

УДК 550.34; 622.83

**ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ
СЛОЯ ГЕОМАТЕРИАЛА ПРИ СДВИГОВОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ**

Г. Г. Кочарян, К. Г. Морозова, А. А. Остапчук

*Институт динамики геосфер РАН, E-mail: ostapchuk@idg.chph.ras.ru,
Ленинский проспект, 38, корп. 1, 119334, г. Москва, Россия*

Представлен новый метод анализа данных акустической эмиссии, сопровождающей подготовку динамических срывов, основанный на анализе волновой формы излучаемых акустических импульсов. Кластеризация импульсов по параметру волновой формы показывает, что в зоне локализации деформаций происходят разномасштабные процессы, характеризующиеся различными скейлинговыми соотношениями. Все классы акустических импульсов подчиняются степенному амплитудно-частотному распределению. Если для акустических импульсов с резким вступлением скейлинговые соотношения не изменяются по мере подготовки динамических срывов, то акустические импульсы с плавным вступлением демонстрируют их нелинейное изменение. На заключительной стадии подготовки динамического срыва наблюдается увеличение относительного количества акустических импульсов с плавным вступлением и их амплитуды.

Акустическая эмиссия, волновая форма, прерывистое скольжение, амплитудно-частотное распределение, динамический срыв

DOI: 10.15372/FTPRPI20190302

Любой деформационный процесс в массиве горных пород сопровождается увеличением поврежденности на микро- и макроуровне и излучением колебаний. Несмотря на то, что при образовании дефекта на излучение упругих волн расходуется лишь малая доля выделившейся энергии (~ 1 %), сейсмические и акустические методы контроля широко используются в лабораторных и полевых условиях [1 – 5]. Диапазон применения сейсмоакустических методов весьма обширен — от определения прочностных характеристик образцов до оценки устойчивости бортов карьеров и оползневых склонов [6, 7]. Излучаемые импульсы несут информацию как об источнике, так и о среде, по которой распространяются колебания [8].

Экспериментальные методы, алгоритмы обработки, подходы к анализу и интерпретации данных продолжают развиваться [9 – 11], что позволяет улучшить информативность получаемых результатов и расширить применимость методов. В настоящее время большое внимание уделяется исследованию динамики релаксационных процессов, обусловленной исходной и приобретенной структурой геосреды [12, 13]. Существенные изменения структуры сопро-

вождаются динамическими макросдвигами (распространение трещины в образце, обрушение склонов, подвижки по разломам и т. д.), поиску предвестников которых посвящены многие публикации [14].

В настоящей работе на примере процесса прерывистого скольжения блока скальной породы по тонкому слою геоматериала продемонстрирована возможность использования классификации излучаемых импульсов акустической эмиссии по их форме для контроля процесса подготовки динамического срыва.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты выполнялись на геомеханическом стенде Института динамики геосфер РАН (рис. 1а). Мраморный блок 1 размером $8 \times 8 \times 4.5 \text{ см}^3$ и массой 0.8 кг под действием приложенных нормального и сдвигового усилий скользил вдоль поверхности неподвижного гранитного стержня 2 длиной 2.5 м и площадью сечения $0.1 \times 0.1 \text{ м}^2$. Контакт между шероховатыми поверхностями блока и стержня заполнялся слоем мелкодисперсного гранулированного материала 3 толщиной 3 мм. В качестве заполнителя использовалась смесь кварцевого песка (200–315 мкм) и стеклянных шариков (100–315 мкм).

