

07

## Методические аспекты изучения параметров упругих волн и контроль эталонной формы акустической эмиссии в полевых условиях

© Х.Ф. Махмудов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: h.machmoudov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 9 июля 2022 г.

В окончательной редакции 23 августа 2022 г.

Принято к публикации 24 августа 2022 г.

Для измерения энергии источника акустических импульсов в абсолютной шкале единиц ( $J$ ) по регистрируемым импульсам был проведен анализ энергетического баланса „источник импульсов“–„передающая среда“–„приемник импульсов“ с применением аппарата спектрального анализа. Сопоставление двух независимых методов определения энергии упругого взаимодействия (емкостной метод и метод фотоупругости) дало расхождение результатов менее чем на 12%. Определен спектральный состав энергии взаимодействия. Результаты позволяют определить как параметры источника сигнала, так и структуру передающей с трансформацией сигнала среды. Для измерения напряжений в упругой волне был изготовлен и калиброван пьезоприемник, в котором чувствительным элементом служила пьезопленка. Этот приемник в отличие от приемников, выполненных на базе пьезокерамических элементов, обладает существенно меньшей нелинейностью амплитудно-частотной характеристики, поскольку имеет только две собственные частоты.

**Ключевые слова:** фотоупругость, скорость упругих волн, горный массив, бетон, акустическая эмиссия.

DOI: 10.21883/0000000000

### Введение

Реальная геофизическая среда имеет сложную структуру и состоит из блоков и слоев. Одинаково ориентированные разломы создают анизотропию среды, в то время как микротрещины формируют сеть малых неоднородностей, определяя поглощающие свойства среды. Оценка геомеханической устойчивости [1–3] и безопасности эксплуатации различных крупномасштабных подземных сооружений [4–6], например, тоннелей и резервуаров сжиженного газа, остается актуальной [7,8], поскольку выводы о текущих геомеханических и геодинамических проблемах горно-исследовательских институтов свидетельствуют [9–11] о том, что задачи обеспечения безопасности и своевременного обнаружения критических ситуаций, возникающих при разработке месторождений и подземных пространств, остаются не полностью решенными. Новые методы и компьютерные технологии позволяют оценивать напряженно-деформированное состояние в массивах горных пород [12–14], но при этом одним из широко применяемых для такой оценки методов является метод акустической эмиссии (АЭ) [15–17], которым проводится изучение процесса начальных этапов разрушения (зарождение и накопление микроскопических трещин) [18] в различных материалах, таких как горные породы [19,20], строительные материалы [21], композиты [22]. В отличие от однородных материалов — стекла, монокристаллов, которые разрушаются по квазикритическому сценарию за счет роста локализованного очага с выделением энергии из ограниченного числа одновременно растущих трещин, развитие повреждений

