

Прогнозирование всплесков горных пород в блоках горного массива с помощью акустической эмиссии

В.В. НОСОВ^{1,2} ✉, А.И. БОРОВКОВ² и А.П. АРТЮЩЕНКО^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

✉ nosovvv@list.ru

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Nosov, V.V.; Borovkov, A.I.; Artyushchenko, A.P. Predicting Rock Bursts in Rock Mass Blocks Using Acoustic Emission. *Resources* 2022, 11, 87. <https://doi.org/10.3390/resources11100087>

Аннотация: Геофизические методы прогноза локальных горных разрывов в настоящее время развиваются по двум направлениям: совершенствование регистрирующей аппаратуры и совершенствование методов обработки данных. Прогресс в разработке методов обработки сдерживается отсутствием информативных прогностических моделей, описывающих состояние массива горных пород, процесс разрушения массива и явления, которые могут обосновать выбор как критериев, так и параметров испытаний состояния массива горных пород и дать оценку времени, оставшегося до проявления горного давления. В частности, несмотря на достижения в аппаратном оформлении, исследователи, использующие сейсмоакустический метод прогноза горных взрывов, измеряют акустическую активность или энергоёмкость рассеяния упругих волн после техногенного взрыва и сталкиваются с зависимостью результатов прогноза от дестабилизирующих факторов. Для решения этой проблемы мы применили информационно-кинетический подход к прогнозированию. В статье рассматриваются принципы выбора параметров испытаний, устойчивых к дестабилизирующим факторам. Предложена микромеханическая модель накопления трещин в блоке горного массива, отражающая зависимость параметров акустической эмиссии (АЭ) от времени, что позволяет выявлять влияние различных факторов на прогнозные данные и фильтровать сигналы. Также предложены критерии и методика оценки риска разрыва горных пород. Результаты апробированы при анализе сейсмоакустических явлений, вызванных техногенными взрывами на рудниках «Таймырский» и «Октябрьский» в Норильске. В статье приведены примеры использования предложенных критериев. Проведено сравнение эффективности их применения с традиционными методами оценки рисков разрыва горных пород и оценки напряженно-деформированных параметров массива горных пород с точки зрения их информативности, устойчивости и репрезентативности путем статистической обработки экспериментальных данных.

Ключевые слова: акустическая эмиссия; плотность микротрещин; горный массив; прогнозирование; риск разрыва горной породы; локальный прогноз; дискование керна.

Predicting Rock Bursts in Rock Mass Blocks Using Acoustic Emission

Viktor V. NOSOV^{1,2} ✉, Alexey I. BOROVKOV² and Artem P. ARTYUSHCHENKO^{1,2}

¹ Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

✉ nosovvv@list.ru

Abstract: Geophysical methods for local rock burst prediction are currently being developed along two lines: improving recording equipment and improving data processing methods. Progress in developing processing methods is constrained by the lack of informative prognostic models that describe the condition of rock mass, the process of rock mass fracturing, and the phenomena that can substantiate the choice of both criteria and test parameters of the condition of rock mass and give an estimate of the time remaining until rock pressure manifestation. In particular, despite achievements in hardware design, researchers using the seismo-acoustic method to predict rock bursts measure the acoustical activity or energy capacity of elastic wave scattering after a man-made explosion and are faced with the dependence of forecast results on destabilizing factors. To solve this problem, we applied an information and kinetic approach to forecasting. In this article, we discuss the principles of selecting test parameters that are resistant to destabilizing factors. We propose a micromechanical model of fracture accumulation in a rock mass block that reflects the dependence of acoustic emission (AE) parameters on time, which makes it possible to detect the influence of various factors on forecast data and filter the signals. We also propose criteria and a methodology for rock burst risk assessment. The results were tested in analyzing the seismo-acoustic phenomena caused by man-made explosions at the Taimyrsky and Oktyabrsky mines in Norilsk. The article gives examples of using the proposed criteria. The effectiveness of their application is compared with traditional methods for assessing rock burst risks and evaluating the stress-strain parameters of rock mass in terms of their being informative, stable, and representative by means of statistical processing of experimental data.

Keywords: rock burst risk; local forecast; acoustic emission; microfracture density; rock mass; forecasting; rock burst; core diskings.

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2025.

1. Введение

Резкая интенсификация добычи полезных ископаемых сопровождается ростом их потребления. Использование ресурсов сверх нормы замещения приводит к их истощению. Поскольку полезные ископаемые относятся к невозобновляемым ресурсам, одной из возможных форм их истощения является добыча. Для удовлетворения растущего спроса с целью обеспечения устойчивого развития ресурсов горнодобывающие предприятия переходят к освоению запасов, которые ранее считались непригодными для добычи, таких как забалансовые запасы, руды сложного вещественного состава, участки месторождения в сложных горно-геологических условиях и другие [1-4]. Одним из путей увеличения минерально-сырьевой базы и ресурсного обеспечения устойчивого развития горнодобывающего предприятия является переход к разработке запасов, залегающих на больших глубинах. Однако добыча полезных ископаемых на больших глубинах связана со сложностью мониторинга и управления напряженно-деформированным состоянием подработанного горного массива [5-7].

По мере углубления подземной добычи и роста техногенных нагрузок вокруг горных выработок проблема борьбы с проявлениями горного давления в рудных месторождениях приобретает все большее значение в теории и практике горного дела [8, 9]. Следствием изменения напряженно-деформированного состояния массива в результате ведения горных работ является развитие субвертикальных нарушений, приводящих к разрушению водоупорного слоя и провалам на поверхности [10]. Проблема прогнозирования интенсивности проявлений горного давления приобрела особую значимость в связи с необходимостью учета выполнения профилактических мероприятий при подготовке планов разработки глубоких уровней как на новых, так и на уже действующих шахтах [2, 11, 12]. Не менее важными являются разработка и выбор практических методов и технических средств для прогнозирования напряженно-деформированных параметров массива горных пород и оценки рисков разрыва горных пород [13-16].

