет установление связи между кинематическими характеристиками разрыва (длина и скорость распространения) и поступлением энергии на кромке разрыва, необходимой для его инициирования и продвижения [6].

Фундаментальная модель разрушения, на анализе которой в данной работе основано описание завершающей стадии процесса, — это представление, основанное на связанных между собой критериях разрушения Гриффитса и Ирвина. Гриффитс в [7] показал, что разрыв оболочек из такого однородного материала, как стекло, содержащих трещину, происходит при напряжениях, меньших примерно в 100 раз предела прочности на растяжение для стекла. Критерием роста трещины по Гриффитсу является превышение энергии, выделяющейся при ее развитии, критического значения. Критерий Гриффитса эквивалентен критерию Ирвина [8], основанном на оценке напряженного состояния разрушаемой среды вблизи кромки трещины. Количественно такое напряженное состояние описывается коэффициентом интенсивности напряжений (КИН). Согласно Ирвину рост трещины происходит, когда КИН становится больше его критического значения. Каждый материал характеризуется своим значением критического коэффициента интенсивности, определяющим его трещиностойкость.

Критерии Гриффитса и Ирвина являются основными в механике трещинообразования в горных породах и широко применяются в современных практических оценках устойчивости горного массива [9]. В процессе хрупкого разрушения некоторая часть энергии упругой деформации, накопленная в области трещины, излучается в виде упругих волн. Например, в [4, 5] показано, что акустическая энергия, измеренная при упругом соударении стального шарика с поверхностью стеклянного образца, составляет порядка 1 % от общей механической энергии. Параметры регистрируемых волн содержат информацию об энергии релаксации напряжения, в нашем случае — об энергии трещинообразования и о размере трещин. Это дает прямую возможность характеризовать процесс разрушения по параметрам излучаемых упругих волн.

При исследовании акустической эмиссии на образцах из гранита [10–15] получено следующее представление о процессе формирования и развития очага разрушения. На первой стадии разрушения протекают в масштабе минеральных зерен и их контактов, которые обладают разными упругими характеристиками и жесткостями. На второй стадии развития очага разрушения происходит взаимодействие полей напряжения микротрещин и их объединение. Слияния микротрещин ведут к последующей мгновенной потере устойчивости объема горной породы и развитию макроразрыва на третьей стадии разрушения. Потеря устойчивости в горной

породе сопровождается резким падением напряжения и излучением упругих волн высокой энергии, которые регистрируются системами мониторинга как сейсмособытия. Энергия упругих волн, излученных в момент мгновенной потери прочности, зависит от объема накопленной энергии деформации. На последней запредельной стадии деформации, продолжающей динамическое макроявление, происходит относительная подвижка двух блоков горной породы по образовавшимся плоскостям разрыва.

С помощью спектрально-корреляционного анализа АЭ [12–14] установлено, что каждая стадия трещинообразования характеризуется своим уникальным спектральным образом сигналов АЭ, которому приписывается тот или иной механизм источника. Этот результат важен, поскольку в реальных условиях горного массива, наблюдая за эволюцией сейсмического процесса, по образам сигналов можно с достаточно высокой точностью определить, на какой стадии находится процесс разрушения в данный момент. Далее по распределению характерных образов во времени можно получить представление об энергетике процесса разрушения и перейти к оценке напряженно-деформированного состояния.

Цель настоящих исследований — разработка и применение спектрально-корреляционных критериев сигналов АЭ для описания напряженного состояния, которое вызывает образование новых или рост старых трещин. Этот процесс может приводить к динамическим проявлениям горного давления в горных выработках. На основе данных такого анализа можно сформулировать значимые критерии прогноза динамических явлений на новом уровне, который уже будет находиться не в плоскости вероятностного подхода, а в плоскости распределения реальных физических величин процесса. Таким образом, ставится задача проводить локальную оценку опасности тех или иных динамических явлений в горных выработках по параметрам геоакустического мониторинга горного массива.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для шахтных измерений применялся одноканальный портативный прибор “Prognoz-L” [16], разработанный в ИГД ДВО РАН для локального контроля удароопасности в горных выработках. Прибор позволяет осуществлять экспресс-оценку напряженного состояния горного массива по таким статистическим параметрам, как интенсивность сигналов АЭ и показатель амплитудного распределения, а также постобработку полностью оцифрованных волновых форм сигналов АЭ.