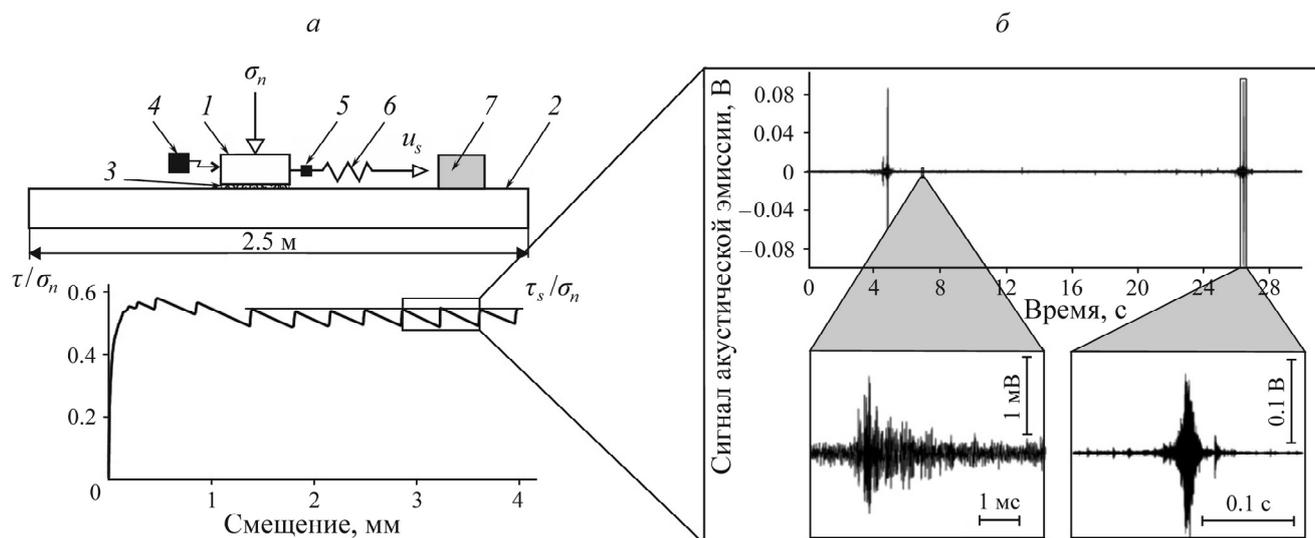


Рис. 1. (а) Схема экспериментальной установки и пример зависимости сдвигового сопротивления, нормированного на нормальную нагрузку, от смещения блока; б — пример записи сигнала акустической эмиссии, зарегистрированного между двумя последовательными динамическими срывами

Нормальная нагрузка на контакт $\sigma_n = 48 \text{ кПа}$ прилагалась через специальное устройство, что исключало появление дополнительных сдвиговых усилий на верхней грани блока. Сдвиговое усилие прикладывалось через пружину 6 жесткостью 55 кН/м, конец которой смещался с постоянной скоростью $u_s = 20 \text{ мкм/с}$. Сдвиговое усилие, создаваемое пружиной, контролировалось датчиком СФТ/5кН 5 (изготовитель НВМ, Германия) с точностью 1 Н, а динамика относительного смещения блоков — лазерными датчиками ИД2220-10 4 (изготовитель Micro-Epsilon, Германия) в диапазоне частот 0–5 кГц с точностью 0.1 мкм.

Смещение блока сопровождалось излучением высокочастотных упругих колебаний — акустических импульсов. Их регистрировал датчик акустической эмиссии VS30-V 7 (изготовитель Vallen System, Германия) с рабочим диапазоном 20–80 кГц, установленный на гранитном стержне на расстоянии 0.5 м от движущегося блока. Частота дискретизации записи

2 МГц. Во время эксперимента работа нагружающего устройства и внешние акустические сигналы не влияли на параметры регистрируемого сигнала. Уровень шума измерительного канала составлял 50 дБ.

