



Анализ диагностической ценности критериев удароопасности горных пород

В.В. Носов¹ ✉, Е.В. Григорьев¹, В.Г. Мерзляков²

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация

✉ nosovvv@list.ru

Резюме: Прогнозирование горных ударов в условиях роста глубины разработки, а также усложнений условий горных выработок является актуальной задачей. Выбор критериев удароопасности массива горных пород с учетом влияния на них дестабилизирующих факторов, позволяющих сделать долгосрочное прогнозирование на их основе, и оценка их диагностической ценности являются целью данного исследования. В статье приведен сравнительный анализ статистических параметров акустической эмиссии, показателей, связанных с накоплением повреждений, совместного использования комбинированных методик акустической эмиссии в сочетании с другими методами контроля и геомеханического мониторинга, а также использования нейросетевых подходов. Установлено, что изложенные в литературе статистические критерии чувствительны к дестабилизирующим факторам, требуют длительного и трудоемкого обучающего эксперимента и обеспечивают краткосрочный прогноз. Предложен и обоснован концентрационно-кинетический показатель W_{0AE} , демонстрирующий устойчивость к дестабилизирующим факторам и являющийся статистически значимым. Предложены критерии для оценки участков массива горных пород по степени удароопасности при локальном прогнозировании.

Ключевые слова: прогнозирование горных ударов, акустическая эмиссия, геомеханический мониторинг, удароопасность, акустико-эмиссионная диагностика

Для цитирования: Носов В.В., Григорьев Е.В., Мерзляков В.Г. Анализ диагностической ценности критериев удароопасности горных пород. *Горная промышленность*. 2026;(4S):61–68. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-61-68>

Analysis of the diagnostic value of rock burst hazard criteria

V.V. Nosov¹ ✉, E.V. Grigoriev¹, V.G. Merzlyakov²

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

² Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

✉ nosovvv@list.ru

Abstract: Predicting rock bursts with increasing mining depths and conditions becoming more complex is a pressing issue. This study aims to select the rock burst hazard criteria that take into account the impact of destabilizing factors while enabling long-term forecasting, and to assess their diagnostic value. This paper presents a comparative analysis of the statistical parameters of acoustic emission, indicators related to damage accumulation, joint use of combined acoustic emission techniques in conjunction with other control and geomechanical monitoring methods, and the use of neural network algorithms. It has been established that the statistical criteria presented in the literature are sensitive to the destabilizing factors, require a long and labor-intensive training experiment, and can be used only for short-term forecasting. A concentration-kinetic indicator, W_{0AE} , is proposed and justified. It demonstrates resistance to the destabilizing factors and is statistically significant. Criteria are proposed for assessing rock mass sections by their degree of burst hazard for local forecasting.

Keywords: rock burst prediction, acoustic emission, geomechanical monitoring, rock burst hazard, acoustic emission diagnostics

For citation: Nosov V.V., Grigoriev E.V., Merzlyakov V.G. Analysis of the diagnostic value of rock burst hazard criteria. *Russian Mining Industry*. 2026;(4S):61–68. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-61-68>



Введение

Усложнение условий, увеличение глубины ведения и повышение требований к производительности горных работ делают особенно актуальным решение задач долгосрочного, оперативного и при этом достоверного прогнозирования их удароопасности [1–3]. Используемые в настоящее время критерии удароопасности не в полной мере удовлетворяют предъявляемым требованиям, поскольку либо подвержены влиянию большого количества шумозависимых дестабилизирующих факторов и требуют длительного «обучения» для формулировки надёжного диагностического признака, либо опираются на моделирование и контроль параметров краткосрочных завершающих стадий разрушения [4–6]. Обоснование эффективных критериев заставляет искать новые подходы к измерениям и методам интерпретации их результатов, что связано с пересмотром отношения к доминирующему в настоящий момент статистическому подходу к прогнозированию разрушения [7–9].

Прогнозирование горных ударов [10–12] при акустико-эмиссионном мониторинге в значительной степени зависит от идентификации и интерпретации параметров акустической эмиссии (АЭ), которые служат индикаторами раннего предупреждения о надвигающихся разрушениях. АЭ мониторинг в режиме реального времени обеспечивает информацию о зарождении, распространении и слиянии микротрещин, которые являются предвестниками разрушения горных пород. К таким параметрам относятся b -value (отражает распределение амплитуд АЭ) [13–15], энергия АЭ сигнала [16–18] и частотные характеристики [19–21]. Кроме того, время нарастания и длительности сигналов, их амплитуда, RA/RF отношение (время нарастания сигнала к средней частоте) и другие характеристики сигналов также используются для повышения точности прогнозирования. Активно развиваются методики, использующие многопараметровый контроль, модели машинного обучения и интеграцию с другими геофизическими методами мониторинга [15, 22, 23]. Модели, связывающие параметры АЭ с накоплением и механикой повреждений, связывают с вероятностью удароопасности. Такие модели были проверены на различных типах горных пород (гранит, песчаник и т.д.) и условиях нагружения (одноосное, трехосное, циклическое) с использованием определяющих уравнений или статистических подходов для описания перехода от микроповреждений к макроскопическому разрушению [24–26]. Совместное использование данных акустической эмиссии с другими физическими полями, например, инфракрасной тепловизионной съемкой допол-

нительно расширяет возможности раннего прогнозирования [27–29]. Однако проблемы, связанные с определением пороговых значений из-за сложных геомеханических условий, тщательной калибровкой чувствительной аппаратуры, влиянием техногенных помех и краткосрочным прогнозированием, не позволяют осуществить долгосрочное прогнозирование горных ударов.

