

УДК 622.02:539.2

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ
ПРИ НАГРУЖЕНИИ ОБРАЗЦОВ КАМЕННОГО УГЛЯ
И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ПРОГНОЗА РАЗРУШЕНИЯ**

В. Л. Шкуратник¹, П. В. Николенко¹, А. Е. Кошелев²

¹*Институт проблем комплексного освоения недр РАН,*

E-mail: ftkr@mail.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия

²*ООО "Газпром геотехнологии", ул. Строителей, 8, к. 1, 119311, г. Москва, Россия*

Экспериментально установлены закономерности изменения спектров акустической эмиссии, возникающей в образцах каменного угля Кузнецкого и Печерского угольных бассейнов при одноосном и всестороннем (по схеме Кармана) сжатии. Показано, что при одноосном нагружении при приближении к стадии разрушения образца значительно изменяется спектральный состав акустической эмиссии, увеличиваются амплитуды низкочастотных составляющих и снижаются амплитуды высокочастотных. При нагружении образцов по схеме Кармана также происходит увеличение амплитуд сигналов на низких частотах, однако снижения высокочастотной составляющей не отмечено, что связано с влиянием бокового гидростатического давления, препятствующего раскрытию трещин.

Каменный уголь, акустическая эмиссия, образец, спектр, одно- и трехосное нагружение, Кузнецкий угольный бассейн, Печерский угольный бассейн

DOI: 10.15372/FTPRPI20170503

Взаимодействие полей напряжений с разномасштабными структурными неоднородностями и геологическими нарушениями массива горных пород во многом определяет устойчивость любых находящихся в нем природных и природно-технических объектов [1–3]. Такое взаимодействие необходимо учитывать при прогнозе опасных динамических явлений в массиве и выборе технологических решений по управлению его состоянием. В связи с этим получение надежной информации о напряженно-деформированном состоянии (НДС) массива и его пространственно-временной динамике под влиянием природных и техногенных факторов всегда рассматривалось в качестве одной из приоритетных задач геоконтроля. В настоящее время накоплен значительный опыт ее решения различными методами горной геофизики и прежде всего акустическими [4–6].

Эффективная реализация методов в условиях углепородного массива предполагает, в частности, наличие априорных данных о закономерностях изменения измеряемых информативных параметров акустических сигналов в угле под влиянием НДС. Такие данные традиционно получают путем ультразвуковых активных или акустико-эмиссионных измерений на образцах угля при различных схемах и режимах их механического нагружения. Большинство из уста-

новленных закономерностей отражают влияние напряжений на скорости распространения и затухание продольных и реже поперечных упругих волн [7–10]. Применительно к методу акустической эмиссии (АЭ) соответствующие закономерности получены в основном в отношении такого информативного параметра, как активность АЭ [11–16]. Этот параметр несет информацию о количестве единичных актов возникновения и роста микро- и макротрещин, но не о их размерах. Последние могут быть качественно оценены только путем анализа спектральных характеристик АЭ [17, 18]. В настоящей работе предлагаются методические подходы и рассматриваются результаты определения таких характеристик в образцах угля при их одноосном и трехосном нагружении.

ПОСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследовались четыре группы (I–IV) образцов каменных углей. Группы I и II представлены углями пласта “Болдыревский” шахты им. С. М. Кирова Кузнецкого угольного бассейна, а группы III и IV — углями пласта “Тройной” шахты “Заполярная” Печерского бассейна. Все образцы имели высоту $H = 100$ мм, ориентированную вдоль слоистости. Форма образцов I и III групп — призматическая, со стороной квадратного основания $h = 50$ мм, а образцов II и IV групп — цилиндрическая, диаметром $d = 50$ мм.

Предварительно определенные усредненные значения физико-механических свойств углей I и II групп составили: плотность $\rho = 1400$ кг/м³; предел прочности при сжатии $\sigma_c = 15.1$ МПа; скорость распространения продольных упругих волн вдоль слоистости $V_p = 2310$ м/с. Для углей III и IV групп: $\rho = 1420$ кг/м³; $\sigma_c = 16.7$ МПа; $V_p = 2420$ м/с.