Зависимость сдвигового сопротивления от смещения блока показана на рис. 1а. Во всех экспериментах реализован режим прерывистого скольжения — периодически повторяющихся актов динамических срывов, сопровождающихся резким сбросом сдвигового усилия. Параметры режимов прерывистого скольжения (максимальная скорость скольжения блока V_{\max} и рекуррентное время срывов T) приведены в таблице. Для детального анализа излучаемых в ходе скольжения блока акустических импульсов выбран запредельный участок установившегося прерывистого скольжения, на котором достигается остаточная прочность τ_s (рис. 1а). Пример сигнала акустической эмиссии, зарегистрированного между двумя последовательными динамическими срывами, представлен на рис. 1б. Выделяются два типа акустических импульсов. Первый — высокоамплитудные, сопровождающие динамический срыв, их амплитуда для разных заполнителей межблокового контакта составляет 79–105 дБ (таблица), а длительность 0.1–0.2 с. Второй — низкоамплитудные с различной волновой формой и длительностью, излучаемые на стадии подготовки динамического срыва. Их максимальная амплитуда на 10–15 дБ ниже амплитуды импульсов первого типа. В спектрах акустических импульсов выделяется до четырех максимумов на частотах 20, 45, 58 и 80 кГц. Если акустические импульсы, сопровождающие динамические срывы, характеризуются четырьмя максимумами, то спектры импульсов, излучаемых на стадии подготовки, могут содержать как один, так и несколько максимумов.

Параметры режимов скольжения блока

Параметр	Доля кварцевого песка, %						
	100	80	65	50	40	20	0
V_{\max} , мм/с	6.0±2.2	20.8±5.8	22.4±5.1	34.6±7.5	22.1±4.2	14.2±3.9	15.0±3.3
T , с	16.7±0.3	34.2±0.8	33.3±0.6	45.3±0.7	30.1±0.6	23.4±0.4	23.3±0.6
A_s , дБ	79.0±1.2	105.7±0.3	103.3±0.4	103.2±0.4	98.9±0.4	93.3±0.4	89.6±0.4

Для выделения акустических импульсов использовался энергетический критерий, следуя которому поток энергии $\Pi(t)$ должен превысить пороговый уровень Π_{\min} :

$$\Pi(t) = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} A(\tau)^2 d\tau \geq \Pi_{\min} = 1.5 A_{\min}^2.$$

Здесь $A(\tau)$ — сигнал акустической эмиссии, отфильтрованный в полосе от 20 до 80 кГц; A_{\min} — дисперсия сигнала акустической эмиссии, определенная в интервале 1 с, перед началом сдвигового нагружения; $\Delta t = 0.5$ мс (предполагалось, что длительность импульсов должна превышать 1 мс). В качестве начала акустического импульса брался первый момент времени t_s , когда поток энергии начинал превышать пороговый уровень, а в качестве его окончания — первый момент времени t_e , когда поток энергии становился ниже порогового уровня.

Для выделенных по энергетическому критерию акустических импульсов находилась амплитуда A_s , длительность $\Delta t = t_e - t_s$, параметр волновой формы $WI = (t_{\max} - t_s) / (t_e - t_{\max})$, характеризующий форму волнового пакета, а также энергия

$$E = \int_{t_s}^{t_e} A^2(t) dt.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эволюция состояния тонкого гранулированного слоя, контролирующего скольжение блока, определяется сложной комбинацией механических процессов разного масштаба. В лабораторных экспериментах доминирующими механическими процессами, протекающими в зоне межблокового контакта, являются разрушение конгломератов нагруженных зерен, их вращение, а также переупаковка зерен. Согласно [15], волновая форма акустических импульсов характеризует механизм трещинообразования. Акустические импульсы волновой формы с резким вступлением (низкие значения WI) присущи для “трещин отрыва”, а импульсы с плавным вступлением (высокие значения WI) — для “трещин сдвига” (рис. 2).