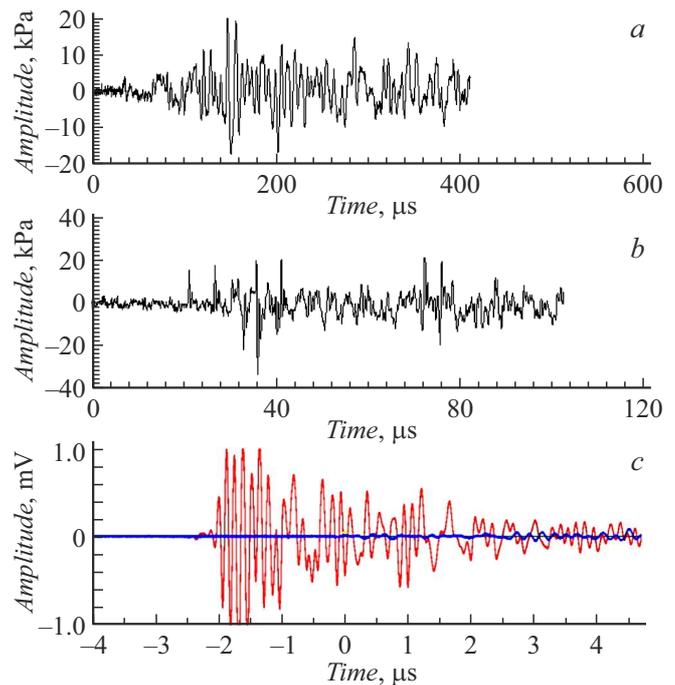
при механическом нагружении хрупких гетерогенных тел происходит через постепенное накопление микротрещин, поскольку в таких материалах имеется множество „слабых мест“, прежде всего в межзеренных прослойках [23–25]. В настоящей работе рассматриваются некоторые важные методические аспекты исследования распространения акустического импульса (АИ) в горных породах и бетоне в полевых условиях [26–28] и предлагаются решения, которые снижают погрешность в расчетах и измерениях параметров упругих волн. Также разработана методика и оптимизирован расчет определения координат источника АС для сред с переменным полем скоростей и начата [27] ее адаптация (внедрение [26]) для условий горного массива и бетонной обделки в некоторых подземных сооружениях Госкорпорации „Росатом“. Создана инструкция для строящихся крупных подземных объектов и предложены новые методы исследования процессов разрушения и оптимизации расчетов для фильтрации техногенных АЭ шумов, как надежный метод диагностики при АЭ мониторинге устойчивости работы подземных сооружений [16]. Усовершенствована методика определения амплитудно-частотных характеристик датчиков АЭ, методика калибровки пьезопленочного датчика и низкочастотных „шахтных“ датчиков (для установки и калибровки в шпурах) без предусилителя [27]. Разработана методика проверки работоспособности акустических датчиков в натуральных условиях горного массива с бетонной обделкой в подземных сооружениях Госкорпорации „Росатом“.

## 1. Основной метод и контроль эталонной формы акустической волны

Для проверки корректности работы системы АЭ мониторинга был изготовлен и калиброван для измерения напряжений в упругой волне датчик на основе пьезопленки (ДПП). Этот датчик в отличие от пьезокерамических имеет линейную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) в диапазоне до 20 кГц. ДПП тарировался на специальном стенде для определения чувствительности в единицах  $\mu\text{V}/\text{Pa}$ . В проведенных предварительных исследованиях форма акустической волны с ДПП контролировалась эталонным методом фотоупругости, который является безынерционным и позволяет измерять величину напряжений в упругой волне и соответственно вычислять ее энергию. Этот способ защищен патентом [29].

Изучение спектров АИ от ударного воздействия в лабораторных и в натуральных условиях показало, что сигнал может характеризоваться суперпозицией нормальных мод распространяющихся объемных волн в твердом теле. Интерпретация спектров АИ и способ оценки акустической энергии основаны на том, что любой объект имеет определенные геометрические размеры и его можно представить как полуволновую колебательную систему. При возбуждении импульсным источником с широким спектром такой объект будет генерировать процесс с узкополосным спектром. Частота этого колебательного процесса зависит от следующих параметров: 1 — геометрических размеров объекта; 2 — скорости распространения того или иного типа волн. Добротность колебательного процесса (величина, обратная коэффициенту затухания волн в среде) определяется: 1 — степенью нарушения объекта; 2 — граничными условиями на контактах объекта с окружающей средой; 3 — длительностью воздействия импульсного источника. Поэтому для правильной оценки энергии источника упругих колебаний необходимо знание не только амплитудно-временных параметров АИ, но и амплитудно-частотных. В эксперименте измерялась доля механической энергии, затраченной источником на возбуждение упругой волны при упругом соударении стального шара (источник) со стеклянной призмой (передающая среда), и независимо измерялось напряжение в упругой волне методом фотоупругости (приемник), которая возбуждена источником, по которому рассчитывалась энергия волны (рис. 1).

Для модельного случая фактически вся энергия упругого соударения перешла в энергию упругих колебаний призмы, которая, в свою очередь, обладает практически идеальной передаточной функцией по причине однородности образца, отсутствия каких-либо механизмов поглощения и соблюдения идеальных граничных условий (три компоненты напряжения на гранях равны нулю, т. е. отсутствует переизлучение во внешнюю среду).



**Рис. 1.** Волновая картина АЭ: *a* — в стеклянной призме от удара шариком; *b* — в стеклянной пластине при возникновении трещины; *c* — в гранитном образце при образовании трещины.