Таким образом, анализ развития метрологических и диагностических технологий показал перспективность интеллектуальных переходов, которые явились результатом конкуренции двух принципиально отличающихся совокупностей операций, выполняемых для определения количественного значения величины:

- иррационально-эмпирических, локальных, основанных на статистическом переборе возможности экспериментальных наблюдений и регистрации пространственных параметров различных процессов;

- рациональных, универсальных, основанных на логическом моделировании и расчете значения этой величины, регистрации временных параметров.

Большинство из используемых применительно к оценке удароопасности критериев (табл. 1) имеют краткосрочный прогностический смысл или требуют трудоемкого длительного эмпирического обучения.

Например, частота событий, суммарная или максимальная энергии существенно зависят от факторов, дестабилизирующих связь измеряемых величин с параметрами состояния, определяемый по этапам неустойчивого разрушения коэффициент в формуле амплитудного распределения Гуттенберга – Рихтера b -фактор [30–32], характеризующий величину, обратную вероятности появления событий АЭ высоких амплитуд (рис. 1), с точки зрения ценности диагностирования рассматривается как низко информативный, характеризующий либо начальный 1 (приработку), либо завершающий 3 (предаварийное состояние) периоды эксплуатации технического объекта (рис. 2). Частота событий, суммарная или максимальная энергии существенно зависят от факторов, дестабилизирующих связь измеряемых величин с параметрами состояния.

В связи с оторванностью от функциональных и физических моделей, отсутствием устойчивых к помехам параметров и обоснованных высокоточных измерений он весьма трудоемок и позволяет обеспечивать лишь краткосрочный прогноз удароопасности. Однако потребность в прогнозе долгосрочном (более нескольких суток) и высокой степени геодинамической безопасности при ведении горных работ в особо сложных горно-геологических условиях статистическим подходом не удовлетворена. В данной работе

Таблица 1
Наиболее распространенные показатели удароопасности

Показатель	Запись	Свойство
Частота событий	$N / \Delta t$	Количество событий за промежуток времени
Суммарная энергия	ΣE	Накопленный кумулятивный уровень повреждений
Максимальная энергия	$E_{\max}$	Наличие отдельных событий, способных быть предвестниками сильного разрушения
Энергетическая скорость	$\Sigma E / \Delta t$	Темп высвобождения энергии
b -value	$\log_{10} N(\geq M) = a - bM$	Доля крупных событий в общем потоке
Доля крупных событий	$n(E > E_{\text{кр}}) / N$	Насыщение потока высокоэнергетическими источниками
Пространственная концентрация	$N_{\text{опасн}} / N_{\text{общ}}$	Формирование очага разрушения около выработки
Скорость изменения признака	$(X_t - X_{t-1}) / X_{t-1}$	Ускорение процесса повреждения

Table 1
The most common rock burst hazard indicators

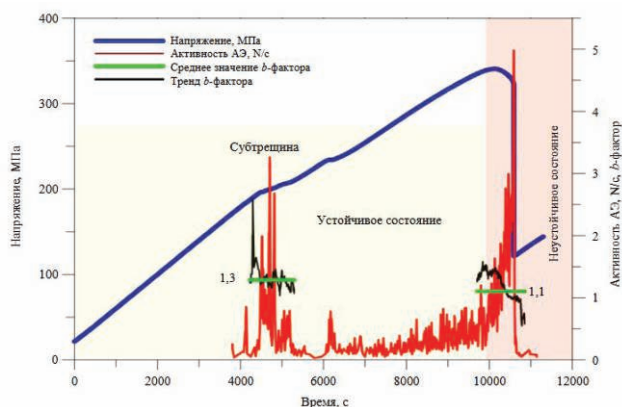


Рис. 1
Временные зависимости нагружающих напряжений, активности и b-фактора акустической эмиссии для образцов горных пород
Источник: [33]

Fig. 1
Time dependences of loading stresses, activity and acoustic emission b-factor for rock samples
Source: [33]

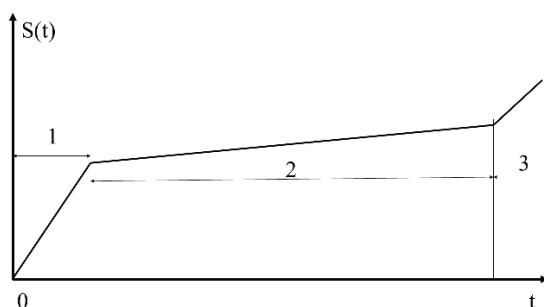


Рис. 2
Разделение общего срока эксплуатации технического объекта на различные по информативности периоды деградационных процессов накопления повреждаемости S: 1 – период приработки; 2 – прогностичный период нормальной эксплуатации; 3 – период предаварийного состояния

Fig. 2
Division of the total service life of a technical facility into periods of the degradation processes due to damage accumulation S with different information content: 1 – running-in period, 2 – predictive period of normal operation, 3 – pre-emergency state period

рассматривается информационно-кинетический подход [34–36] как физически обоснованная альтернатива, позволяющая перейти от регистрации «активности разрушения» к оценке остаточного ресурса призабойной зоны.