Добыча руды с глубоких уровней, подверженных горным взрывам, требует повышения безопасности работников, что требует совершенствования методов и способов мониторинга параметров горного массива [17-19]. Среди них – метод акустической эмиссии (АЭ), который утвержден Ростехнадзором [20] в качестве одного из геофизических методов оценки риска горных взрывов. Метод АЭ совершенствуется как в аппаратном, так и в методическом плане [21-24], однако эти разработки недостаточно эффективны из-за отсутствия надежной методологической базы для поиска корреляций между измеряемыми параметрами АЭ и параметрами массива горных пород [25-27]. В частности, несмотря на прогресс в разработке аппаратуры, испытания по-прежнему основаны на измерении акустической активности, общего числа импульсов или энергетической мощности рассеяния упругих волн после техногенного взрыва, и исследователям приходится сталкиваться с зависимостью результатов испытаний от влияния дестабилизирующих факторов [28-30]. Решение проблемы представляется возможным путем использования информационно-кинетического подхода к прогнозированию трещиноватости горных пород и построения кинетических моделей процессов и явлений, предшествующих горному взрыву, которые могут служить ориентирами при поиске информативных критериев и параметров испытаний [31]. Цель исследования – обоснование эффективных критериев анализа АЭ и методов прогнозирования горных разрывов, обладающих низкой чувствительностью к шуму и наиболее тесно связанных со временем, оставшимся до проявления горного давления.

2. Материалы и методы

Предлагаемый подход оценивает риски разрыва горных пород путем моделирования процесса разрушения горных пород и мониторинга возникающего при этом явления рассеяния упругих волн, которое наиболее интенсивно проявляется в начальный период перераспределения напряжений, вызванного появлением новых пустот в блоке горного массива после техногенного взрыва. В основе моделирования лежит связь между первичными информативными параметрами АЭ (ξ) и параметром повреждения материала или породы, которым является плотность трещин $C(t)$, вызванная разрушением структурных элементов [31, 32], описываемая следующим уравнением:

$$\xi(t) = k_{AE}C(t), \quad (1)$$

где t – текущее время, а k_{AE} – коэффициент акустической эмиссии (КАЭ), который отражает сходство процессов рассеяния трещин и упругих волн или акустически активный объем материала и описывается следующим уравнением:

$$k_{AE} = V \iiint_{\Delta t, f, u} \Phi(\Delta t, f, u) du df d\Delta t \quad (2)$$

где V – объем испытуемого материала, а $\Phi(\Delta t, f, u)$ – функция плотности распределения сигнала АЭ по паузам Δt , частоте f и амплитуде u . Модель (1) является информативной, поскольку стабилизирует КАЭ и связывает скорость накопления плотности разрушения $C(t)$ с временем до разрушения.

Зависимость плотности разрушения от времени описывается следующим образом:

$$C(t) = C_0 \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega} \Psi(\omega) \left\{ 1 - \exp \left[- \int_0^t \frac{dt'}{\theta_{avg}(U_0, \omega(t'))} \right] \right\} d\omega \quad (3)$$

где C_0 – начальная плотность элементов конструкции, ω – параметр прочности элемента конструкции из материала объекта испытаний, зависящий от изменяющихся во времени растягивающих напряжений $\sigma(t)$ в элементе конструкции, а $\omega(t)$ – зависимость параметра прочности от времени:

$$\omega(t) = \gamma \sigma(t) / KT \quad (4)$$

где γ – структурно-чувствительный коэффициент; K – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; $\Psi(\omega)$ – функция плотности распределения значений ω по элементам конструкции; $\theta_{avg}(U_0, \omega(t)) = \tau_0 \exp[U_0/(KT) - \omega(t)]$ – среднее время до разрушения одного элемента конструкции, которое находится по формуле Журкова [33]; τ_0 – период колебаний атома; U_0 – энергия, активирующая процесс разрушения; ω_0 – нижняя граница диапазона ω ; $\Delta\omega$ – представительный диапазон разброса значений ω по элементам конструкции.

Уравнение (1), используемое для испытаний конструкционных материалов на микромасштабном уровне, распространяется и на масштаб упругой волны, рассеивающейся в пустоте, образованной взрывом. Таким образом, уравнение (1) является универсальной многоуровневой моделью временной зависимости параметров акустической эмиссии, регистрируемых на стадии рассеянного разрушения любого масштаба для материала, характеризующегося прочностной неоднородностью. При известной критической плотности разрушения $C^* \approx 0,01 C_0$ можно найти время до разрушения. В качестве аналогов $C(t)$ выступают различные первичные параметры АЭ (ζ), а именно: количество зарегистрированных дискретных импульсов АЭ (N_Σ), общее количество АЭ (N), относительная общая амплитуда или любая безразмерная комбинация этих параметров. Существенная зависимость активности и амплитуды сигналов АЭ от условий регистрации сигналов и распространения упругих волн снижает достоверность прогноза АЭ и эффективность основанных на нем мер безопасности. Условия регистрации сигналов зависят от индивидуальности каждого канала регистрации (рис. 1), что влияет на КАЭ (2), дестабилизируя связь между первичными параметрами или энергией АЭ и параметрами массива горных пород.

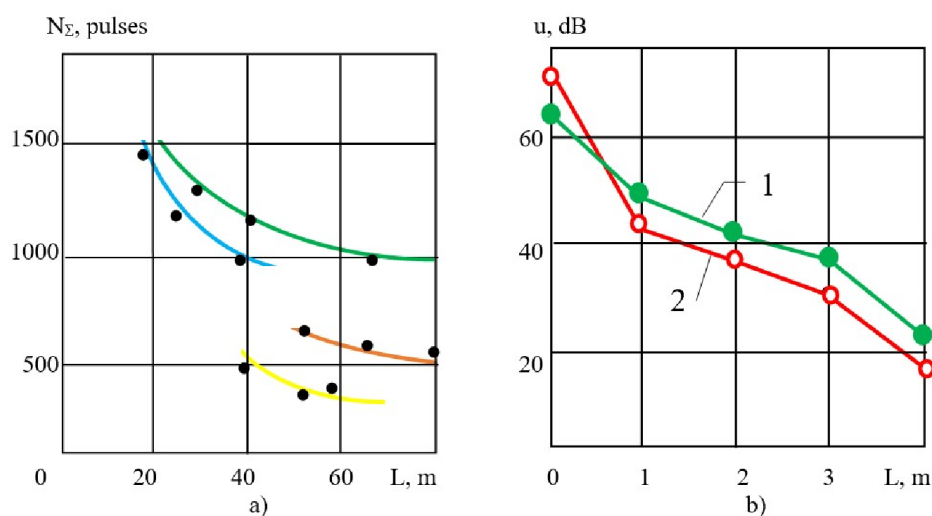


Рис. 1. Параметры АЭ в зависимости от расстояния L от преобразователя АЭ до его источника:

(а) общее количество импульсов АЭ (N_Σ), зарегистрированных различными регистраторами за период релаксации напряжения, в зависимости от расстояния L от преобразователя АЭ до его источника в зоне взрыва на руднике «Таймырский» компании «Норильский никель»; (б) амплитуда u сигналов АЭ в зависимости от расстояния L до преобразователей АЭ с резонансными частотами 320 кГц (1) и 180 кГц (2)

Такой подход к прогнозированию позволяет определить прогнозируемую стадию однородного разрушения, сформулировать условия корректности акустико-эмиссионных испытаний и предложить ряд информативных показателей для использования при акустико-эмиссионных испытаниях прочностных параметров конструкционных материалов. Они связаны со скоростью разрушения на стадии однородного разрушения, моментом критической плотности разрушения, степенью риска, а также устойчивы к воздействию дестабилизирующих факторов [34]. Поскольку принципы оптимизации испытаний, лежащие в основе процесса, универсальны, предложенные показатели могут быть экстраполированы и на горные породы. В качестве акустико-эмиссионных показателей напряженно-деформированных параметров блока горного массива мы используем относительное напряжение (F_{AE}), а также параметры структуры и снижение активности, или коэффициент структуры (X_{AE}). Коэффициент долговечности W_{AE} используется как показатель риска разрыва породы, отражающий время до разрушения в призабойной зоне (табл. 1).

Таблица 1

Многомодельные многоуровневые концентрационные и кинетические индикаторы силы АЭ, устойчивые к помехам и дестабилизирующим факторам при испытаниях на АЭ

Показатель АЭ	Микромодель	Нано-модель	Свойство
F_{AE}	$\ln \xi_1 / \ln \xi_2$	σ_1 / σ_2	Относительная нагруженность
$X_{AE}(s - 1)$	$d \ln \xi / dt$	$\alpha = \gamma \dot{\sigma} / (KT)$	Структура и спад активности
W_{AE}	$d \ln \xi / dK_s^*$	$\omega = \gamma \sigma / KT$	Долговечность

* K_s – коэффициент напряжения (отношение испытательного напряжения к рабочему напряжению).

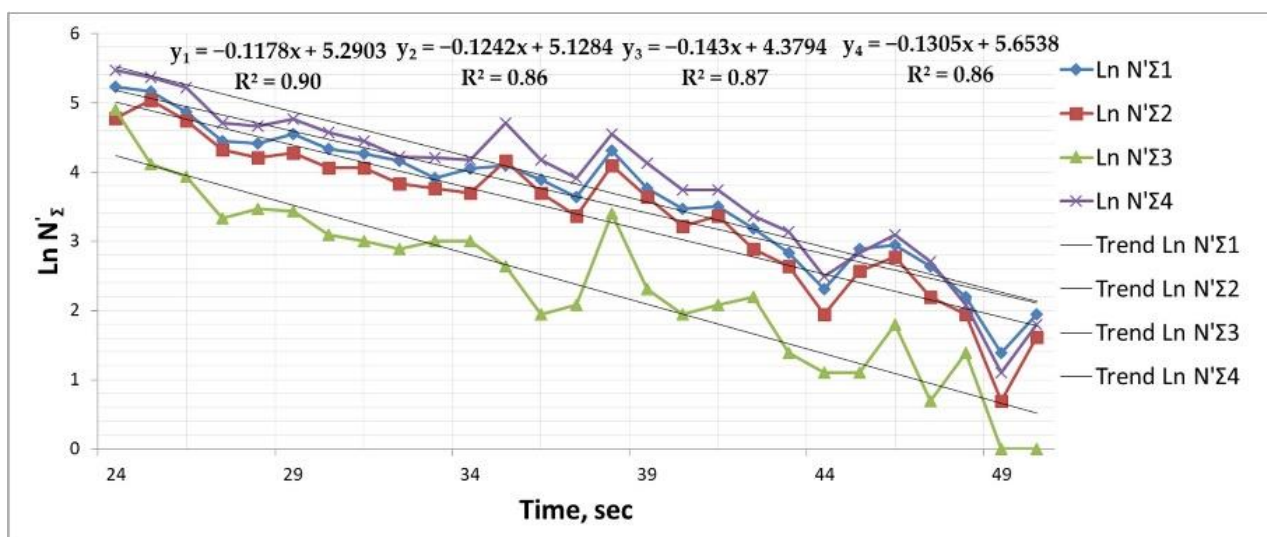
3. Результаты и обсуждение

Регистрация сигналов АЭ и измерение их параметров проводились после техногенных взрывов на рудниках «Таймырский» и «Октябрьский», расположенных в Норильске и эксплуатируемых компанией «Норильский никель». Целью взрывов было разрушение добываемой руды. Оборудование для регистрации сигналов АЭ описано в [31]. В большинстве случаев количество сигналов АЭ N'_Σ , регистрируемых в единицу времени снижения активности t , изменялось по экспоненциальному закону, описываемому микромеханической моделью (1) для случая однородного трещинообразования (Рис. 2):

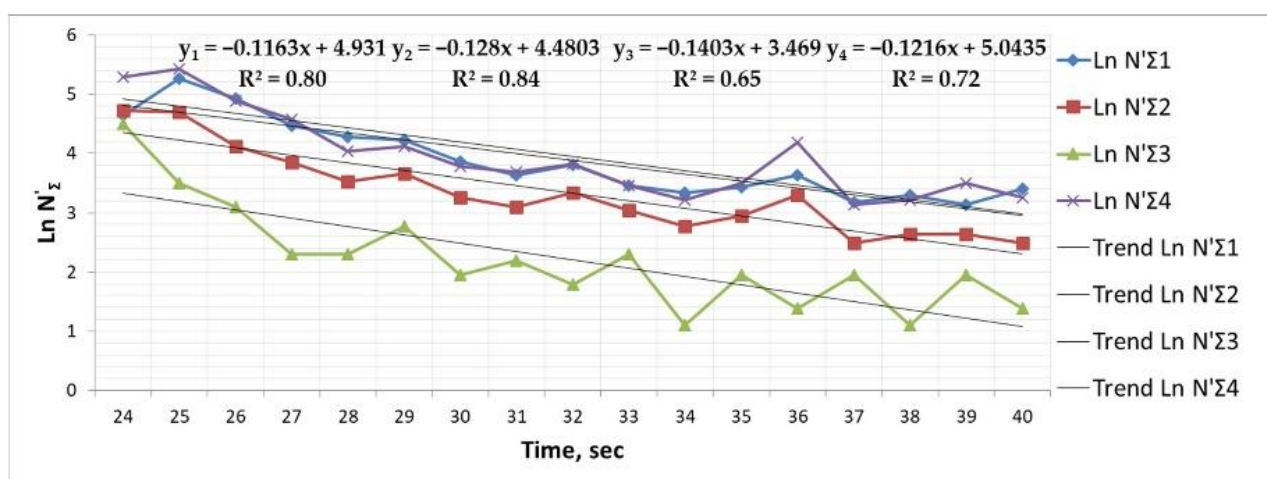
$$N'_\Sigma(t) = k_{AE} C_0 \exp \left[\frac{\gamma(\sigma_0 - \dot{\sigma}t) - U_0}{KT} \right] = N'_{0\Sigma} \exp(-\alpha t) \quad (5)$$