Каждая из i -й группы содержала по $n(i)$ образцов, прошедших предварительное цензурирование по измеренным на частоте $f = 200$ кГц значениям V_p , отклонение которых от среднего значения не превышало 7%. Количество образцов в группах составляло $n(I) = n(III) = 3$, $n(II) = n(IV) = 9$, что позволяло трижды проводить эксперимент при каждом из режимов нагружения.

На каждом из призматических образцов (I и III группа) закреплялись четыре преобразователя АЭ — два на торцевых и два на смежных боковых поверхностях. Затем образцы подвергались одноосному нагружению, которое обеспечивало линейное нарастание осевого напряжения σ_1 с заданной постоянной скоростью. Регистрация параметров АЭ, а также запись полных волновых форм АЭ событий велась с помощью многоканального акустико-эмиссионного измерительного комплекса A-Line 32D. Длительность записи одной волновой формы АЭ события составляла 5 000 отсчетов при интервале дискретизации 0.2 мкс. Кроме того, регистрировалось время проявления события с точностью до 1 мкс.

Зарегистрированные волновые формы АЭ событий подвергались быстрому преобразованию Фурье для получения спектров. Каждому спектру присваивался номер соответствующего канала акустического преобразователя и точное время появления АЭ события. По результатам обработки для каждого канала формировалась спектрограмма — трехмерное изображение, показывающее зависимость амплитуды $A = F(f, t)$ от частоты f и времени t . С учетом данных, полученных с динамометра пресса, время нагружения t пересчитывалось в осевую нагрузку на образец σ_1 . С целью повышения удобства интерпретации спектрограммы сглаживались скользящим средним окном, ширина и высота которого составляла 5% от общего количества зарегистрированных сигналов АЭ. Это приводило к искажению реальных значений A сигналов, поэтому в статье амплитуды приведены в условных единицах.

Для удобства отображения и анализа спектрограммы представлены в виде двумерных сечений на четырех разных частотах — 100, 200, 300 и 400 кГц. Нижнее и верхнее значения при этом являются границами частотного диапазона измерительного тракта акустико-эмиссионного комплекса. Поскольку характерные особенности спектрограмм на всех трех образцах каждой из групп повторялись, на рис. 1а приведен пример зависимости амплитуд акустической эмиссии A на разных частотах, зарегистрированных на верхнем торцевом преобразователе при испытании одного из образцов I группы; на рис. 1б — аналогичная зависимость, но для образца III группы.

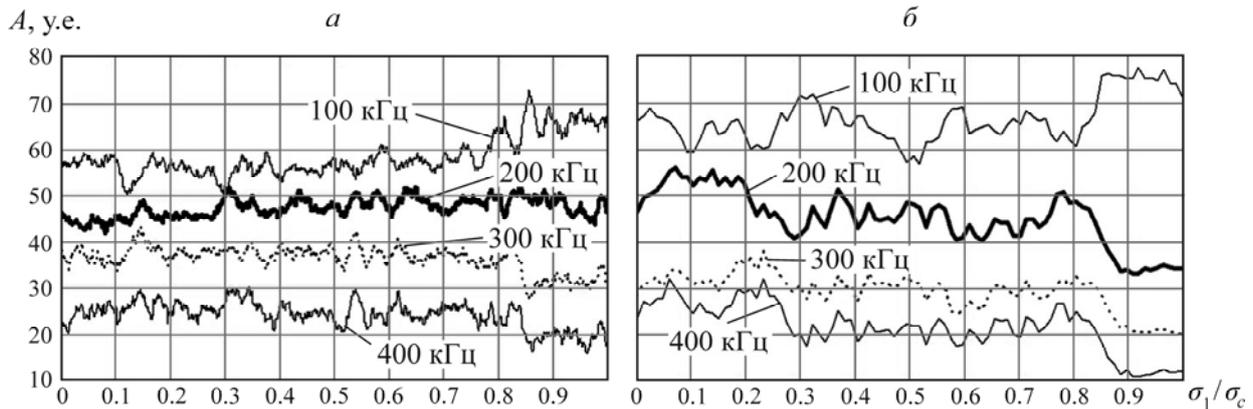


Рис. 1. Зависимость амплитуд сигналов АЭ на разных частотах от величины относительной осевой нагрузки при испытании образца угля: а — группы I; б — группы III

На рис. 2 показаны примеры зависимостей активности \dot{N}_Σ АЭ от осевой нагрузки σ_1 для углей разных месторождений.