Для анализа спектральных и энергетических параметров волновых форм сигналов АЭ использовалось программное обеспечение, разработанное на основе финитного преобразования Фурье случайных процессов [17]. На этапе предварительной обработки сигналов АЭ на временной плоскости сигнал, представленный в виде временного ряда $x(t)$ с эквидистантными отсчетами, разбивается на n_d реализаций одинаковой длины T . Для того чтобы не было искажений спектра в области низких частот, проводится вычитание из сигнала среднего значения. Каждая из n_d реализаций подается на вход БПФ (быстрое преобразование Фурье), и таким образом оценивается спектральная плотность сигнала.

Важнейший аспект методики — кросс-спектральный анализ для выявления связанных между собой спектральных составляющих процессов $x(t)$ и $y(t)$, например пары сигналов АЭ. Для этого оцениваются кросс-спектральная плотность и функция когерентности (коэффициент корреляции между двумя переменными x и y в частотной области). С помощью ее расчета определяется степень связанности двух сигналов АЭ.

Поток сигналов АЭ по спектрально-корреляционным параметрам подразделяется на локализованные (принадлежащие одному типу кластера) и нелокализованные (дисперсное накопление) сигналы. Кластерами называются группы источников с предположительно близкими гипоцентрами, близость которых определяется неустойчивым взаимодействием, приводящим к переходу на более высокий масштабный уровень дефектов (трещин). Для обнаружения кластера применяется принцип выявления АЭ-дуплетов с помощью спектрально-корреляционного анализа. АЭ-дуплеты — это пара сигналов акустической эмиссии с одинаковыми формами огибающих волновых пакетов, частотным составом и близкими гипоцентрами, но излучаемые в разные моменты времени. Предполагается, что АЭ-дуплеты образованы одним и тем же типом трещин.

Анализ сигналов АЭ состоит из двух этапов. Первый этап — это выявление АЭ-дуплетов из общего потока сигналов. Им приписывается свойство источника, характеризующееся определенным механизмом трещинообразования. Второй этап — наблюдение за эволюцией данного источника с помощью расчета трендов медианных частот и стандартных отклонений сигналов АЭ. Медианная частота определяет отношение высоких и низких частот в спектре сигнала, тем самым являясь величиной, пропорциональной скорости движения трещины и обратно пропорциональной длине трещины, т. е. характеризует время образования трещины. Стандартное отклонение — параметр энергии каждого сигнала АЭ. На основе того, расходятся ли тренды медианной частоты и стандартного отклонения или изменяются синхронно, делается заключение о степени опасности очага разрушения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Первое измерение проведено в горной выработке Юкспорского месторождения Кировского рудника АО «Апатит» на отметке +373–379 м. Контроль места осуществлялся в период с 19.10.15 по 23.10.15. Место измерений характеризуется неоднородностью в виде контакта мончикитовой дайки (крепость по шкале М. М. Протодяконова $f=14-17$), залегающей в бедных апатит-нефелиновых рудах ($f=9-11$). На расстоянии 60 м проходит зона шпреуштейнизации со средней мощностью 12 м.

В данном месте наблюдалась низкая активность сигналов АЭ — примерно 20–100 сигналов в течение одного замера. В то же время зарегистрированы однократные низкочастотные сигналы, характеризующиеся специфической формой огибающей и частотным составом (рис. 1). С помощью обратного преобразования Фурье проведено разложение сигнала на две составляющие — низкочастотный узкополосный процесс (3.6 кГц) и высокочастотный широкополосный процесс (4.8–17.5 кГц).