где σ_0 – напряжение после взрыва, $\dot{\sigma}$ – средняя скорость ее спада, $N'_{0\Sigma}$ – сейсмоакустическая активность в начальный момент спада, и $\alpha = \gamma \dot{\sigma} / KT = X_{AE} = d \ln N'_\Sigma(t) / dt$ показатель скорости снижения АЭ.

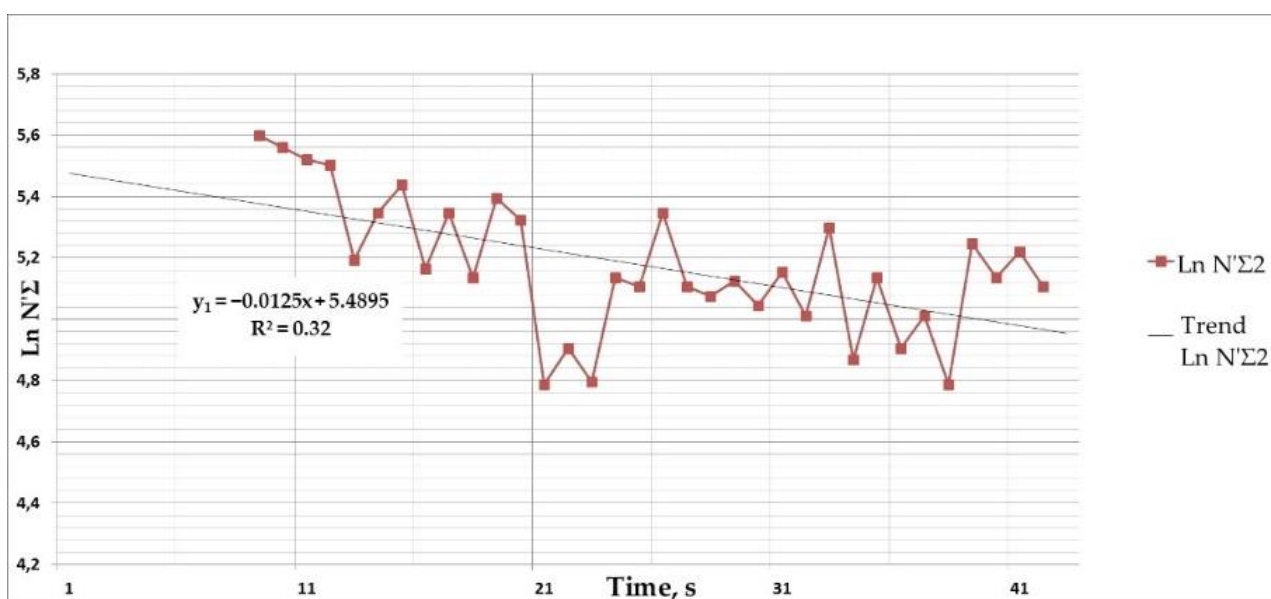
Коэффициент корреляции между реальным значением и рассчитанным по уравнению (5) для N'_Σ в различных случаях записи составил в среднем 0,9, что подтверждает адекватность модели (5). Это заметно по разнице в количестве импульсов, зарегистрированных разными датчиками на одном и том же расстоянии (рис. 1) или от одного источника сигнала (рис. 2), что свидетельствует о нестабильности этого параметра по отношению к состоянию массива.



(a)



(б)



(в)

Рис. 2. Результаты тестирования временной зависимости АЭ от техногенных взрывов на рудниках Норильска: (а) для различных каналов при прохождении через частично безопасную зону; (б) для различных каналов при прохождении через зону с высоким опорным давлением; (в) для зоны, связанной с риском разрыва породы

Было установлено, что АЭ, вызванная взрывом, в первый момент (1-2 мин) достигает максимального значения $N'_{0\Sigma}$, а затем снижается до $N'_{p\Sigma}$. Полученные результаты описывались уравнениями микромеханической модели:

$$N'_{0\Sigma} = \frac{k_{AE} C_0 \exp \frac{\sigma_0 \gamma}{KT}}{\tau_0 \exp \frac{U_0}{KT}} = A_D \exp \omega_0 \quad (6)$$

$$N'_{p\Sigma} = \frac{k_{AE} C_0 \exp \frac{\sigma_p \gamma}{KT}}{\tau_0 \exp \frac{U_0}{KT}} = A_D \exp \omega_p \quad (7)$$

Количество импульсов АЭ, накопленных за время по закону t , определяется следующим образом:

$$N_{\Sigma}(t) = \frac{A_D K T \exp \frac{\gamma \sigma_0}{KT} (1 - \exp \frac{-\gamma \sigma t}{KT})}{\gamma \dot{\sigma}} = A_D \exp \omega_0 [1 - \exp(-\alpha t)] / \alpha \quad (8)$$

где $A_D = k_{AE} C_0 / \{\tau_0 \exp[U_0 / (KT)]\}$ коэффициент активности акустической эмиссии.

Рис. 3 показывает экспериментально зарегистрированные данные, иллюстрирующие изменение параметров $N'_{0\Sigma}$, α , $N_{\Sigma}(\tau_p)$ в зависимости от уровня напряжений в разрабатываемой выработке, которые зависят от отношения напряжений $\sigma / [\sigma]_{\text{avg}}$ и анализировались методом дисконирования керна [20].