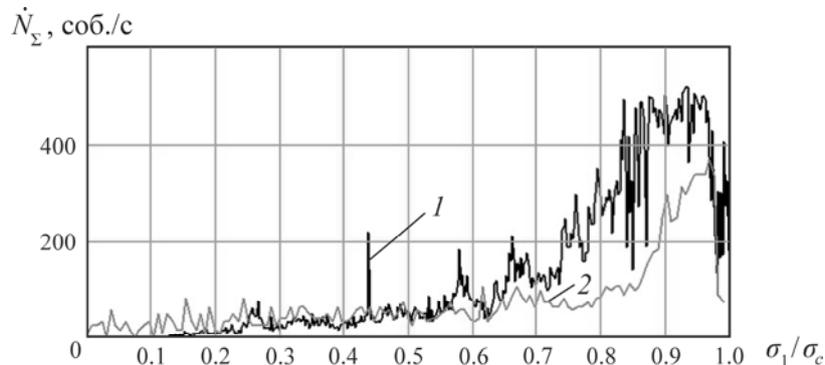


Рис. 2. Зависимости $\dot{N}_\Sigma(\sigma)$ для образцов углей Кузбасского (1) и Печерского (2) месторождений

Цилиндрические образцы подвергались двухосному нагружению (схема Кармана) на установке УДС 65/80, позволяющей проводить испытания при осевом напряжении σ_1 до 80 МПа и боковом давлении $\sigma_{2,3}$ до 50 МПа. Регистрация АЭ сигналов велась с помощью двух закрепленных на торцах образца приемных преобразователей акустической эмиссии. В рамках испытаний уровень $\sigma_{2,3}$ доводился до определенного значения и оставался постоянным, а σ_1 линейно возрастало до полного разрушения образца. На рис. 3 представлены данные испытаний, характерные для образцов Печерского угля для $\sigma_{2,3} = 2, 5$ и 7 МПа. Эти результаты характерны и для образцов Кузнецкого бассейна. Отметим также, что спектрограммы сигналов АЭ, зарегистрированных верхним и нижним приемными преобразователями, в значительной мере схожи, поэтому здесь приводятся только для одного из них.