Результаты

Утвержденный в 2019 г. вариант определений основных единиц измерения сделал математическое моделирование и пространственно-временной переход неотъемлемыми атрибутами современного технологического прогресса. Потребность в повышении точности и эффективности снятия неопределенности в метрологии привели к пониманию информативности рационально обоснованных методов, выбравших в качестве предпочтительного варианта расчет большинства основных величин и измерений времени соответствующего процесса. Подобный вектор развития намечается и в области прочностного контроля и диагностирования, где разработан доводящий диагностику до долгосрочного экспресс-прогнозирования ресурса сложно

нагруженных и опасных в эксплуатации технических объектов информационно-кинетический подход, концепция которого представлена на рис. 3. В рамках этого подхода наиболее ценными представляются детерминировано-статистические прогностические модели и критерии, пригодные для определения остаточного ресурса объекта контроля.

Информационно-кинетический подход к диагностированию и вытекающие из многоуровневой модели диагностические АЭ показатели состояния участка массива горных пород – величины коэффициента относительной нагруженности F_{AE} , характеристики структуры, роста и спада активности АЭ после технологического взрыва – коэффициент структуры X_{AE} , а в качестве связанного со временем до разрушения призабойной зоны критерия ее удаороопасности – коэффициент долговечности W_{AE} (табл. 2).

Таблица 2
Многомодельные многоуровневые концентрационно-кинетические АЭ показатели прочности, устойчивые к влиянию помех и дестабилизирующих факторов АЭ контроля

Table 2
Multi-model multi-level concentration-kinetic AE strength indicators, tolerant to the interference and destabilizing factors of the AE control

АЭ показатель	Микро-модель	Нано-модель	Свойство
F_{AE}	$\ln \xi_1 / \ln \xi_2$	σ_1 / σ_2	Относительная нагруженность
X_{AE}	$d \ln \xi / dt$	$\alpha = \gamma \sigma / KT$	Структура, рост и спад активности
W_{AE}	$d \ln \xi / dK_H$	$\omega = \gamma \sigma / KT$	Долговечность

Примечание: K_H – коэффициент нагрузки (отношение диагностической нагрузки к рабочей)

Note: K_H – load factor (the ratio of the test load to the operating load)

Высокая информативность концентрационно-кинетического параметра $\alpha = X_{AE}$, определяемого на широком круге композиционных материалов, отмечена в работе [33], где по аппроксимационной кривой, описываемой экспоненциальной зависимостью для участка тренда активности (рис. 4), соответствующего этапу однородного разрушения, по формуле:

$$Y = C \exp(\alpha t), \quad (1)$$

где Y – приближенное значение активности АЭ; C – масштабный коэффициент; α – коэффициент показателя экспоненты; t – текущее время испытания. Определяется по прогностическому участку разрушения, соответствующего устойчивому состоянию и соответствует информативному параметру согласно классическим подходам диагностирования. При возрастающем нагружении величина показателя экспоненты α характеризует скорость возрастания активности АЭ – чем выше значение α , тем быстрее растет число событий в единицу времени в процессе акустической эмиссии.

Концентрационно-кинетический показатель, связанный со временем, оставшимся до разрушения (остаточным ресурсом), – $\alpha \cdot X_{AE}$ – определяется по прогностическому участку разрушения, соответствующего устойчивому состоянию, и соответствует информативному параметру согласно классическим подходам диагностирования. Высокая информативность показателя α , определяемого во

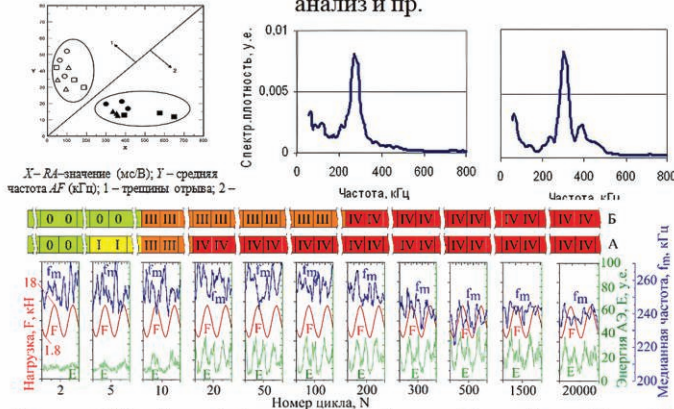
1. Статистический подход

1.1. Статистические инварианты

$I_{\Delta t} = \sigma_{\Delta t} / \Delta t_{cp}$, $i_{\Delta t} = (\Delta t_{cp} - \sigma_{\Delta t}) / \Delta t_{cp}$
 Δt_{cp} – средний интервал между импульсами;
 $\sigma_{\Delta t}$ – среднее квадратичное отклонение интервалов.