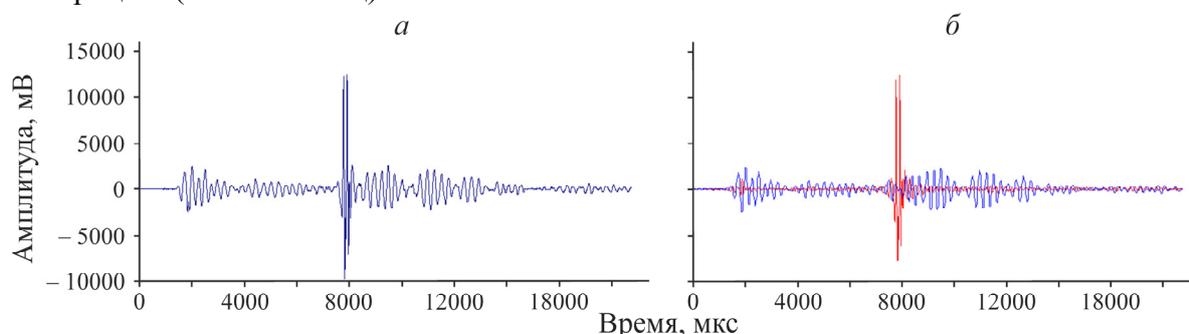


Рис. 1. Сигнал АЭ от подвижки по поверхностям нарушения в горном массиве (а); разложение сигнала на две составляющие (б): синим цветом показан низкочастотный узкополосный процесс, красным — высокочастотный широкополосный процесс

Таким образом, показано, что источник является комплексным и характеризуется двумя независимыми спектральными компонентами. Предположительно, такой источник классифицируется как мгновенная подвижка пород по поверхностям нарушения в горном массиве. Низкочастотный медленный процесс генерируется квазистационарным процессом трения между двумя областями горной породы, где локализована подвижка. Быстропротекающий импульсный процесс может означать преодоление сцепления на каком-либо участке подвижки, например излом шероховатости. Такой процесс разрушения описывается критерием Кулона – Мора.

На рис. 2 приведен характерный спектр сигнала подвижки по поверхностям нарушения в горном массиве и функции когерентности для двух дуплетов АЭ. Сплошной линией показана когерентность для АЭ-дуплета, зарегистрированного в первый день измерений 19.10.15, пунктирной — когерентность для сигналов, зарегистрированных 19.10.15 и 23.10.15. Видно, что на всем значимом частотном диапазоне сигналов АЭ когерентность имеет максимальное значение, равное 1. Причем форма этих функций характеризуется четко выраженным плато. Можно заключить, что выявлено семейство сильно связанных между собой сигналов по признаку механизма излучения и локализации в пространстве. Это семейство относится к очагу конкретного типа, а именно подвижкам по поверхностям нарушения в горном массиве, развивающимся на протяжении всего времени измерений на данном участке (с 19.10.15 по 23.10.15).

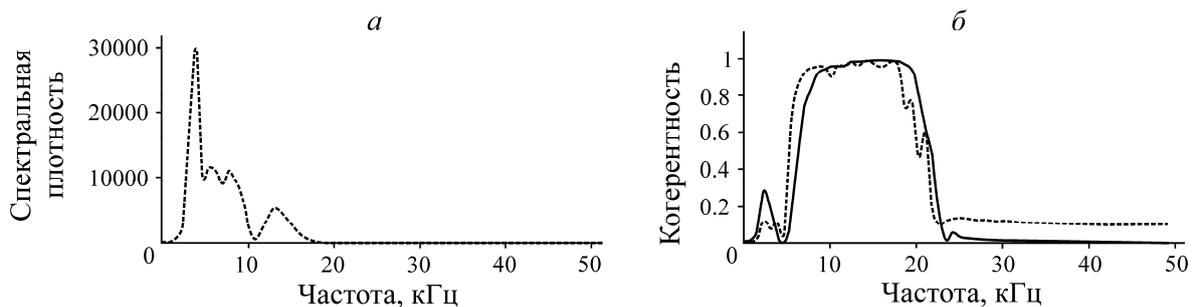


Рис. 2. Спектр сигнала АЭ от подвижки по поверхностям нарушения в горном массиве (а); когерентности для двух дуплетов АЭ данного типа (б)