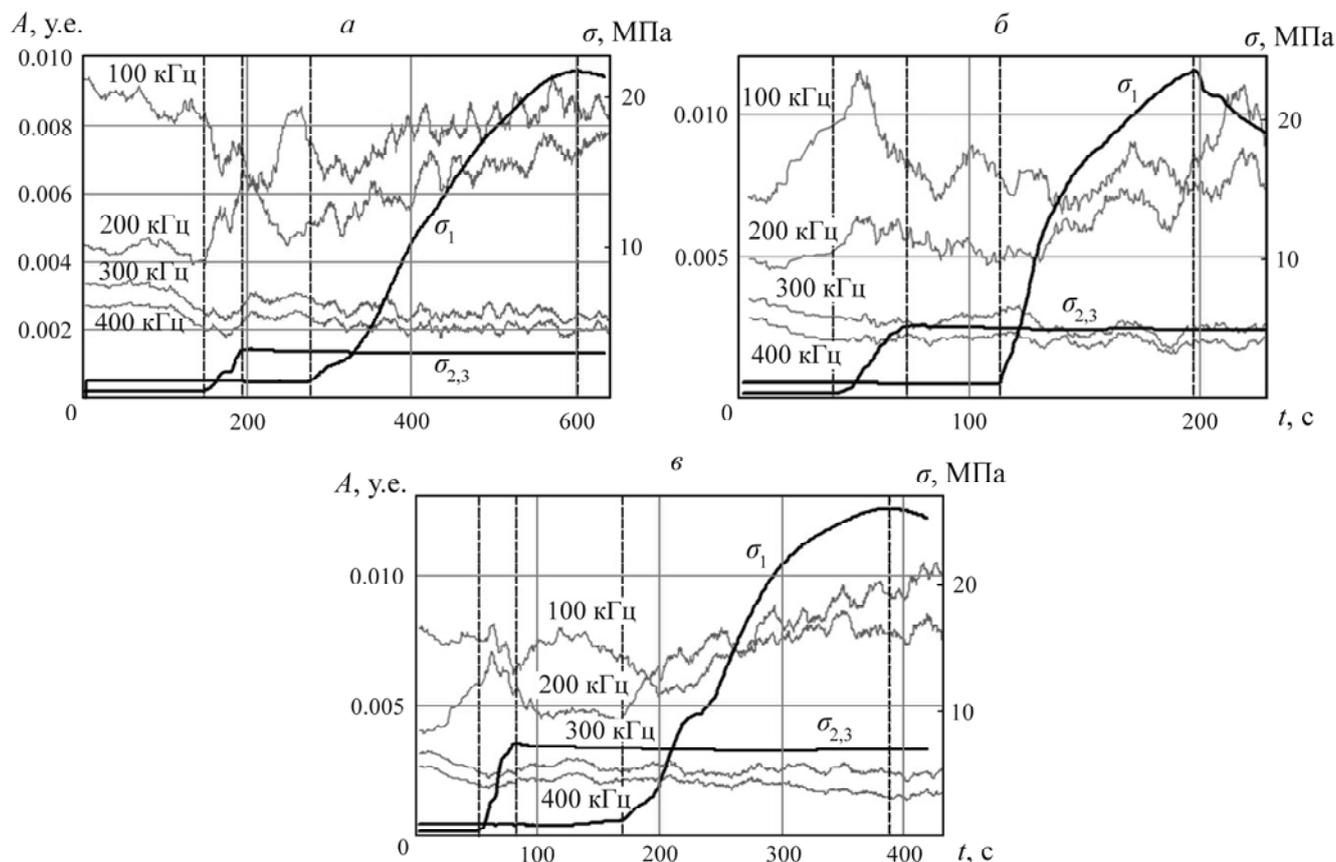


Рис. 3. Результаты испытаний образцов угля по схеме Кармана для $\sigma_{2,3} = 2$ МПа (а), 5 МПа (б) и 7 МПа (в) (штриховой линией показано время начала и конца нагружения)

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Из рис. 1 видно, что для всех четырех анализируемых частот изменение амплитуд сигналов как функции от σ_1 носит случайный характер, что вполне ожидаемо, учитывая структурную неоднородность угля и случайный характер изменения размеров возникающих при деформировании дефектов. Явно выраженных трендов в изменении зависимостей $A = f(\sigma_1)$ не наблюдается вплоть до $\sigma_1 \approx (0.80 - 0.85)\sigma_c$. Начиная с этих значений фиксируется резкое снижение амплитуд на высоких частотах на фоне увеличения амплитуд низких частот. Указанная закономерность наиболее четко проявляется на более прочных углях Печерского бассейна. Подобное изменение спектральных характеристик сигналов АЭ зарегистрировано только на торцевых преобразователях, при этом сигналы, зарегистрированные на боковых поверхностях призматических образцов, существенных изменений спектральных характеристик не испытывали.

Отмеченные особенности спектральных характеристик АЭ могут быть объяснены исходя из следующих модельных представлений. Спектр принимаемых АЭ сигналов $G_y(f)$ можно выразить в виде $G_y(f) = G_x(f)K_i(f)K(f)$, где $G_x(f)$ — спектр АЭ сигнала, возникающего в результате образования или скачкообразного роста трещины; $K_i(f)$ — амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) акустического тракта измерительной аппаратуры; $K(f)$ — коэффициент передачи геосреды от точки излучения к точке приема, который характеризует ее свойства как акустического фильтра.

Множитель K_i является константой, и при анализе относительного изменения формы спектров АЭ сигналов во времени им можно пренебречь. Множители $G_x(f)$ и $K(f)$ с ростом нагрузки претерпевают значительные изменения. Следует учитывать, что при определении относительного изменения спектров АЭ сигналов в процессе нагружения образцов нет необходимости, чтобы АЧХ акустического тракта аппаратуры была абсолютно равномерной во всем частотном диапазоне.