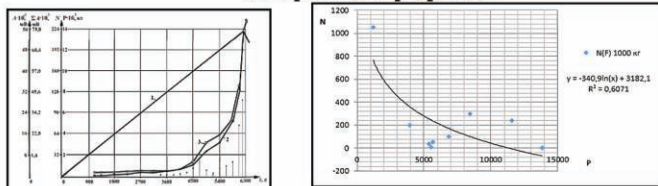
1.2. Статистические вариации

Изменения эллипсов рассеяния значений параметров АЭ, частотных и амплитудных распределений, временных интервалов между импульсами, СКО, коэф. вар., вейвлет-анализ и пр.



Трипалин, Буйло, Бигус, Алёшин, Нефедьев, Савельев, Петров, Бырин, Попов, Мерсон, Растагаев, РБ "Методические рекомендации по порядку проведения акустико-эмиссионного контроля", пр. №385 от 5.11.2025

1.3. Уравнения регрессии



2. Физические подходы

2.1. Механический

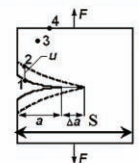
Кинетические диаграммы
усталостного разрушения



Ресурс

$$N_c = (S-a) / (A(\Delta K_I)^m)$$

Развитие трещины



Скорость развития трещины $V = A \Delta K_I^m$ (Модель Периса-Эрдогана)

Скорость счёта АЭ $N^* = A_D A K_I^m$ (Модель Данегана)

где $A_D = 2,38 \cdot 10^{-19} \div 3,8 \cdot 10^{-14}$, (метрологический разброс dA_D 5 порядков),
 m – локально-динамический показатель (Иванова-Быкова), K_I – КИН

2.2. Кинетический

Модель однородного микротрещинообразования

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{C_0 - C(t)}{\Theta_{CP}(t)}$$



$C(t^*) = C^*$;
 $C^*/C_0 \approx 0,1 \div 0,01$, dC^* 1
порядок
 $N_C \equiv A / N_C$

где $\theta_{CP} = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma)/(KT)]$ – формула Журкова

Ресурс $t^* = N^* / N' = N^* \Delta t_{CP}$ (Петров),

$N^* = 1 \cdot 10^6$ (метрологический разброс $dN^* = dA_D + dC^*$ 6 порядков)

2.3. Информационно-кинетический

Многоуровневая модель параметров АЭ (Носов)

$$\xi(t) = k_{AE} C_0 \int_{\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega} \Psi(\omega) \{1 - \exp[-\int_0^t dt' / \Theta(U_0, \alpha(x'))]\} d\omega, N_C \equiv A / N_{\Sigma \text{однор}}$$

Акустически активный объём

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

Концентрационно-кинетические
показатели Носова

$$X_{AE}, Y_{AE} = \gamma / KT, W_{AE} = \gamma \sigma / KT$$

$$\text{Ресурс } N_C \equiv N_B / \exp W_{AE} \text{ (Носов)}$$

метрологический разброс dN_B 2 порядка

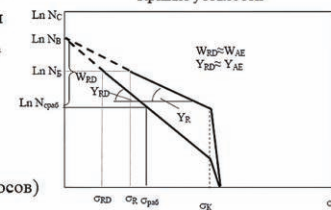


Рис. 3
Подходы к обеспечению безопасности методом акустико-эмиссионного диагностирования

Fig. 3
Approaches to ensuring safety using acoustic emission diagnostics

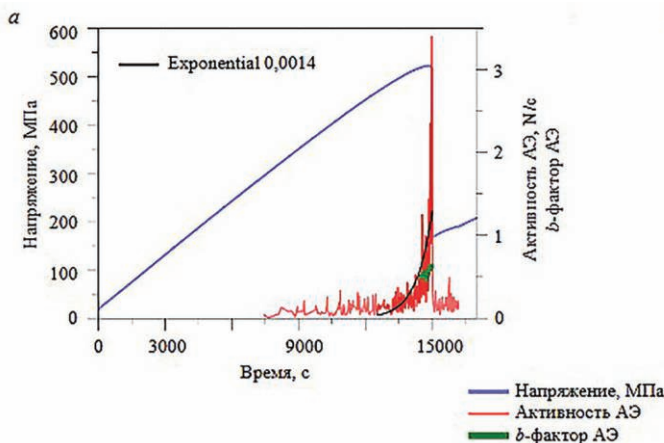


Рис. 4
Анализ активности акустической эмиссии и b-фактора для магматических (уртиты) и метаморфических (руды) пород:
а – образец уррита с пределом прочности 523 МПа;
б – образец уррита с пределом прочности 463 МПа
Источник: [37]