На рис. 3 представлены тренды медианных частот АЭ и энергий АЭ для всего периода измерений. Видно, что в целом энергия АЭ растет к концу измерений (линия 1), а медианная частота понижается (линия 2). Повышение энергии характеризует увеличение накопленной в очаге энергии упругой деформации, что является предвестником крупного АЭ-события, в то время как понижение медианной частоты соответствует росту размера образующегося разрыва. Таким образом, схождение этих двух параметров АЭ может свидетельствовать о развитии очага данного типа, а участок массива соответствует категории “Опасно”. Действительно, пик энергии АЭ относится к двум мощным АЭ-событиям, зарегистрированным 23.10.15 в 11:42, а в 12:23 сейсмостанцией Кировского рудника зарегистрировано мощное сейсмическое событие с энергией $3.3 \cdot 10^4$ Дж. Это событие сопровождалось сотрясением массива, резким звуком и осыпанием пород кровли вблизи очистного пространства. Таким образом, в течение недели посредством локальных измерений в горной выработке наблюдалась подготовка мощного сейсмического события в районе контакта мончикитовой дайки с рудами.

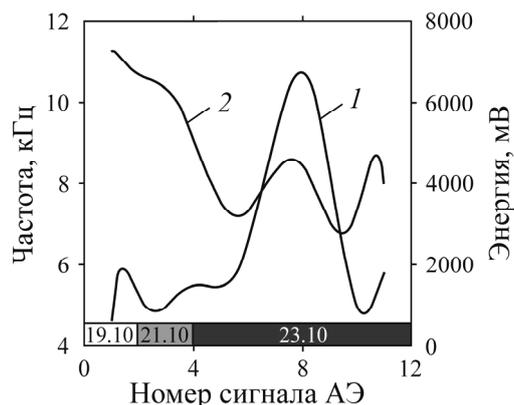


Рис. 3. Тренды спектральных параметров сигналов АЭ от подвижек по поверхностям нарушений в горном массиве: 1 — изменение энергии сигналов АЭ в течение недели замеров; 2 — изменение медианной частоты сигналов АЭ; прямоугольникам соответствуют сигналы АЭ, зарегистрированные в каждый из дней измерений

Рассмотрим еще один период измерений, выполненных в условиях Юкспорского месторождения. Проводился контроль перераспределения напряжений на нижние горизонты, произошедшего в результате выемки стыковочной секции на отметке +373–379 м (3-й буродоставочный горизонт). Измерения осуществлялись на отметке +354–358 м (2-й буродоставочный горизонт), непосредственно под стыковочным целиком, длина которого составляла 90 м, ширина — 40 м. Массив горных пород в месте измерений характеризовался наличием мончикитовой дайки крепостью $f=17-18$ в менее прочных апатит-нефелиновых рудах пятнисто-полосчатой текстуры ($f=5-7$). Отбойка стыковочного целика взрывными работами проведена 24.04.16; первое измерение состоялось 22.04.16, второе — 26.04.16.