В [17, 18] показано, что множитель $G_x(f)$ связан с таким параметром трещины, как ее протяженность L , с увеличением которой частоты АЭ сигнала падают. В то же время множитель $K(f)$ отражает частотно-избирательные свойства трещины, которые аналогичны характеристикам фильтра низких частот [19]. При этом с ростом раскрытия трещины увеличивается подавление высокочастотных составляющих АЭ сигнала за счет механизмов отражения и рассеяния. При достижении уровня нагрузки $\sigma_1 \approx (0.80 - 0.85)\sigma_c$ начинается интенсивный рост протяженности трещин вдоль естественной слоистости и их раскрытия, что вызывает увеличение низкочастотной составляющей сигнала и уменьшение высокочастотной.

Сравнение представленной на рис. 2 зависимости активности АЭ от осевой нагрузки со спектрограммами на рис. 1 свидетельствует о том, что в качестве критерия перехода к стадии разрушения могут использоваться как резкое падение величины $\dot{N}_z(\sigma_1)$, так и резкие изменения спектрального состава АЭ. Однако, если падение $\dot{N}_z(\sigma_1)$ наблюдается при $\sigma_1 \approx 0.95\sigma_c$, то изменение в спектрах АЭ отмечается уже при $(0.80 - 0.85)\sigma_c$. Таким образом, использование спектральных характеристик в качестве информативных позволяет на более ранних стадиях прогнозировать разрушение образца при одноосном нагружении.

Из спектрограмм (рис. 3) для режимов нагружения образцов по схеме Кармана можно заключить следующее. Во всех случаях с ростом σ_1 при постоянном уровне $\sigma_{2,3}$ происходит увеличение амплитуды низкочастотных составляющих (100 и 200 кГц), при том что высокочастотные составляющие (300 и 400 кГц) практически не изменяются. Это объясняется тем, что, с одной стороны, растет протяженность трещин, а с другой — увеличению раскрытия трещин (образующихся преимущественно в вертикальном направлении вдоль слоистости [9]) препятствует боковое давление $\sigma_{2,3}$. Следовательно, увеличение $\sigma_{2,3}$ приводит к снижению влияния трещины как фильтра низких частот, т. е. влияние коэффициента $K(f)$ нивелируется. При этом для такого нивелирования достаточно выполнения условия $\sigma_{2,3} \geq 2$ МПа.

ВЫВОДЫ

Установлены закономерности изменения спектральных характеристик АЭ при одноосном (вдоль слоистости) и двухосном (схема Кармана) нагружении образцов угля. Показано, что в условиях одноосного нагружения переход образцов от стадии предразрушения к стадии разрушения сопровождается скачкообразным ростом амплитуд сигналов АЭ на низких частотах и их падением на высоких.

Такая закономерность продиктована кооперативным влиянием роста протяженности и раскрытия трещин на спектр излучаемого АЭ сигнала. При трехосном нагружении выделить границу стадий предразрушения и разрушения образцов по акустической эмиссии не удастся, что обусловлено влиянием латерального сжатия, препятствующего резкому росту протяженности трещин и существенно снижающего их раскрытие.