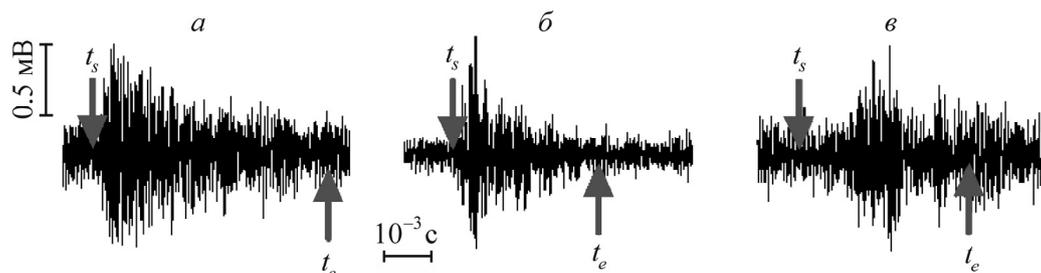


Рис. 2. Акустические импульсы с разными параметрами волновой формы WI : a — 0.08; $б$ — 0.20; $в$ — 0.72

В ранее проведенных исследованиях статистический анализ не учитывал волновую форму импульсов. На рис. 3 показано распределение акустических импульсов по параметру WI , зарегистрированных в ходе одного эксперимента. Все импульсы формируют непрерывный ряд волновых форм. Выделяются два участка: “полка” ($WI < 0.1$) и степенное снижение ($WI > 0.1$). Для дальнейшего анализа все импульсы условно разделены на три класса: “трещины отрыва” $WI \in (0 : 0.1]$, “промежуточный” класс $WI \in (0.1 : 0.2]$ и “трещины сдвига” $WI \in (0.2 : 1]$.

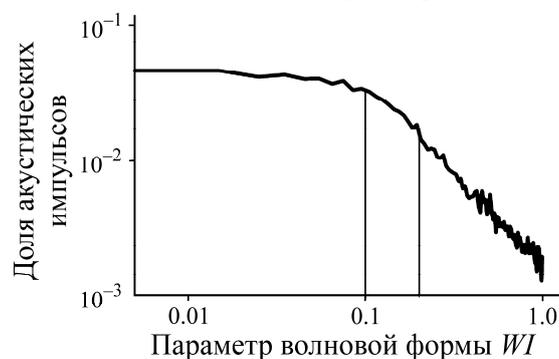


Рис. 3. Распределение акустических импульсов по показателям волновой формы WI для эксперимента с заполнением кварцевым песком 50 %

Для понимания особенностей эволюции состояния контакта важно знать динамику развития процессов деструкции заполнителя на микроуровне. Информативным является анализ скейлинговых параметров, характерных для разных классов акустических импульсов. Рассмотрим закономерности изменения амплитудно-частотного распределения, которое должно иметь степенной вид:

$$\lg \left(\frac{N}{N_{\text{общ}}} \right) = a - b \lg \left(\frac{A_s}{A_{\text{min}}} \right), \quad (1)$$

где a, b — положительные константы.

Коэффициент b — скейлинговый параметр, указывающий на особенности развития динамического процесса [16]. Распределение (1) аналогично распределению Гутенберга–Рихтера, используемому в сейсмологии [17]. В природе коэффициент b изменяется от 0.5 до 1.5 [18].

Распределение всех акустических импульсов, зарегистрированных в ходе одного из экспериментов, представляет суперпозицию двух распределений (рис. 4а). В области низких амплитуд наблюдается характерное степенное распределение (1), а в области высоких амплитуд — пикоподобное распределение, которое соответствует динамическим срывам. Анализ импульсов различных классов на стадии подготовки динамических срывов показывает отчетливое различие характерных значений коэффициента b (рис. 4б). Для класса “трещины отрыва” коэффициент b принимает минимальное значение, в то время как для “трещин сдвига” — максимальное. Это значит, что для акустических импульсов, отнесенных к классу “трещин сдвига”, доля низкоамплитудных импульсов существенно выше, чем для класса “трещин отрыва”. Выявленное различие коэффициентов b сохраняется при изменении вещественного состава материала-заполнителя межблокового контакта.