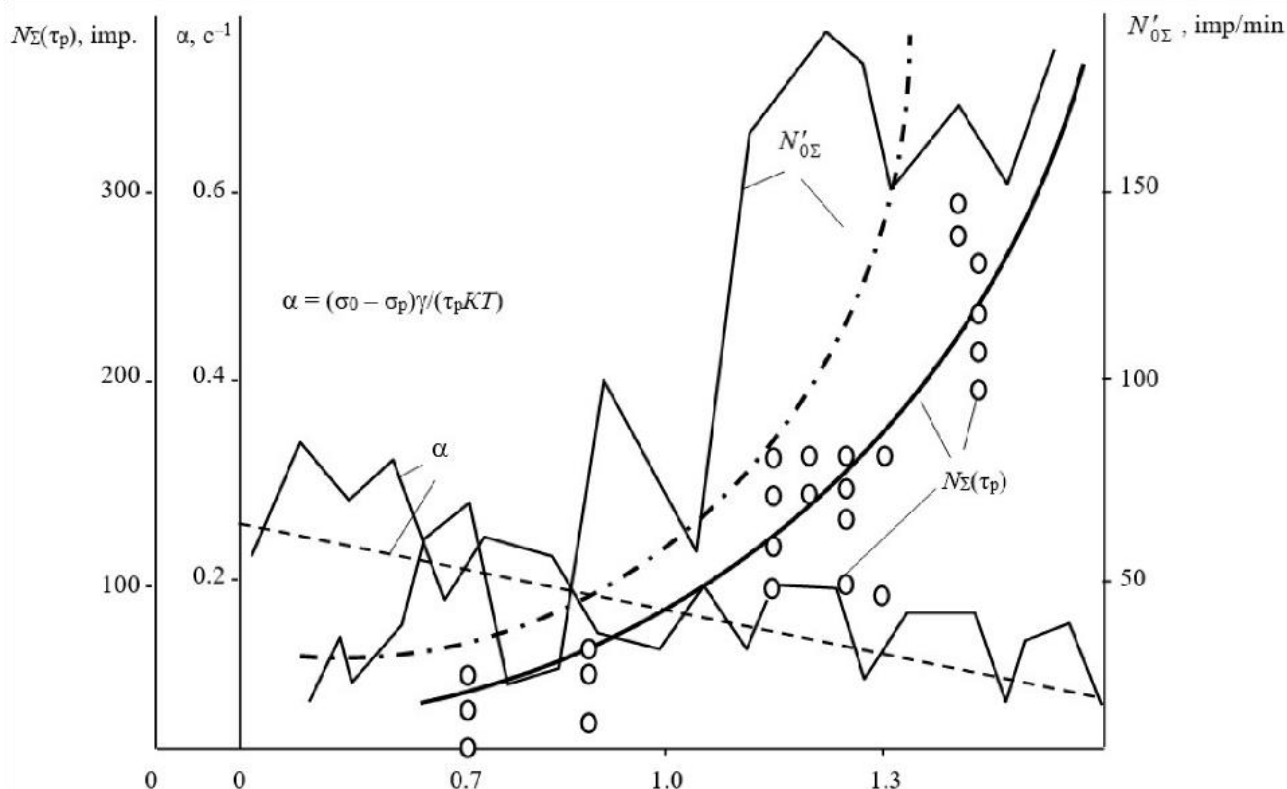


Рис. 3. Связь между параметрами напряженно-деформированного состояния массива горных пород, максимальной активностью $N'_{0\Sigma}$, скоростью спада α и суммарной эмиссией $N_{\Sigma}(\tau_p)$

Как показывает рисунок 3, связь между параметрами АЭ и напряжениями в массиве горных пород соответствует зависимости, описываемой уравнениями (5)-(8). Для массива горных пород в квазистатическом однородном напряженном состоянии, когда средние напряжения σ_p в нем

постоянны, время τ^* , отражающее опасность разрыва породы, находится исходя из условия, что плотность трещин $C(t)$ достигла критического значения C^* , по следующему уравнению [19, 31]:

$$\tau^* = 0.01\tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma\sigma_p}{KT} = \frac{A}{\exp \omega_p} \quad (9)$$

Значения τ_0 , U_0 , K , T , $A = 0,01\tau_0 \exp(U_0/KT)$ в правой части уравнения (9) относительно стабильны и, как правило, известны или могут быть найдены априори до начала испытаний. Поэтому оценка риска разрыва горной породы сводится к апостериорному определению только значения ω_p из уравнения (9), например, с использованием индекса $W_{AE} = \gamma\sigma/(KT)$ при АЭ (Таблица 1).

Значение коэффициента долговечности W_{AE} находят следующим образом.

- Для блока горного массива в момент взрыва:

$$W_{0AE} = \gamma\sigma_0/(KT) = [\ln(N'_{0\Sigma} / N'_{p\Sigma})] / \Delta K_0,$$

где $\Delta K_0 = \sigma_0/[\sigma] - \sigma_p/[\sigma] \approx [1 - F_{AE}]$ – изменение коэффициента нагрузки для взрывного состояния за время релаксации напряжений после взрыва, $F_{AE} = \ln N'_{p\Sigma} / \ln N'_{0\Sigma} \approx \sigma_p/\sigma_0$;

- В равновесном состоянии:

$$W_{pAE} = \gamma\sigma_p/(KT) = [\ln(N'_{0\Sigma} / N'_{p\Sigma})] / \Delta K_p,$$

где $\Delta K_p = \sigma_0/\sigma_p - \sigma_p/\sigma_p \approx 1/F_{AE} - 1$ – изменение коэффициента нагрузки для равновесного состояния участка горного массива в равновесии.

Чтобы сформировать показатель, информативный в отношении риска разрыва породы, значения W_{AE} следует сравнить с допустимыми пороговыми значениями $[W_{AE}]$, которые определяются для блока породы, разрушаемого за время θ_{exp} , и не зависят от факторов, влияющих на результаты испытаний АЭ:

$$[W_{0AE}] = \ln(\tau_0/\theta_{exp}) + U_0/(KT).$$

Для $\tau_0 = 10^{-13} \div 10^{-15}$ s, $\theta_{exp} \approx 1 \div 1000$ s, $U_0/KT = 50 \div 60$ [9, 34], получаем $[W_{0AE}] \approx 10 \div 30$, $[W_{pAE}] \approx 1 \div 2$, которая принимается за универсальную постоянную для блока горного массива.