Была проведена оценка энергетического баланса между источником и колебательным процессом в образце. Оценка проводилась на основании того, что в твердом теле конечных размеров импульсный источник однократного механического воздействия порождает акустический процесс, представляющий процесс распространения объемных продольной  $P$ - и сдвиговой  $S$ -волн, которые, в свою очередь, на границах порождают вторичный процесс собственных колебаний образца [28].

Энергия бегущих объемных волн рассчитывалась как поток энергии через контактную поверхность датчика с призмой:

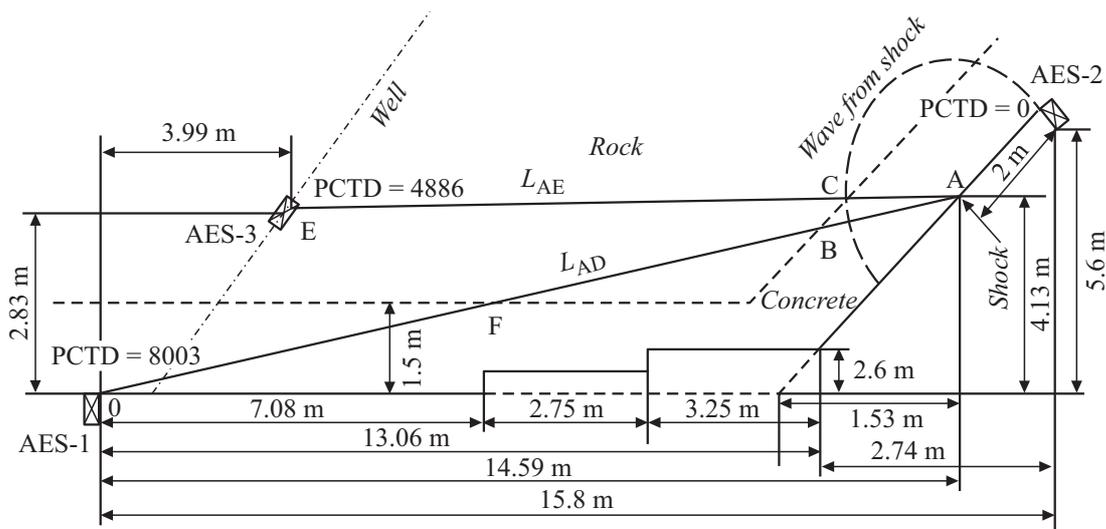
$$E_b = S_t \cdot 1/\rho c \cdot \int_{t_1}^{t_2} \sigma^2(t) dt, \quad (1)$$

где временной интервал  $t_1 - t_2$  — есть длительность процесса многократного переотражения объемных волн,  $\sigma$  — напряжение в волне, измеренное методом фотоупругости в каждый момент времени,  $S_t$  — площадь контактной поверхности датчик-образец,  $\rho c$  — волновое сопротивление материала.

Энергию собственных колебаний образца рассчитывали, как сумму энергий нормальных мод образца:

$$E_{nm} = \sum_{i,n} (nS\sigma_0^2/8\rho c f_n), \quad (2)$$

где  $n = 1, 2, \dots$  — номер моды, индекс  $i$  обозначает тип моды,  $S$  — площадь поверхностей образца, которым соответствуют узлы напряжения в стоячей волне,  $\sigma_0$  —



**Рис. 2.** Схема расположения датчиков АЭ и распространения волны от удара шаром.  $L_{AD} = 15.16\text{ м}$  — расстояние от точки А до точки D,  $L_{AB} \approx 2.0\text{ м}$  — расстояние от точки А до точки В),  $L_{BD} = 13.16\text{ м}$  — расстояние от точки В до точки D; PCTD (pulse coming time difference) — разница времен (в  $\mu\text{s}$ ) прихода АИ на датчики ДАЭ1 (AES-1) и ДАЭ3 (AES-3) по отношению к ДАЭ2 (AES-2).