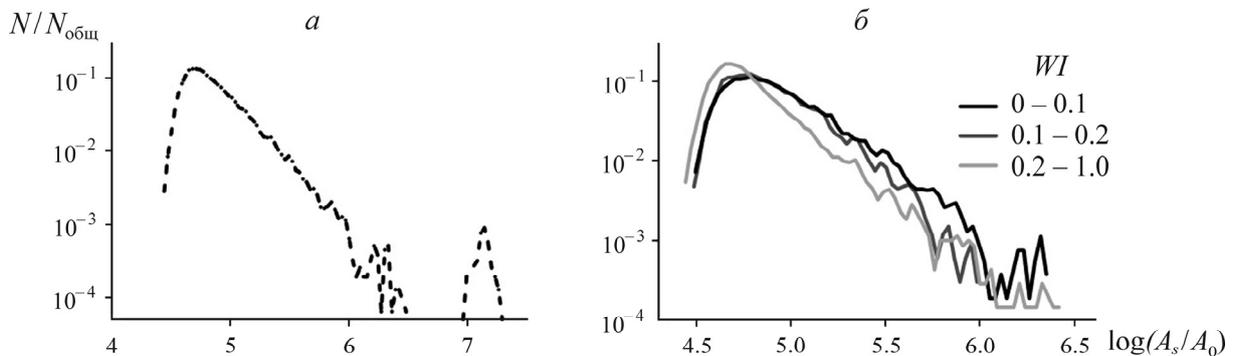


Рис. 4. Амплитудно-частотное распределение акустических импульсов в одном эксперименте: a — все зарегистрированные импульсы, включая динамические срывы; b — импульсы различных классов, зарегистрированные на стадии подготовки динамических срывов. Содержания кварцевого песка в материале-заполнителе межблокового контакта 50 %.

Состояние межблокового контакта непрерывно изменяется. Проследим закономерности изменения доли акустических импульсов определенного класса в зависимости от стадии подготовки динамического срыва (рис. 5). Сразу после динамического срыва наблюдается резкое увеличение доли акустических импульсов с низким значением WI (“трещины отрыва”). На этой постдинамической стадии происходит снижение скорости скольжения блока. Длительность данного интервала составляет $\sim 10\%$ от рекуррентного времени событий T . Далее наступает стадия скольжения блока с примерно постоянной скоростью. На этой стадии квазиупругого деформирования межблокового контакта отмечается постоянство структуры ансамбля излучаемых импульсов по параметру WI . Доля акустических импульсов с резким вступлением ($WI < 0.1$) составляет ~ 0.5 . На заключительной стадии подготовки динамических срывов (30 % времени T) структура излучаемых импульсов претерпевает существенное изменение. Можно видеть монотонный рост доли “трещин сдвига” по мере приближения момента динамического срыва — доля событий с $WI \in (0.2 : 1]$ увеличивается с 25 % на стадии упругого деформирования до 45 % перед динамическим срывом. Значимое снижение доли акустических импульсов, отнесенных к классу “трещин отрыва” (событий с $WI \in (0 : 0.1]$), наблюдается только перед самим срывом за $0.1T$, относительное снижение составляет 10 %.