Рассмотрим результаты регистрации сейсмоакустических сигналов в массиве горных пород после взрывов в зонах с разным уровнем горного давления (рудник «Таймырский» компании «Норильский никель»). В безопасной зоне сигналы АЭ, зарегистрированные каналом 1, имеют следующие значения (рис. 2а):

- в начальный момент спада активности $N'_{0\Sigma} = \text{мин}^{-1}$, $\ln N'_{0\Sigma} = 4,1$;
- в последний момент спада активности $N'_{p\Sigma} = N'_{\Sigma}(16) = 2 \text{ мин}^{-1}$.

Значение акустико-эмиссионного показателя параметров напряжений на участке горного массива составляет:

$$F_{AE} = \frac{\ln N'_{p\Sigma}}{\ln N'_{0\Sigma}} = \frac{\ln(2)}{\ln(62)} = 0.168$$

Значение коэффициента долговечности для призабойной зоны составляет:

$$W_{pAE} = \ln(N'_{0\Sigma} / N'_{p\Sigma}) / \Delta K_p = \ln(195/23) / (1/0.595 - 1) = 4.04 > [W_{pAE}],$$

$$W_{0AE} = \ln(N'_{0\Sigma} / N'_{p\Sigma}) / \Delta K_0 = \ln(195/23) / (1 - 0.595) = 5.27 < [W_{0AE}]$$

Поскольку $F_{AE} < 0.5$, $W_{pAE} < [W_{pAE}]$, $W_{0AE} < [W_{0AE}]$, риск разрыва горных пород отсутствует. Зона относится к категории III, что означает отсутствие непосредственной опасности разрыва горных пород.

Аналогично, в зоне с высоким опорным давлением (Рис. 2б),

$$F_{AE} = \frac{\ln N'_{p\Sigma}}{\ln N'_{0\Sigma}} = \frac{\ln(23)}{\ln(195)} = 0.595.$$

Значение коэффициента долговечности для призабойной зоны составляет:

$$W_{pAE} = \ln(N'_{0\Sigma} / N'_{p\Sigma}) / \Delta K_p = \ln(195/23) / (1/0.595 - 1) = 4.04 > [W_{pAE}],$$

$$W_{0AE} = \ln(N'_{0\Sigma} / N'_{p\Sigma}) / \Delta K_0 = \ln(195/23) / (1 - 0.595) = 5.27 < [W_{0AE}]$$

С учетом изменения процедуры акустико-эмиссионных испытаний, вызванного уменьшением средней амплитуды сигналов АЭ с течением времени в процессе релаксации напряжений [35], скорректированные значения составляют:

$$F_{corAE} = 1.1 F_{AE} = 0.654$$

Значения коэффициента долговечности для призабойной зоны следующие:

$$W_{pAE} = \ln(N'_{0\Sigma} / N'_{p\Sigma}) / \Delta K_{p\text{corr}} = \ln(195/23) / (1/0.654 - 1) = 4.04 > [W_{pAE}],$$

$$W_{0AE} = \ln(N'_{0\Sigma} / N'_{p\Sigma}) / \Delta K_{0\text{corr}} = \ln(195/23) / (1 - 0.654) = 6.18 < [W_{0AE}].$$

Поскольку $F_{AE} > 0.5$, $W_{pAE} > [W_{pAE}]$, $W_{0AE} < [W_{0AE}]$, зона относится к категории II, что означает наличие риска разрыва горных пород, необходимость снятия напряжения в горной выработке и проведение горных работ в соответствии со стандартными методами.

Аналогично, с точки зрения всплесков горных пород (Рис. 2с), $F_{AE} = 0.94$, $W_{pAE} = 12.86$, $W_{0AE} = 13.67$, $F_{AE} > 0.5$, $W_{pAE} > [W_{pAE}]$, $W_{0AE} > [W_{0AE}]$; зона относится к категории I, что означает повышенный риск разрыва горных пород.

Таблицы 2 и 3 сравнивают параметры испытаний АЭ с точки зрения их информативности (корреляции со значениями $\sigma/[\sigma]_{\text{avg}}$ в различных зонах массива горных пород), стабильности (изменчивость по каналам регистрации) и репрезентативности параметров массива горных пород

Таблица 2

Корреляция между относительными напряжениями в разрабатываемой выработке и параметрами АЭ, рассчитанными с учетом метрологической неоднородности, связанной с уменьшением амплитуды сигналов АЭ в процессе релаксации напряжений

№ взрыва	$N_{\Sigma}(\tau_p)_1$	$N'_{0\Sigma}, \text{мин}^{-1}$	W_{pAE1}	W_{0AE1}	W_{cpAE1}	W_{cpAE}	F_{AE1}	$X_{AE1}, \text{мин}^{-1}$	Уровень горного давления, $\sigma/[\sigma]_{cp}$
114	3193	142	2,08	5,56	3,82	3,55	0,37	0,02	Повышенное опорное давление, 1,325
115	2175	173	3,24	5,76	4,5	4,42	0,56	0,04	
116	2415	198	3,33	5,91	4,62	4,71	0,56	0,02	
208	1046	182	1,24	5,35	3,29	3,03	0,23	0,12	
212	1031	195	4,04	6,18	5,11	4,35	0,65	0,12	
214	1607	256	3,09	6,07	4,58	3,69	0,51	0,07	
215	2092	241	1,58	5,68	3,63	3,27	0,28	0,08	
217	1413	204	3,42	5,97	4,7	3,94	0,57	0,1	
200	1519	186	1,39	5,23	3,31	3,06	0,27	0,12	Частично защищ, 1
205	672	135	1,1	4,91	3	2,91	0,22	0,06	
131	580	134	1,1	4,9	3	2,2	0,22	0,04	Защищенная зона, 0,7
138	332	122	1,79	4,8	3,3	2,41	0,37	0,19	
184	117	51	1,1	3,93	2,52	2,69	0,28	0,19	
186	97	46	0,69	3,83	2,26	2,47	0,18	0,29	
188	193	83	1,1	4,42	2,76	2,76	0,25	0,32	
194	64	35	1,1	3,56	2,33	2,35	0,31	0,29	
197	198	62	0,69	4,13	2,41	2	0,17	0,14	
Коэф. корр. ρ с $\sigma/[\sigma]_{cp}$	0,83	0,85	0,75	0,9	0,85	0,86	0,66	-0,69	

Таблица 3

**Значения коэффициента вариации V для каналов записи
и коэффициента репрезентативности $|\rho|/V$ параметров АЭ**

Диагностический параметр	$N_{\Sigma}(\tau_{p1})$	$N'_{\Sigma I}$	X_{AE}	F_{AE}	W_{PAE}	W_{0AE}	W_{CPAE}
Диапазон разброса V	0,062±0,68	0,04±0,74	0,02±0,26	0,07±0,43	0,07±0,51	0,01±0,28	0,04±0,67
Средние значения V_{cp}	0,32	0,3	0,1	0,24	0,27	0,08	0,19
Коеф. представит. $ \rho /V_{cp}$	2,59	2,83	6,9	2,75	2,78	11,25	4,53

Как видно из таблиц, наибольшую ценность представляют концентрационные и кинетические показатели (Таблица 1), что обусловлено оптимизационными принципами, лежащими в основе информационно-кинетического подхода. Таблица 4 показывает пример прогнозирования разрывов горных пород.