На рис. 4 представлен характерный кросс-спектр и функция когерентности для АЭ-дуплетов, наблюдаемых при измерениях до отбойки стыковочного целика. Данный процесс характеризует стадию стабильного развития очага разрушения до начала неустойчивого формирования макроразрывов в результате перераспределения напряжений, вызванного отбойкой стыковочной секции. Сигналы АЭ имеют монохроматический спектр и соответствующую функцию когерентности, ее максимум строго соответствует частоте спектрального пика. Это свидетельствует о том, что на данной стадии трещинообразования наблюдаются связанные между собой сигналы, отличающиеся одночастотным спектральным составом. Предположительно, такие сигналы АЭ могут порождаться процессом объединения периодических структур неоднородностей, таких, например, как система одиночных трещин, расположенных друг относительно друга примерно на одинаковых расстояниях.

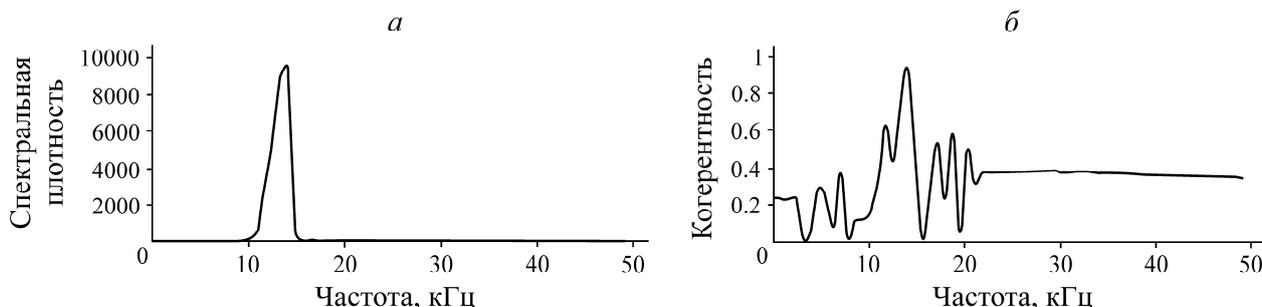


Рис. 4. Кросс-спектр АЭ-дуплета от объединения периодической структуры системы одиночных трещин в горном массиве (а); функция когерентности для данного АЭ-дуплета (б)

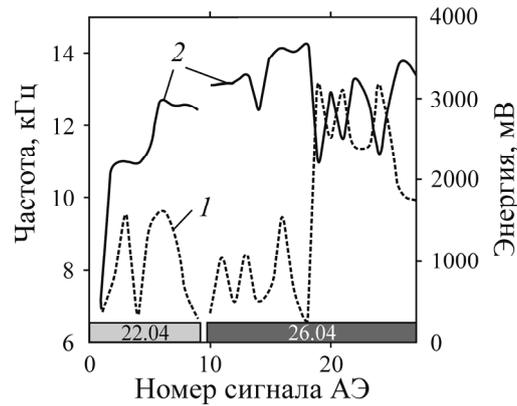


Рис. 5. Тренды спектральных параметров сигналов АЭ, полученные в результате мониторинга состояния горной выработки до (22.04.2016) и после (26.04.2016) отбойки стыковочной секции на вышележащем горизонте: 1 — изменение энергии сигналов АЭ; 2 — изменение медианной частоты сигналов АЭ

Спектры и когерентности, приведенные на рис. 4, соответствуют ступенчатому росту медианных частот сигналов АЭ, что можно видеть по тренду на рис. 5 (линия 2). Ступенчатость тренда медианных частот характеризует процесс как дискретный, т. е. обусловленный неоднородным строением пород на данном масштабном уровне дефектообразования. Повышение медианной частоты может быть вызвано увеличением скорости объединения периодических структур неоднородностей в связи с постепенным ростом напряжений в зоне контроля. Видно, что самая высокая ступенька тренда медианных частот соответствует дате измерений уже после отбойки стыковочной секции, когда действия напряжений интенсифицировались. В то же время данная стадия определяется как стабильная, поскольку энергия АЭ сравнительно низкая (линия 1).