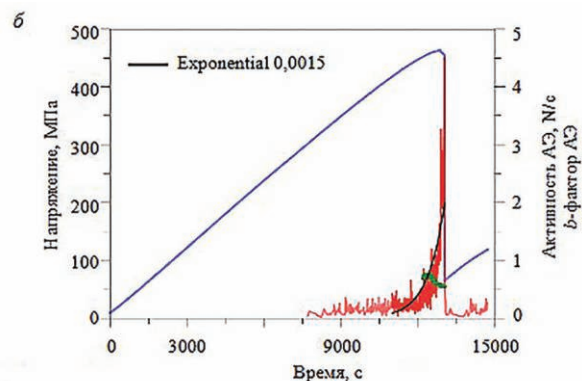


Fig. 4
Analysis of the acoustic emission activity and b-factor for igneous (urtites) and metamorphic (ores) rocks:
а – an urtite sample with the tensile strength of 523 МПа;
б – an urtite sample with the tensile strength of 463 МПа
Source: [37]

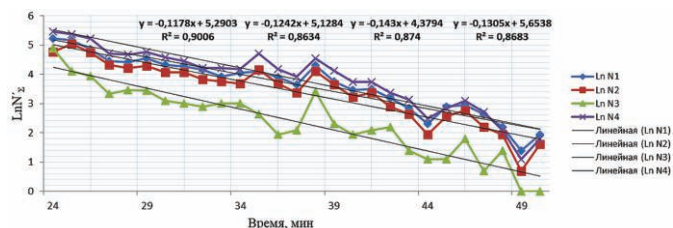


Рис. 5
Результаты регистрации различными каналами при прохождении участка защищенной зоны временной зависимости, вызванной технологическим взрывом акустической эмиссии месторождений Норильского промышленного района
 $\alpha = X_{AE}$ – угловые коэффициенты зависимости $y_i(x)$

Fig. 5
Results of logging using various channels while passing a section of the protected zone of the time dependence of an acoustic emission caused by a technical blast at the deposits of the Norilsk industrial region
 $\alpha = X_{AE}$ – angular dependence coefficients $y_i(x)$

время спада вызванной взрывом сейсмоакустической активности по отношению к удароопасности массива, показана в работе [35] (рис. 5).

Также высока информативность других, указанных в табл. 2, показателей прочности. Значение параметра долговечности W_{AE} определяется по формулам:

– для состояния массива в момент взрыва

$$W_{0AE} = \frac{\gamma \sigma_0}{KT} = \left[\frac{\ln \left(\frac{N'_{0\Sigma}}{N'_{p\Sigma}} \right)}{\Delta K_0} \right], \quad (2)$$

где $N'_{0\Sigma}$, $N'_{p\Sigma}$ – АЭ активности массива после взрыва и в конце спада (в равновесном состоянии) соответственно; $\Delta K_0 = \sigma_0/[\sigma] - \sigma_p/[\sigma] \approx [1 - F_{AE}]$ – изменение коэффициента на-

грузки для взрывного состояния за время релаксации на напряжений после взрыва, $F_{AE} = \ln N'_{0\Sigma} / \ln N'_{p\Sigma} \approx \sigma_p / \sigma_0$. $\ln N'_{\Sigma}$;

– в равновесном состоянии:

$$W_{pAE} = \frac{\gamma \sigma_p}{KT} = \left[\frac{\ln \left(\frac{N'_{0\Sigma}}{N'_{p\Sigma}} \right)}{\Delta K_p} \right], \quad (3)$$

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

В качестве критерия опасности и диагностического признака, информативного относительно удароопасности, значения W_{AE} сравниваются с критической допустимой величиной $[W_{AE}]$, которые определяются из условий разрушения горной породы за время $\theta_{взр}$ взрывного воздействия и безопасного проведения работ после взрыва за время θ_p и не зависят от факторов, влияющих на результаты АЭ контроля:

$$[W_{0AE}] = \ln \left(\frac{\tau_0}{\theta_{взр}} \right) + \frac{U_0}{KT}; \quad (4)$$

$$[W_{pAE}] = \ln \left(\frac{\tau_0}{\theta_p} \right) + \frac{U_0}{KT}. \quad (5)$$

С учётом значений величин $\tau_0 = 10^{-13} - 10^{-15}$ с, $\theta_{взр} \approx 1 - 10$ с, $U_0/KT \approx 50$, минимального времени безопасной работы 10 ч из формулы С.Н. Журкова имеем $[W_{0AE}] \approx 10$, $[W_{pAE}] \approx 1 - 2$, которые принимаем за устойчивые параметры модели АЭ активности массива [34, 35]. В связи вышеизложенными принципами оптимизации и данными по ценности диагностических параметров (табл. 3, критерий оптимизации – коэффициент представительности связи с показателем дискования керна) оценка удароопасности участка массива горных пород при локальном прогнозировании производится по предпочтительному критерию W_{0AE} в соответствии с табл. 4.