Отмеченные особенности спектров АЭ в условиях изменяющегося напряженно-деформированного состояния свидетельствуют о возможности их использования для прогноза перехода образцов в стадию разрушения, а также идентификации режимов нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Деструкция** земной коры и процессы самоорганизации в области сильного техногенного воздействия / В. Н. Опарин, А. Д. Сашурин, А. В. Леонтьев и др. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. — 632 с.
2. **Адушкин В. В., Опарин В. Н.** От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах // ФТПРПИ. — Ч. I, 2012. — № 2. — С. 3–27; Ч. II, 2013. — № 2. — С. 3–46; Ч. III, 2014. — № 4. — С. 10–38.
3. **Опарин В. Н., Еманов А. Ф., Востриков В. И., Цибизов Л. В.** О кинетических особенностях развития сейсмодиссипационных процессов при обработке угольных месторождений Кузбасса // ФТПРПИ. — 2013. — № 4. — С. 3–22.
4. **Назарова Л. А., Назаров Л. А., Протасов М. И.** Реконструкция объемных полей напряжений в углепородном массиве на основе решения обратной задачи по томографическим данным // ФТПРПИ. — 2016. — № 4. — С. 12–21.
5. **Николенко П. В., Набатов В. В.** Об обеспечении помехозащищенности геоакустического контроля критических напряжений в породном массиве // Горн. журн. — 2015. — № 9. — С. 33–35.
6. **Иванов В. И., Белов Н. И.** Влияние составляющих тензора напряжений на оценку напряженного состояния пород по скоростям упругих волн // Геофизические способы контроля напряжений и деформаций. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1985. — С. 3–6.
7. **Feng Z., Mingjie X., Zhonggao M., Liang C., Zhu Z., Juan L.** An experimental study on the correlation between the elastic wave velocity and microfractures in coal rock from the Qingshui basin, J. of Geophysics and Engineering, 2012, Vol. 9, Issue 6. — P. 691–696.
8. **Zheng Z., Khodaverdian M., McLennan J. D.** Static and dynamic testing of coal specimens, 1991, SCA Conference. — P. 9120.
9. **Назаров Л. А., Назарова Л. А., Роменский Е. И., Чеверда В. А., Эпов М. И.** Акустический метод определения напряженного состояния массива горных пород на основе решения обратной кинематической задачи сейсмоки // ДАН. — 2016. — Т. 466. — № 6. — С. 718–721.
10. **Шкуратник В. Л., Николенко П. В., Кошелев А. Е.** Зависимость скорости распространения и амплитуды продольных упругих волн от напряжений при различных режимах нагружения образцов каменного угля // ФТПРПИ. — 2016. — № 5. — С. 48–53.
11. **Николенко П. В., Шкуратник В. Л.** Особенности акустико-эмиссионных эффектов в анизотропных композиционных материалах и их использование для контроля напряжений в массиве горных пород // ФТПРПИ. — 2014. — № 6. — С. 217–223.
12. **Kong X., Wang E., He X., Li D., Liu Q.** Time-varying multifractal of acoustic emission about coal samples subjected to uniaxial compression, Chaos, Solitons and Fractals, 2017, Vol. 103. — P. 571–577.
13. **Xiao F., Liu G., Zhang Z., Shen Z., Zhang F., Wang Y.** Acoustic emission characteristics and stress release rate of coal samples in different dynamic destruction time, Int. J. of Mining Science and Technology, 2016, Vol. 26, Issue 6. — P. 981–998.
14. **Liu Q., Zhang R., Gao M., Li G., Zhang Z.** Acoustic emission characteristics and comprehensive failure precursors of coal under unloading conditions, Sichuan Daxue Xuebao (Gongcheng Kexue Ban), J. of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, Vol. 48. — P. 67–74.
15. **Xiao F., Wang Y., Zhao R.** Coal's damage evaluation under uniaxial compression and its characteristics by acoustic emission, Electronic J. of Geotechnical Engineering, 2016, Vol. 21, Issue 6. — P. 2365–2378.
16. **Шкуратник В. Л., Филимонов Ю. Л., Кучурин С. В.** Особенности эффекта Кайзера в образцах угля на различных стадиях трехосного осесимметричного деформирования // ФТПРПИ. — 2007. — № 1. — С. 3–10.
17. **Куксенко В. С., Станциц С. А., Томилин Н. Г.** Оценка размеров растущих трещин и областей разгрузки по параметрам акустических сигналов // Механика композит. материалов. — 1983. — № 3. — С. 536–543.
18. **Куксенко В. С., Мансуров В. А., Манжиков Б. Ц., Фролов Д. И., Станциц С. А., Инжеваткин И. Е.** Подобие в процессе разрушения горных пород на различных масштабных уровнях // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1990. — № 6. — С. 5.
19. **Ямщиков В. С., Шкуратник В. Л.** Акустическая спектроскопия массива горных пород // ФТПРПИ. — 1998. — № 2. — С. 116–123.

Поступила в редакцию 30/VIII 2017