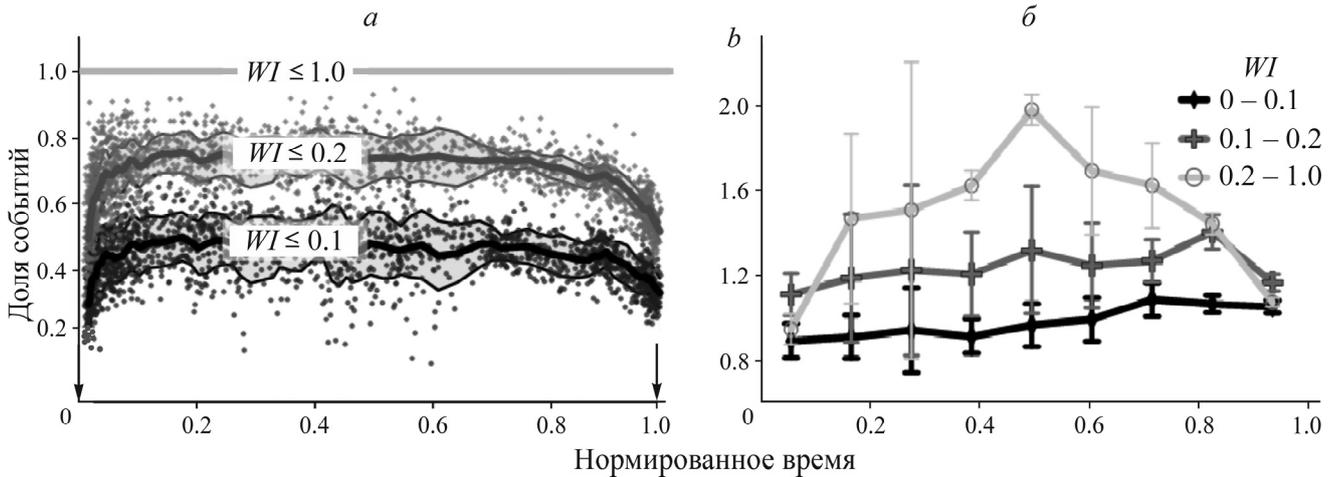


Рис. 5. Эволюция параметров акустических импульсов между двумя последовательными динамическими срывами: *a* — доля импульсов с определенным WI ; *б* — изменение коэффициента b амплитудно-частотного распределения для разных классов импульсов на примере эксперимента с содержанием кварцевого песка 80%. Время нормировано на рекуррентное время динамических срывов

В [19] отмечалось, что в зависимости от стадии эволюции межблокового контакта коэффициент b существенно изменяется, а его снижение на заключительной стадии рассматривается как предвестник динамического срыва. В проведенных экспериментах обнаружено, что коэффициенты b амплитудно-частотных распределений импульсов, отнесенных к различным классам, имеют разную динамику (рис. 5б). Для “трещин отрыва” скейлинговый параметр b остается примерно постоянным на всех стадиях цикла подготовки и варьирует от 0.8 до 1.0. Для класса “трещин сдвига” коэффициент b претерпевает существенное немонотонное изменение. На постдинамической стадии и стадии стабильного скольжения отмечается рост b до 1.8–2.0, что свидетельствует о преобладании в классе “трещин сдвига” слабых импульсов. На заключительной стадии цикла подготовки динамического срыва b снижается до 1.0–1.1, а значит, увеличивается доля высокоамплитудных импульсов. Исследуя статистику акустических импульсов, можно по параметрам распределения импульсов разного генезиса судить о стадии деформационного процесса.