максимальная амплитуда напряжения в стоячей волне,  $f_n$  — частота  $n$ -й моды  $i$ -го типа. Значения энергии, полученной по формулам (1) и (2), сопоставлялись с измерениями потерь механической энергии шара в результате соударения со стеклом. Для точного измерения потерь энергии эксперименты проводились в вакууме  $10^{-3}\text{ мм Hg}$ . Механическая энергия рассчитывалась из потенциальной энергии:

$$\Delta E = mg(h_1 - h_2), \tag{3}$$

где  $m$  — масса шара,  $h_1$  — высота падения шара,  $h_2$  — высота отскока шара.

При упругом соударении механическая энергия шара составляет примерно 5% от значения потенциальной энергии шара [30].

Измерения скоростей упругих волн в бетонном слое производились на базе 988 мм. Регистрация моментов времени прихода волны осуществлялась по первому вступлению сигналов. Согласно данным измерениям, скорость в слое бетона равна  $V_{concrete} = 3920\text{ м/с}$  [20].

Оценка скорости волн в бетоне расчетным путем производится с помощью модуля упругости  $E_{\text{eff}}$  для плоской волны:

$$E_{\text{eff}} = \frac{E(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \tag{4}$$

где  $E$  — модуль Юнга (для бетона он равен 36.1 ГПа),  $\nu$  — коэффициент Пуассона (0.22). Получаем

$$E_{\text{eff}} = \frac{28.2 \cdot 10^9}{0.68} = 41.5 \cdot 10^9\text{ Па}.$$

Скорость плоской продольной волны  $C_L$  равна

$$C_L = \sqrt{E_{\text{eff}}/\rho}, \tag{5}$$

где  $\rho$  — плотность бетона ( $2200\text{ кг/м}^3$ ).

Тогда получаем скорость плоской продольной волны в бетоне  $C_L = 4343\text{ м/с}$ .

Измеренная скорость вдоль слоя оказывается меньше расчетной скорости плоских волн  $C_L$ .

На рис. 2 показана схема проведения измерений по определению скорости распространения упругой волны в породе от источника возбуждения сигнала АЭ путем удара шаром массой 4.68 кг по бетонной крепи на расстоянии 2 м от ДАЭ2 (ДАЭ — датчик акустической эмиссии).

Разработан и используется алгоритм расчета координат на основе метода Нелдера–Мида (симплекс-метода) нахождения локального минимума функции от нескольких переменных. Для двух переменных симплексом является треугольник, и метод — это схема поиска, который сравнивает значения функции в трех вершинах треугольника. Наихудшая вершина (с наибольшими значениями функции) отбрасывается и заменяется новой вершиной, и поиск продолжается. После определения наилучшего приближения  $(X, Y, Z)$  для данного набора разностей времен прихода (РВП) (рис. 2), исходя из полученных  $(X, Y, Z)$  вычисляется соответствующий набор РВП и определяется невязка определения координат. Данный метод позволяет также считать скорость звука как неизвестную (подгоночную) величину. Координаты источника АЭ определяются, исходя из системы нелинейных уравнений

$$\sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z - Z_i)^2} - R_0 - V \cdot t_i = 0, \tag{6}$$

где  $R_0 = \sqrt{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 + (Z - Z_0)^2}$  — расстояние от источника до ближайшего к нему датчика,  $t_i$  — времена задержек для  $i$ -го датчика, измеренные в эксперименте,  $X, Y, Z$  — координаты источника,  $X_i, Y_i, Z_i$  —