Таблица 3
Значения коэффициента V вариации по каналам регистрации и коэффициента представительности $|p|/V$ диагностических параметров АЭ

Диагностический параметр	$N_{\Sigma}(\tau_p)_1$	$N'_{0\Sigma 1}$	X_{AE}	F_{AE}	W_{pAE}	W_{0AE}	$W_{срAE}$
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 $V_{ср}$	0,32	0,3	0,1	0,24	0,27	0,08	0,19
Коэффициент представительства $ p /V_{ср}$	2,59	2,83	6,9	0,75	2,78	11,25	4,53

Table 3
Values of the variation coefficient V by the recording channels and the representativity coefficient $|p|/V$ of the diagnostic parameters of AE

Таблица 4
Оценка удароопасности участка массива горных пород при локальном прогнозировании

Категория удароопасности	Критерий удароопасности	Характеристика удароопасности участка
I	$W_{0AE} > 7$	С повышенной опасностью горных ударов. Выработки должны быть немедленно приведены в неудароопасное состояние, обязательны дополнительные меры предосторожности, обеспечивающие безопасность людей; горные работы ведутся по специальной технологии
II	$5 < W_{0AE} \leq 7$	Опасные по горным ударам. Выработки должны быть приведены в неудароопасное состояние, горные работы ведут по обычной технологии
III	$W_{0AE} \leq 5$	Не представляющие непосредственной опасности горных ударов. Специальные меры не применяются, но текущий прогноз удароопасности осуществляется

Table 4
Assessment of the rock burst hazard in a rock mass section using local forecasting



Заключение

Диагностическая ценность критериев удароопасности и прогнозирование горных ударов должно обеспечиваться развитием общей идеи неразрушающей диагностики: разрушение нужно не просто обнаружить, а понять как процесс. Горный удар возникает не мгновенно из ничего; ему предшествует накопление повреждений, перераспределение напряжений, локализация микротрещин и рост энергии событий. Поэтому акустические сигналы могут рассматриваться как ранние сведения о будущем опасном состоянии.

Наиболее перспективным направлением является сочетание регистрации АЭ, локации источников, анализа временных зависимостей и микромеханического моделирования. Такой подход лучше соответствует природе горного массива, чем простое накопление статистики по числу импульсов. Он позволяет перейти от «наблюдения активности» к прогнозу риска, а затем к превентивным мерам.

Главный практический вывод состоит в следующем: прогноз горных ударов должен быть построен как информационно-диагностическая система. В ней измерения, модель, критерии, опыт рудника и меры безопасности должны работать совместно. Только в этом случае критерии удароопасности становятся не просто набором признаков, а инструментом предупреждения аварий и обеспечения безопасности.

Методологическим выводом работы являются следующие принципы обеспечения диагностической ценности критериев удароопасности горных пород:

Генерация (выработка) достоверной информации про-

изводится посредством обоснованного определения, корректировки, регулировки и проверки значений параметров информативных математических моделей, полученных на основе фундаментальных физических законов в процессе последовательного перехода от реального объекта и построения критических, логически взаимосвязанных и иерархически подчинённых цели, задачам и критериям оптимизации функциональных и физических моделей по порядку убывания их информативности с повышением уровня абстрагирования. (Принцип рациональности, информативного моделирования, интеллектуального анализа данных, иерархичности, целостности, достоверности и достаточности обоснования).

Информационное наполнение математических моделей ведётся на основе использования количественных критериев однородности и стабильности поведения прогнозируемых относительно назначения объекта процессов, имеющих баз накопленных ранее данных, устойчивых (предпочтительно временных) эталонов и универсальных физических констант. Оптимальный прогноз реализуется линейной экстраполяцией временной зависимости процессов на критическое значение изменяемого параметра состояния и соответствует максимальному количеству получаемой достоверной информации и экстремальному значению выбранного критерия оптимизации (например, максимуму коэффициента корреляции между диагностическим параметром и параметром состояния). (Принцип физико-метрологического обеспечения (информативной преемственности и законченности, линейной прогностической экстраполяции).

Список литературы / References

1. Brook M., Hebblewhite B., Mitra R. Coal mine roof rating (CMRR), rock mass rating (RMR) and strata control: Carborough Downs Mine, Bowen Basin, Australia. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020;30(2):225–234. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.01.003>
2. Cai W., Dou L., Zhang M., Cao W., Shi J.-Q., Feng L. A fuzzy comprehensive evaluation methodology for rock burst forecasting using microseismic monitoring. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018;80:232–245. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.06.029>
3. Dzhemilev E., Shammazov I., Khvesko A., Mazur M. Development of a method for assessing bending stresses in the walls of above-ground main pipelines based on airborne laser scanning data. *Applied Sciences*. 2026;16(3):1330. <https://doi.org/10.3390/app16031330>
4. Jian Z., Xibing L., Xiuzhi S. Long-term prediction model of rockburst in underground openings using heuristic algorithms and support vector machines. *Safety Science*. 2012;50(4):629–644. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.08.065>
5. Shikhov A.I., Gogolinsky K.V., Zubarev A.S., Smorodinsky Ya.G., Kopytina D.V., Vinogradova A.A. Analysis of the requirements for metrological support of methods and means of ultrasound control. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2025;61(3):280–294. <https://doi.org/10.1134/S1061830924603180>
6. Makhmudov Kh.F., Kulbeda D.A. Substantiation of methods for strength control of solid heterogeneous materials based on registration of emission and dynamics of nanosecond fracture. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2025;9(Suppl. 1):S111–S121. <https://doi.org/10.1134/s1027451026700151>
7. Odintsov E.E., Gusev V. N. Rock mass condition control by the method of predicting of water-conducting fracture zone parameters for the deposits of polymetallic ores. *International Journal of Engineering, Transactions C: Aspects*. 2026;39(6):1326–1333. <https://doi.org/10.5829/ije.2026.39.06c.02>
8. Reshetnyak S.N., Zotov V.V., Kuziev D.A., Kozlova O.Yu. Enhancing performance efficiency of electric consumers within surface infrastructure of coal mines. *Eurasian Mining*. 2025;1(1):100–104. <https://doi.org/10.17580/em.2025.01.20>
9. Protosenya A., Ivanov A. Data-driven prediction of stress-strain fields around interacting mining excavations in jointed rock: A comparative study of surrogate models. *Mining*. 2026;6(1):4. <https://doi.org/10.3390/mining6010004>