В процессе измерений 26.04.2016 происходит резкий скачок энергии АЭ (линия 1), сопровождающийся понижением медианной частоты (линия 2). Такое очевидное изменение в поведении трендов частот и энергий свидетельствует о переходе процесса разрушения на следующую стадию развития очага. Как видно, эта стадия характеризуется колебанием показателей энергии и частоты АЭ в противофазе. Подобное поведение трендов является признаком неустойчивого развития трещин отрыва типа Гриффитса. Увеличению энергии сигналов АЭ соответствует понижение частоты, что означает увеличение размера трещины, и наоборот. Согласно модели Гриффитса, при увеличении размера трещины будет накапливаться все больше энергии упругой деформации в близлежащей области. Соответственно энергия, излученная в упругие волны, также будет расти при увеличении трещины отрыва, что и наблюдается при анализе трендов. Можно заключить, что перераспределение напряжений после выемки стыковочного целика привело к повышению их уровня на нижележащем горизонте, что вызвало неустойчивый процесс формирования трещин отрыва.

На рис. 6 показаны характерные спектральные образы формирования трещин отрыва. Видно, что кросс-спектр АЭ-дуплета трещины отрыва многокомпонентный и когерентность на всем частотном диапазоне низкая. Процесс трещинообразования с подобными спектральными образами определяется как несвязанный и лавинообразный, что является признаком объемного нарушения целостности приконтурной части горного массива.

По результатам выполненных исследований на участке массива горных пород в районе отбойки стыковочной секции установлена категория «Опасно», и именно здесь впоследствии наблюдались динамические проявления в форме стреляний и интенсивного заколообразования пород с разрушением контура выработки на протяжении более 20 м.

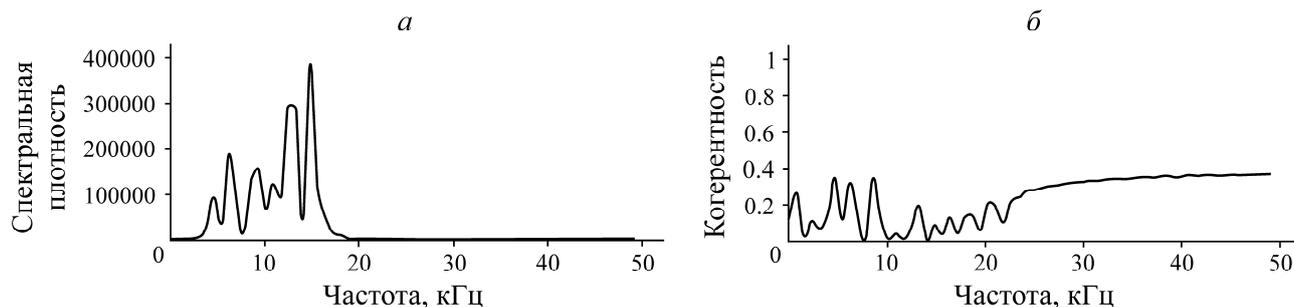


Рис. 6. Кросс-спектр для АЭ-дуплета от образования трещины отрыва типа Гриффитса (а); функция когерентности для данного АЭ-дуплета (б). Данные образы являются индикатором опасного формирования трещин отрыва больших размеров

Установлено, что применение методического подхода, основанного на спектрально-корреляционном анализе параметров волновых форм акустических событий, позволяет судить о характере геомеханических процессов в массиве горных пород и прогнозировать их дальнейшее развитие.

ВЫВОДЫ

Выдвинуто предположение, что появление сигналов АЭ, характеризующихся узкополосным спектром и высоким значением функции когерентности, которое приближается к единице в области максимальной спектральной плотности, свидетельствует о процессе объединения периодических структур микротрещин. При этом происходит локализация процесса разрушения и стимулированное развитие очага. Об устойчивости очага и его относительной безопасности свидетельствуют низкие значения энергии акустических сигналов.

При низких показателях когерентности сигналов АЭ (< 0.5), когда частоты сигналов резко падают, а энергии резко возрастают, наблюдается процесс перехода разрушения в неустойчивую фазу формирования макроразрывов типа Гриффитса, что указывает на опасное состояние горного массива.