Таблица 4

Оценка риска разрыва скалы (локальный прогноз)

Категория удароопасности	Критерий удароопасности	Характеристика разрывоопасности участка МГП
I	$W_{0AE} > 7$	Повышенный риск разрыва горных пород. Необходимо немедленно снять напряжение с горных выработок; требуются дополнительные меры предосторожности для обеспечения безопасности на рабочем месте; горные работы проводятся с использованием специальных методов.
II	$5 < W_{0AE} \leq 7$	Риски разрыва горных пород. Горные выработки должны быть ослаблены; горные работы проводятся с использованием стандартных методов.
III	$W_{0AE} \leq 5$	Нет непосредственной опасности взрыва горных пород. Специальные меры не требуются; проводится постоянная оценка возможности разрыва породы

4. Выводы

Показана эффективность использования информационно-кинетического подхода и микро-механической модели временной зависимости параметров АЭ, регистрируемых после техногенного взрыва, для интерпретации результатов регистрации сигналов АЭ в горном массиве. Обоснованы параметры испытаний, связанные со временем до момента проявления горного давления, а также показатели, отражающие напряженно-деформированные параметры блока горного массива. Оригинальность представленного материала заключается в том, что ранее сформулированные параметры X_{AE} и W_{AE} (концентрационные и кинетические показатели), которые использовались при испытании объектов других типов (сварные конструкции, композитные материалы, трубопроводы, сосуды под давлением и т.д.), успешно применены для оценки риска разрыва горных пород. Полученные результаты подтверждают универсальность этих параметров и лежащих в их основе принципов оптимизации информации при испытаниях. Отличие представленной методики исследования от ранее опубликованных заключается в изменении типа нагружения тестируемого объекта путем перехода от равномерного или длительного нагружения к разгрузке в процессе релаксации напряжений после техногенного взрыва, изменении частотного диапазона сигналов и типа оборудования, а также в использовании новой математической модели параметра W_{AE} , представленной в статье. В статье также приведены новые сведения по статистической обработке экспериментальных данных, подтверждающие, что концентрационные и кинетические показатели прочности более информативны по сравнению с традиционно используемыми энергетическими показателями.

***Вклад авторов:** концептуализация, В.В.Н. и А.И.Б.; методология, В.В.Н.; программное обеспечение, А.П.А.; валидация, А.П.А.; формальный анализ, В.В.Н. и А.П.А.; ресурсы, В.В.Н.; курирование данных, В.В.Н.; написание – подготовка первоначального проекта, В.В.Н.; написание-рецензирование и редактирование, А.И.Б.; визуализация, А.И.Б. и А.П.А.; руководство, В.В.Н.; получение финансирования, А.И.Б. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.*

Финансирование: исследование частично финансировалось Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы «Исследовательский центр мирового класса: Передовые цифровые технологии» (контракт № 075-15-2022-311 от 20 апреля 2022 г.).

Заявление Совета по институциональному надзору: не применимо.

Заявление о доступности данных: не применимо.

Благодарности: не применимо.