ВЫВОДЫ

Предложен новый метод анализа данных акустоэмиссионных наблюдений, направленный на выявление деформационных процессов, протекающих на микро- и мезоуровнях в зонах локализации деформаций. Экспериментально установлено наличие взаимосвязи между стадиями эволюции режима скольжения блока по тонкому слою геоматериала и параметрами излучаемых импульсов. Изменение параметров акустических импульсов обусловлено эволюцией состояния тонкого слоя геоматериала и не зависит от состава материала-заполнителя, слагающего его. На заключительной стадии подготовки динамических срывов наблюдается увеличение относительного количества акустических импульсов, отнесенных к классу “трещин сдвига”, и снижение коэффициента b амплитудно-частотного распределения. Для класса “трещин отрыва” скейлинговый параметр не изменяется в процессе подготовки динамического срыва. Предложенный подход после апробации в натуральных условиях может служить основой для создания методик обработки результатов геоакустических и сейсмологических наблюдений с целью контроля эволюции разрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Опарин В. Н., Усольцева О. М., Семенов В. Н., Цой П. А.** О некоторых особенностях эволюции напряженно-деформированного состояния образцов горных пород со структурой при их одноосном нагружении // ФТПРПИ. — 2013. — № 5. — С. 3–19.
2. **Лавров В. В., Шкуратник В. Л.** Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) // Акуст. журн. — 2005. — Т. 51. — № 7. — С. 6–18.
3. **Востриков В. И., Усольцева О. М., Цой П. А., Семенов В. Н.** Особенности развития процессов деформирования и микросейсмической эмиссии при нагружении образцов горных пород до разрушения // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2016. — Т. 2. — № 3. — С. 45–49.
4. **Гиляров В. Л., Дамаскинская Е. Е., Кадомцев А. Г., Рассказов И. Ю.** Анализ статистических параметров данных геоакустического мониторинга на месторождении “Антей” // ФТПРПИ. — 2014. — № 3. — С. 40–45.
5. **Захаров В. Н.** Сейсмоакустическое прогнозирование и контроль состояния и свойств горных пород при разработке угольных месторождений. — М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 2002. — 172 с.
6. **Кольцов В. Н., Лукишов Б. Г., Коновалов Б. Д., Тер-Семенов А. А.** Сейсмический метод контроля устойчивости бортов карьера Мурунтау // Горн. вестн. Узбекистана. — 2002. — № 2. — С. 27–28.
7. **Адушкин В. В., Спивак А. А., Башилов И. П., Спунгин В. Г., Дубиня В. А., Ферапонтова Е. Н.** Релаксационный контроль района Южных Альп, характеризующегося низкой устойчивостью горных склонов // Физика Земли. — 1993. — № 10. — С. 103–107.
8. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И.** О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении горных пород // ДАН. — 1993. — Вып. 333. — № 4. — С. 515–521.
9. **Назаров Л. А.** Определение свойств структурированного породного массива акустическим методом // ФТПРПИ. — 1999. — № 3. — С. 36–44.
10. **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.
11. **Шкуратник В. Л., Николенко П. В., Кошелев А. Е.** Спектральные характеристики акустической эмиссии при нагружении образцов каменного угля и их использование для прогноза разрушения // ФТПРПИ. — 2017. — № 5. — С. 23–28.
12. **Лавриков С. В., Микенина О. А., Ревуженко А. Ф.** Численное моделирование динамической разгрузки самонапряженных образцов геоматериалов // Триггерные эффекты в геосистемах: материалы IV Всерос. конф. с междунар. участием. — 2017. — С. 182–191.
13. **Ревуженко А. Ф., Микенина О. А.** Упруго-пластическая модель горной породы с внутренними самоуравновешенными напряжениями // ФТПРПИ. — 2018. — № 3. — С. 11–22.
14. **Соболев Г. А., Пономарев А. В.** Физика землетрясений и предвестники. — М.: Наука, 2003. — 270 с.
15. **Shiotani T., Ohtsu M., and Ikeda K.** Detection and evaluation of AE waves due to rock deformation, Construction and Building Materials, 2001, Vol. 15, No. 5–6. — P. 235–246.
16. **Лавров А. В.** Пространственная локализация разрушения как причина вариаций амплитудного распределения сигналов акустической эмиссии // Акуст. журн. — 2005. — Т. 51. — № 3. — С. 383–390.
17. **Gutenberg B. and Richter C. F.** Seismicity of the Earth and its associated phenomena, NJ, Princeton, Princeton University Press, 1949. — 273 p.
18. **Касахара К.** Механика землетрясений. — М.: Мир, 1985. — 264 с.
19. **Zavyalov A. D. and Sobolev G. A.** Analogy in precursors of dynamic events at different scales, Tectonophysics, 1988, Vol. 152, No. 3–4. — P. 277–282.

Поступила в редакцию 08/IV 2019

После доработки 17/V 2019

Принята к публикации 28/V 2019