10. Khanh D.V., Khuy N.T., Son T.T., Tuan P.A., Lebedev A.P. Investigation on Factors Influencing Development of a Smart City Model in Hanoi. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. 2027;40(1):1–10. <https://doi.org/10.5829/ije.2027.40.01a.01>
11. Zadkov D.A., Martyushev N.V., Malozyomov B.V., Demin A.Y., Pogrebnoy A.V., Kuleshova E.E., Valuev D.V. Mathematical modeling of operational reliability of mine lifting equipment based on censored data. *Mathematics*. 2026;14(4):716. <https://doi.org/10.3390/math14040716>
12. Babyr N.V., Kuziev D.A., Sazankova E.S., Dobler M.O. Influence of cyclic impacts of powered roof support on weakening of immediate roof rocks. *Eurasian Mining*. 2026;(1):14–19. Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/2523/article/41017/> (accessed: 17.04.2026).
13. Gustov V., Pshenin V., Zakirova G. Substantiation of solutions for enhancing the environmental safety level of a marine oil terminal under conditions of high intensification of technological processes. *Frontiers in Marine Science*. 2026;13:1849663. <https://doi.org/10.3389/fmars.2026.1849663>
14. Wang D., Ma Y., Liu X., Li D., Liu Q., Yang H., Li X. Improving mining sustainability and safety by monitoring precursors of catastrophic failures in loaded granite: an experimental study of acoustic emission and electromagnetic radiation. *Sustainability*. 2024;16(3):1045. <https://doi.org/10.3390/su16031045>
15. Zhou X., Liu X., Wang X., Liu Y., Xie H., Du P. Acoustic emission characteristics of coal failure under triaxial loading and unloading disturbance. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2023;56(2):1043–1061. <https://doi.org/10.1007/s00603-022-03104-2>
16. Wang C.-L., Cao C., Li C.-F., Zhao G.-M., Lu H. Experimental investigation on synergetic prediction of granite rockburst using rock failure time and acoustic emission energy. *Journal of Central South University*. 2022;29(4):1262–1273. <https://doi.org/10.1007/s11771-022-4971-3>
17. Zhao X., Liao Z., Zhang X., Shen C., Zhu J. Experimental investigation of the precursor characteristics and early warning of coal burst based on quantitative analysis of acoustic emission signals. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2025;11(1):6. <https://doi.org/10.1007/s40948-024-00924-0>
18. Zhao S., Wang E., Wang J., Zhang Q., Li Z., Xu J. Rock burst early warning utilizing acoustic emission and electromagnetic radiation adaptive noise reduction and multi-image feature fusion: a case study. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2025;157:111312. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.111312>
19. Махмудов Х.Ф., Афанасьев П.И. Фильтрация техногенных помех при акустико-эмиссионном мониторинге. *Горная промышленность*. 2023;(S1):142–149. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-142-149>
Makhmudov K.F., Afanasev P.I. Filtering of man-induced interference during acoustic emission monitoring. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):142–149. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-142-149>
20. Jing G., Montanari P.M., Lacidogna G. Study of Time-frequency domain of acoustic emission precursors in rock failure during uniaxial compression. *Signals*. 2024;5(1):105–117. <https://doi.org/10.3390/signals5010006>
21. Kong B., Feng X., Sun X., Cao H., Zhang X., Yu S. et al. Study on macroscopic and microscopic damage and evolution of coal rock based on acoustic emission time-varying characteristics. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2025;84(2):75. <https://doi.org/10.1007/s10064-024-04036-7>
22. Wang X., Wang J., Zhou X., Liu X., Liu S. Mechanical behaviors and precursory characteristics of coal-burst in deep coal mining for safety-sustainable operations: insights from experimental analysis. *Sustainability*. 2024;16(5):2103. <https://doi.org/10.3390/su16052103>
23. Sun J., Liu D., He P., Guo L., Cao B., Zhang L., Li Z. Experimental investigation on acoustic emission precursor of rockburst based on unsupervised machine learning method. *Rock Mechanics Bulletin*. 2024;3(2):100099. <https://doi.org/10.1016/j.rockmb.2023.100099>
24. Zhai M., Xu C., Xue L., Cui Y., Dong J. Loading rate dependence of staged damage behaviors of granite under uniaxial compression: Insights from acoustic emission characteristics. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2022;122:103633. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103633>
25. Wu W., Chan C.-M., Gu Y., Su X. Study on acoustic emission characteristics and damage evolution law of shale under uniaxial compression. *Advances in Civil Engineering*. 2024;2024:3076780. <https://doi.org/10.1155/2024/3076780>
26. Wang Q., Chen W., Peng W., Wang Y., Zhou Y., Peng Z. Uniaxial compressive damage evolution and constitutive modeling of fissure-like rocks under different loading rates based on acoustic emission. *Scientific Reports*. 2025;15:2119. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86437-6>
27. Peng S., Yang Y., Xu Q., Xu J., Qin C., Nong X. Study on impact tendency and damage characteristics of rock-like materials based on acoustic and thermal responses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2024;57(12):10367–10383. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-04092-1>
28. Gaoa Q., Maa L., Liua W., Khane N.M., Alarifig S.S., Sazidh M., Inqiad W.B. Method for rock fracture prediction and early warning: Insight from fusion of multi-physics field information. *Heliyon*. 2024;10(10):e30660. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30660>
29. Hao T., Wang G., Li F., Tang Y., Yuan M. Study on the characteristics of acoustic-thermal precursors of destabilization damage in coal-rock combination bodies with different proportions. *Scientific Reports*. 2024;14:25661. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-77170-7>