Конфликты интересов: авторы не заявляют о конфликте интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Ren, J.; Zhang, W.; Ma, J. Experimental study on butterfly shape of failure zone and fractal characteristics of rock burst. *Eng. Fail. Anal.* 2022, 140, 106636. <http://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106636>
- Khayrutdinov, A.M.; Kongar-Syuryun, C.B.; Kowalik, T.; Tyulyaeva, Y.S. Stress-strain behavior control in rock mass using different-strength backfill. *Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, 10, 42–55. <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-10-0-42-55>
- Sidorov, D.V. Methodology of reducing rock bump hazard during room and pillar mining of north ural deep bauxite deposits. *J. Min. Inst.* 2017, 223, 58–69. <http://doi.org/10.18454/pmi.2017.1.58>
- Ivanov, S.L.; Fadeev, D.V.; Kudryavtseva, R.-E.A. Peat mining, a look through the centuries. *Quest Hist.* 2022, 7, 45–63. <http://doi.org/10.31166/VoprosyIstorii202207Statyi01>
- Zhang, X.; Tang, J.; Pan, Y.; Yu, H. Experimental study on intensity and energy evolution of deep coal and gas outburst. *Fuel* 2022, 324, 124484. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124484>
- Gendler, S.G.; Gabov, V.V.; Babyr, N.V.; Prokhorova, E.A. Justification of engineering solutions on reduction of occupational traumatism in coal longwalls. *Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, 1, 5–19. <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2022-1-0-5>
- Song, D.; He, X.; Qiu, L.; Zhao, Y.; Cheng, X.; Wang, A. Study on real time dynamic monitoring and early warning technology of regional and local outburst danger. *Meitan Kexue Jishu* 2021, 49, 110–119. <http://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.05.014>
- Gendler, S.G.; Fazylov, I.R. Application efficiency of closed gathering system toward microclimate normalization in operating galleries in oil mines. *Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, 9, 65–78. <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-9-0-65>
- Protosenya, A.G.; Stavrogin, A.N. *Mechanics of Deformation and Destruction of Rocks*; Nedra: Moscow, Russia, 1992; p. 224.
- Rybak, J.; Khayrutdinov, M.M.; Kuziev, D.A.; Kongar-Syuryun, C.B.; Babyr, N.V. Prediction of the geomechanical state of the rock mass when mining salt deposits with stowing. *J. Min. Inst.* 2022, 253, 61–70. <http://doi.org/10.31897/PMI.2022.2>
- Mengel, D.A. The results of rock burst prediction on the sokolovskaya underground mining by the acoustic emission method. *Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, 3–1, 149–160. <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-149-160>
- Shkuratnik, V.L.; Nikolenko, P.V. Using acoustic emission memory of composites in critical stress control in rock masses. *J. Min. Sci.* 2013, 49, 544–549. <http://doi.org/10.1134/S1062739149040035>
- Li, J.; Hu, Q.; Yu, M.; Li, X.; Hu, J.; Yang, H. Acoustic emission monitoring technology for coal and gas outburst. *Energy Sci. Eng.* 2019, 7, 443–456. <http://doi.org/10.1002/ese3.289>
- Li, M.; Su, C.; Li, G. Prediction of the stability of the loaded rock based on the acoustic emission characteristics of the loaded rock based on data mining. *Shock. Vib.* 2021, 2021, 1–8. <http://doi.org/10.1155/2021/4249957>
- Du, S.; Feng, G.; Li, Z.; Sarkodie-Gyan, T.; Wang, J.; Ma, Z.; Li, W. Measurement and prediction of granite damage evolution in deep mine seams using acoustic emission. *Meas. Sci. Technol.* 2019, 30, 114002. <http://doi.org/10.1088/1361-6501/ab329c>
- Clavijo, J.; Wang, H.; Sánchez, S. Observation of significant differences between electromagnetic and acoustic emissions during fracture processes: A study on rocks under compression loading. *J. Phys. Conf. Ser.* 2019, 1386, 012107. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1386/1/012107>
- Efimov, V.P. Effect of loading rate on fracture toughness within the kinetic concept of thermal fluctuation mechanism of rock failure. *J. Min. Sci.* 2016, 52, 274–278. <http://doi.org/10.1134/S1062739116020406>
- Wang, H.; Tang, L.; Ren, X.; Yang, A.; Niu, Y. Mechanism of rock deformation memory effect in low stress region and its memory fading. *Rock Soil Mech.* 2014, 35, 1007–1014.
- Nosov, V.V. Control of inhomogeneous materials strength by method of acoustic emission. *J. Min. Inst.* 2017, 226, 469–479. <http://doi.org/10.25515/pmi.2017.4.469>
- FNiP, No. 505. Federal Norms and Regulations in the Field of Industrial Safety «Safety Rules for Mining Operations and Processing of Solid Minerals»*; Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision (Rostekhnadzor): Moscow, Russia, 2020. (In Russian)
- Kuksenko, V.S.; Makhmudov, K.F.; Mansurov, V.A.; Sultonov, U.; Rustamova, M.Z. Changes in structure of natural heterogeneous materials under deformation. *J. Min. Sci.* 2009, 45, 355–358. <http://doi.org/10.1007/s10913-009-0044-3>
- Shcherbakov, I.P.; Kuksenko, V.S.; Chmel', A.E. Temperature dependence of microdamage accumulation in granite under impact fracture. *J. Min. Sci.* 2013, 49, 919–925. <http://doi.org/10.1134/S1062739149060117>
- Kocharyan, G.G.; Ostapchuk, A.A. Acoustic emission during different-type inter-block movements. *J. Min. Sci.* 2015, 51, 1–9. <http://doi.org/10.1134/S1062739115010019>
- Krivoshchev, I.A.; Ivanov, G.A. Statistical method for processing acoustic emission signals in a rock massif. *Defektoskopiya* 2002, 2, 62–65.
- Nagovitsyn, Y.N.; Kakoshina, L.V. Regional rockburst hazard forecast at the mines of the Polar Division of PJSC MMC Norilsk Nickel. Development prospects. In Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 110th Anniversary of the Mining Faculty, Mining in the 21st Century: Technology, Science, Education, Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia, 28–29 October 2015.
- Gilyarov, V.L.; Damaskinskaya, E.E.; Kadomtsev, A.G.; Rasskazov, I.Y. Analysis of statistic parameters of geoacoustic monitoring data for the antey uranium deposit. *J. Min. Sci.* 2014, 50, 443–447. <http://doi.org/10.1134/S1062739114030065>

27. Oparin, V.N.; Yemanov, A.F.; Vostrikov, V.I.; Tsibizov, L.V. Kinetics of seismic emission in coal mines in kuzbass. *J. Min. Sci.* 2013, 4, 40–45. <http://doi.org/10.1134/S1062739149040011>
28. Rasskazov, I.Y.; Kursakin, G.A. Features of seismoacoustic control of the geomechanical state of a rock mass in geodynamically active areas. *News High Inst. Min. Mag.* 2006, 6, 22–28.
29. Meng, Q.; Zhang, M.; Han, L.; Pu, H.; Chen, Y. Acoustic emission characteristics of red sandstone specimens under uniaxial cyclic loading and unloading compression. *Rock Mech. Rock Eng.* 2018, 51, 969–988. <http://doi.org/10.1007/s00603-017-1389-6>
30. Archer, J.W.; Dobbs, M.R.; Aydin, A.; Reeves, H.J.; Prance, R.J. Measurement and correlation of acoustic emissions and pressure stimulated voltages in rock using an electric potential sensor. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2016, 89, 26–33. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.08.002>
31. Nosov, V.V. Bump hazard evaluation of a rock mass area as a result of its seismic acoustic activity registration. *J. Min. Inst.* 2015, 216, 62–75. (In Russian)
32. Nosov, V.V.; Chaplin, I.E.; Gilyazetdinov, E.R.; Grigoriev, E.V.; Pavlenko, I.A. Micromechanics, nanophysics and non-destructive testing of the strength of structural materials. *Mater. Phys. Mech.* 2019, 42, 808–824. http://doi.org/10.18720/MPM.4262019_13
33. Regel', V.R.; Slutsker, A.I.; Tomashevskii, E.E. The kinetic nature of the strength of solids. *Sov. Phys. Uspekhi* 1972, 15, 45–65. <http://doi.org/10.1070/PU1972v015n01ABEH004945>
34. Grigorev, E.; Nosov, V. Improving quality control methods to test strengthening technologies: A multilevel model of acoustic pulse flow. *Appl. Sci.* 2022, 12, 4549. <http://doi.org/10.3390/app12094549>
35. Trapeznikov, Y.A.; Manzhikov, B.T.; Bogomolov, L.M. Amplitude spectra of acoustic emission under stepwise loading of rocks. *Volc. Seism.* 2000, 2, 75–78.