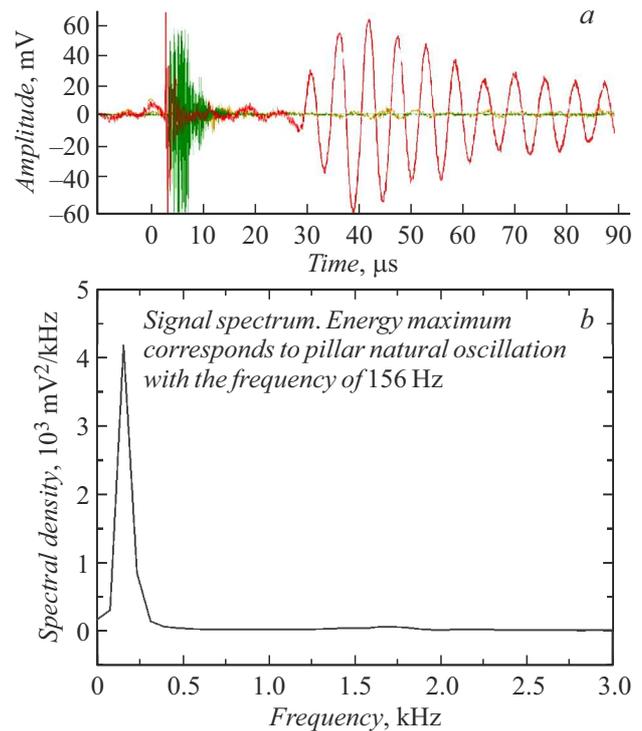
координаты датчиков,  $V$  — скорость звука в среде. Для решения системы (6) требуется три датчика (ДАЭ), причем остаются зоны, для которых имеются два решения. Однако наибольшую сложность представляет тот факт, что времена задержек в реальности измеряются с некой погрешностью, часто значительной. Поэтому следует стремиться использовать большее число датчиков (ДАЭ)  $N > 3$ , особенно при значительной зоне контроля. На бетонном образце затухание звука выше, поэтому погрешность локации больше, но алгоритм вполне работоспособен и в этом случае.

Измеренное значение скорости распространения продольной упругой волны в горной породе составило величину  $V_{rock} = 5320$  м/с.

Проведенный расчет скорости распространения продольной упругой волны в горной породе по приведенным выше формулам теории упругости дал величину 5250 м/с, которая близка к измеренному значению.

Измерение напряжений в упругой волне проводилось пьезопленочным датчиком. Им исследовался спектральный состав отклика массива горных пород (МГП) на возбуждение его ударом стального шара массой  $m = 4.684$  кг, а также проведена оценка энергии упругой волны, формируемой от удара шаром. Результаты исследований показали, что в месте установки датчика регистрировались колебания сжатия-растяжения по толщине структурного элемента МГП в форме плиты [20]. Сигнал и спектр сигнала колебаний приведены на рис. 3.

По данному сигналу была произведена оценка энергии в упругой волне по формулам (1), (2), составившая примерно 0.12 Дж. А измеренная величина потери механической энергии при соударении шара с породой составила около 6 Дж. Это различие связано, во-первых, с тем, что при возбуждении упругой волны путем удара шаром по породе соударение не чисто упругое, так как порода у поверхности выработки сильно разрушена и поглощает в месте контакта значительную долю механической энергии шара. С другой стороны, можно оценить долю энергии, затраченной на формирование поля упругих колебаний в массиве при чисто упругом соударении, используя лабораторные данные, полученные для значения потери потенциальной энергии стального шара в результате чисто упругого соударения со стеклом, которое составило примерно 5% от потенциальной энергии шара. Считалось, как уже было сказано выше, что вся потерянная энергия тратилась на формирование поля упругих колебаний, а упругие характеристики породы, слагающей МГП, и стекла можно считать близкими, поскольку плотности и скорости распространения объемных волн примерно одинаковы. Это значение составило примерно 0.58 Дж, что сравнимо с ранее указанными значениями энергии упругих колебаний 0.12 Дж. Зарождению начальных трещин отвечает выделение энергии (отражающее уровень напряжений, размер трещин и упругость материала). На первой стадии эта величина для всех трещин примерно одинакова. На второй стадии в очаге разрушения действуют повышенные



**Рис. 3.** Сигнал от ДАЭ1 и ДАЭ3 по отношению к ДАЭ2 (а) и спектр сигнала (b) от структурного элемента массива горной породы при возбуждении его ударом стального шара массой  $m = 4.684$  кг.

напряжения, что при генерации новых трещин приводит к энерговыделению, величина которого непрерывно растет. Таким образом, регистрация энерговыделения (его изменения) позволяет фиксировать смену стадий и обнаружить переход к предразрывному состоянию, а линейная экстраполяция измеренной зависимости на нуль времени дает нижнюю оценку остаточного ресурса долговечности.