30. Scholz C.H. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1968;58(1):399–415. <https://doi.org/10.1785/BSSA0580010399>
31. Wyss M. Towards a physical understanding of the earthquake frequency distribution. *Geophysical Journal International*. 1973;31(4):341–359. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1973.tb06506.x>
32. El-Isa Z.H. Frequency-Magnitude Distribution of Earthquakes. In: Svalova V. (ed.) *Earthquakes – Forecast, Prognosis and Earthquake Resistant Construction*. InTech; 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.77294>
33. Трушко В.Л., Розанов А.О., Сaitгалеев М.М., Петров Д.Н., Ильинов М.Д., Карманский Д.А., Селихов А.А. Критерии акустической эмиссии для анализа процесса разрушения горных пород и оценки формирования трещинных коллекторов на больших глубинах. *Записки Горного института*. 2024;269:848–858. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16581> (дата обращения: 28.02.2026).
Trushko V.L., Rozanov A.O., Saitgaleev M.M., Petrov D.N., Ilinov M.D., Karmanskii D.A., Selikhov A.A. Acoustic emission criteria for analyzing the process of rock destruction and evaluating the formation of fractured reservoirs at great depths. *Journal of Mining Institute*. 2024;269:848–858. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16581> (accessed: 28.02.2026).
34. Nosov V.V. Appraising the service life of dangerous engineering equipment by acoustic emission diagnosis. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2020;49(12):1072–1083. <https://doi.org/10.3103/S1052618820120110>
35. Perveitalov O.G., Nosov V.V., Borovkov A.I., Khanukhov K.M., Chetvertukhin N.V. Calculation of durability and fatigue life parameters of structural alloys using a multilevel model of acoustic emission pulse flow. *Metals*. 2023;13(1):4. <https://doi.org/10.3390/met13010004>
36. Grigoriev E.V., Palaev A.G., Golikov T.S., Nosov V.V. Quality control of hardening technologies using the acoustic emission method. *E3S Web of Conferences*. 2021;266:04004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126604004>
37. Трушко В.Л., Ильинов М.Д., Розанов А.О., Сaitгалеев М.М., Петров Д.Н., Карманский Д.А., Селихов А.А. Механизм формирования зон микротрещиноватости в образцах пород различных литологических типов при разрушении в условиях объемного напряженного состояния. *Записки Горного института*. 2026;277:136–145. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16813> (дата обращения: 28.02.2026).
Trushko V.L., Ilinov M.D., Rozanov A.O., Saitgaleev M.M., Petrov D.N., Karmanskii D.A., Selikhov A.A. Mechanism of microcrack zone formation in rock samples of various lithological types under triaxial stress state fracture conditions. *Journal of Mining Institute*. 2026;277:136–145. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16813> (accessed: 28.02.2026).

Информация об авторах

Носов Виктор Владимирович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры метрологии, приборостроения и управления качеством, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-1849-0450>; e-mail: nosovvv@list.ru

Григорьев Егор Витальевич – кандидат технических наук, ведущий инженер, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-1090-6629>

Мерзляков Виктор Георгиевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры промышленного, гражданского и подземного строительства, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-0647-259X>

Информация о статье

Поступила в редакцию: 12.05.2026

Поступила после рецензирования: 29.07.2026

Принята к публикации: 13.08.2026

Information about the authors

Viktor V. Nosov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Metrology, Instrumentation and Quality Management, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-1849-0450>

Egor V. Grigoriev – Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-1090-6629>

Viktor G. Merzlyakov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Industrial, Civil and Underground Construction, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-0647-259X>

Article info

Received: 12.05.2026

Revised: 29.07.2026

Accepted: 13.08.2026