Высокие значения функции когерентности сигналов АЭ (близкие к 1) в широком частотном диапазоне свидетельствуют о развитии мгновенных подвижек по контактам макронеоднородностей в горном массиве. Такие подвижки описываются критерием Кулона–Мора. При этом многократные подвижки в локальной области могут приводить к накоплению значительной энергии деформации и возникновению сильного динамического явления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рассказов И. Ю., Аникин П. А., Цициашвили Г. Ш.** Прогноз динамических проявлений горного давления на месторождении “Антей” по данным геоакустического мониторинга // ГИАБ. — 2013. — № 10. — С. 162–169.
2. **Рассказов И. Ю.** Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона. — М.: Горная книга, 2008. — 329 с.
3. **Лавров А. В., Шкуратник В. Л.** Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) // Акуст. журн. — 2005. — Т. 51. — № 5. — С. 6–18.
4. **Розанов А. О., Куксенко В. С., Савельев В. Н., Станчиц С. А., Пикулин В. А.** Оценка энергии источника упругих волн по параметрам акустических сигналов // Письма в ЖТФ. — 1993. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 28–32.

5. **Розанов А. О., Куксенко В. С., Савельев В. Н., Станчиц С. А.** Спектры упругой энергии в твердом теле от импульсного источника излучения // Физика твердого тела. — 1994. — Т. 36. — № 11. — С. 3381–3393.
6. **Аки К., Ричардс П.** Количественная сейсмология. — М.: Мир, 1983. — 502 с.
7. **Griffith A. A.** The phenomena of rupture and flow in solids, Philosophical transactions of the royal society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, 1921, Vol. 221. — P. 163–198.
8. **Irwin G. R.** Fracture, Handbuch der Physik, Springer Verlag, Berlin, 1958, Vol. 6. — P. 551–590.
9. **Backers T., Stephansson O., Rybacki E.** Rock fracture toughness testing in mode II — punch through shear test, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2002, No. 39. — P. 755–769.
10. **Reches Z., Lockner D. A.** Nucleation and growth of faults in brittle rocks, J. Geophys. Res., 1994, Vol. 99, No. B9. — P. 18159–18173.
11. **Zang A., Wagner C., Stanchits S., Janssen C., Dresen G.** Fracture process zone in granite, J. Geophys. Res., 2000, Vol. 105, No. B10. — P. 23651–23661.
12. **Rozanov A. O., Zang A., Wagner C., Dresen G.** Acoustic frequency signatures of laboratory fractured rocks. 63rd Conference, European Association of Geoscientists and Engineers, Extended Abstracts, 2001. — P. P036.
13. **Rozanov A. O.** Spectral and correlation analysis of acoustic emission waveforms and failure micromechanics in rocks, Int. Geophys. Conf. & exhibition “Geophysics of 21 Century — the Leap Into Future”, Extended Abstracts, Session OS22, 2003.
14. **Rozanov A. O.** Microseismic event spectrum control and strain energy release in stressed rocks, GEO 10th Middle East Geosciences Conference and Exhibition, 2012.
15. **Rozanov A. O.** Ultrasonic conductivity increase as a precursor of fracture process in rocks, 75th EAGE Conference and Exhibition Incorporating Spe Europec 2013, London, UK, 10–13 June 2013.
16. **Рассказов И. Ю., Мигунов Д. С., Аникин П. А., Гладырь А. В., Терешкин А. А., Желнин Д. О.** Геоакустический портативный прибор нового поколения для оценки удароопасности массива горных пород // ФТПРПИ. — 2015. — № 3. — С. 169–179.
17. **Rozanov A. O.** Using spectrum-correlation analysis for seismic wavefield separation, EAGE 61st Conference and Technical Exhibition, Extended Abstracts, 1999. — P. P181.

Поступила в редакцию 12/XII 2016