## 2. Обсуждение

Для адаптации описанной методики к работе на подземных сооружениях был разработан, изготовлен и калиброван для измерения напряжений упругой волны пьезоприемник [26,27] с линейной АЧХ в диапазоне до 20 kHz. Им было проведено измерение спектрального состава отклика массива горных пород на возбуждение ее ударом шара массой  $m = 4.684$  кг, а также проведена оценка энергии упругой волны, формируемой от удара шаром. Сопоставление оценки величины упругой энергии (около 0.3 Дж) с потерей механической энергии при ударе шаром (около 6 Дж) носит весьма приближенный характер [31]. Это связано в основном с тем, что при возбуждении упругой волны путем удара шаром по поверхности выработки соударение не чисто упругое, а сопровождается разрушением породы в месте контакта, на что и идет значительная доля потерянной при

соударении механической энергии шара. Ориентировочная оценка этого явления позволяет скорректировать величину упругой энергии примерно до 0.58 J, с которым значение энергии упругих колебаний, рассчитанное значение 0.12 J, находится в приемлемом согласии. Поэтому для корректной оценки энергии необходимо устранить разрушение массива при его возбуждении ударом шара, например, путем установки закладных деталей [20].

## Выводы

Для контроля эталонной формы акустической волны и для калибровки полевых ДАЭ разработаны и внедрены методические рекомендации. О важности калибровки свидетельствует сравнение зарегистрированных сигналов пьезоэлектрического датчика с эталонными сигналами, полученными методом фотоупругости для тех же условий возбуждения поля упругих колебаний в эталонном образце. Это позволило обосновать выбор частотного диапазона и изготовления специальных ДАЭ для использования в выбранных скважинах, а также провести их калибровку в натуральных полевых условиях. Данные о механизмах упругих волн и их анализ при рассеянии энергии в напряженных неоднородных материалах могут быть использованы в практических целях при разработке методов определения параметров источника АИ, в частности, его энергии и местоположения, а также структуры передающей среды, что повысит достоверность и информативность методов контроля латентных процессов, представляющих опасность для различных подземных сооружений.

## Благодарности

Автор выражает благодарность В.Н. Савельеву за помощь в проведении полевых исследований и подготовке первичных данных для анализа.

## Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Ю.О. Кузьмин, В.С. Жуков. *Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород* (Горная кн., М., 2012), изд. 2-е, 264 стр.
- [2] И.Ю. Рассказов, С.В. Цирель, А.О. Розанов, А.А. Терешкин, А.В. Гладырь. *J. Min. Sci.*, **53**, 224 (2017). DOI: 10.1134/S1062739117022055
- [3] В.И. Иванов, В.А. Барат. *Акустико-эмиссионная диагностика* (Спектр, М., 2017), 368 с.
- [4] А.А. Козырев, О.Г. Журавлева, Ю.В. Федотова. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*, **2**, 108 (2015).
- [5] В.С. Куксенко, Х.Ф. Махмудов. *Геология и геофизика*, **58** (6), 915 (2017).
- [6] А.Н. Шабаров, С.В. Цирель, К.В. Морозов, И.Ю. Рассказов. *Горный журнал*, **9**, 59 (2017). DOI: 10.17580/gzh.2017.09.11
- [7] K. Makhmudov, V. Saveliev. *J. Phys.: Conf. Series*, **1697** (1), 012066 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012066
- [8] Х.Ф. Махмудов, М.Г. Менжулин, М.В. Захарян, У. Султонов, З.М. Абдурахманов. *ЖТФ*, **85** (11), 79 (2015).
- [9] В.Л. Трушко, А.Г. Протосеня. *Biosci. Biotechnol. Res. Asia*, **12** (3), 2879 (2015). DOI: <http://dx.doi.org/10.13005/bbra/1973>
- [10] Г.Г. Кочарян. *Геомеханика разломов* (Геос, М., 2016), 424 с.
- [11] K.V. Gogolinskiy, V.A. Syasko. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2019. Т. 61. № 8. С. 434–439, 447. DOI: 10.1784/insi.2019.61.8.434
- [12] С.В. Лукичев, О.В. Наговицын, И.Э. Семенова, О.В. Белгородцев. *Горный журнал*, **8**, 53 (2015).
- [13] К.В. Гоголинский, В.А. Сясько. *В мире неразрушающего контроля*, № 1, т. 23, 2021, с. 4–8. DOI: 10.12737/1609-3178-2020-4-8
- [14] В.А. Зейгарник, Л.М. Богомолов, В.А. Новиков. *Физика Земли*, **1**, 35 (2022). DOI: 10.31857/S0002333722010100
- [15] *Актуальные проблемы метода акустической эмиссии (АПМАЭ2018): Всероссийская конференция с международным участием*. Тольятти, 28 мая–1 июня 2018 года: сб. матер. отв. ред. Д.Л. Мерсон, А.Ю. Виноградов. (Изд-во ТГУ, Тольятти, 2018), 181 с.
- [16] В.В. Носов. *Записки Горного института*, **226**, 469 (2017). DOI: 10.25515/PM1.2016.4.469
- [17] V. Syas'ko, A. Shikhov. *Appl. Sci.*, **12**, 2364 (2022). <https://doi.org/10.3390/app12052364>
- [18] X.-C. Xiao, X. Ding, X. Zhao, Y.-S. Pan, A.W. Wang, L. Wang. *Yantu Lixue / Rock and Soil Mechanics*, **38**, 3419 (2017). DOI: 10.16285/j.rsm.2017.12.004
- [19] В.Л. Гиляров, Е.Е. Дамаскинская, А.Г. Кадомцев, И.Ю. Рассказов. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, **3**, 40–45 (2014).
- [20] В.Н. Савельев, Х.Ф. Махмудов. *ЖТФ*, **90** (1), 143 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.01.48676.74-19 [V.N. Savel'ev, Kh.F. Makhmudov. *Tech. Phys.*, **65** (1), 133 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220010235]
- [21] Т.В. Фурса, Д.Д. Данн, М.В. Петров, А.Н. Соколовский. *ЖТФ*, **89** (1), 99 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.01.46969.91-18 [T.V. Fursa, D.D. Dann, M.V. Petrov, A.N. Sokolovskii. *Tech. Phys.*, **64** (1), 78 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219010110]
- [22] И.А. Кобыхно, Ф.А. Юнусов, А.Д. Бреки, О.В. Толочко, А.Г. Кадомцев. *Письма в ЖТФ*, **47** (5), 7 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.05.50668.18540
- [23] S. Ji, L. Li, H.B. Motra, F. Wuttke, S. Sun, K. Michibayashi, M.H. Salisbury. *J. Geophys. Research: Solid Earth*, **123** (2), 1161 (2018). DOI: 10.1002/2017JB014606
- [24] E. Wang, Z. Li, Y. Niu, R. Shen, D. Li, X. Zhang, S. Liu. *Meitiandizhi Yu Kantan*, **49** (1), 241 (2021).
- [25] И.В. Таловина, Т.Н. Александрова, О. Попов, Х. Либервирт. *Обогащение руд*, **3**(369), 56–62 (2017). DOI 10.17580/or.2017.03.09
- [26] Х.Ф. Махмудов. *Успехи современного естествознания*, **10**, 73 (2019).

- [27] В.Н. Савельев, Х.Ф. Махмудов. Евразийское научное объединение, **12–1** (46), 22 (2018).
- [28] P.I. Afanasev, K.F. Makhmudov. Appl. Sci., **11** (9), 3976 (2021). DOI: 10.3390/app11093976
- [29] В.А. Петров, В.А. Пикулин, А.О. Розанов, В.Н. Савельев, С.А. Станчиц. Способ определения энергии сигнала акустической эмиссии в твердом теле. Патент РФ № 2037821, 1995.
- [30] А.О. Розанов, В.С. Куксенко, В.Н. Савельев, С.А. Станчиц, В.А. Пикулин. Письма в ЖТФ, **19** (4), 28 (1993).
- [31] В.Н. Савельев, Х.Ф. Махмудов. *Перспективные материалы и технологии: Сборник материалов международного симпозиума*, Брест, 27–31 мая 2019 г., под общ. ред. В.В. Рубаника (Витебский гос. тех. ун-т, Брест, 2019), с. 189–192.