УДК 622.831.32

ОЦЕНКА УДАРООПАСНОСТИ УЧАСТКА МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РЕГИСТРАЦИИ ЕГО СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

В.В.НОСОВ, *д-р техн. наук*, *профессор*, *nosovvv@list.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Добыча руды на глубоких удароопасных горизонтах сопряжена с необходимостью повышения безопасности труда рабочих, что требует больших затрат на проведение профилактических противоударных мероприятий, применения дорогостоящих систем защиты от горных ударов. Рассмотрена методика прогнозирования ресурса и локальной оценки удароопасности массива горных пород на основе микромеханической модели акустической эмиссии гетерогенных материалов и интерпретируемых с ее позиций экспериментальных данных по оценке сейсмоакустической активности массива рудников «Таймырский» и «Октябрьский» Норильского промышленного района.

***Ключевые слова*:** акустическая эмиссия, концентрация микротрещин, сейсмоакустическая активность, массив горных пород, ресурс, прогнозирование, горный удар.

Горные удары – это быстропротекающее разрушение предельно напряженной части массива горных пород, прилегающей к горной выработке, возникающее вследствие повышенной поврежденности и упругих деформаций вмещающих пород. Горный удар сопровождается выбросом горной породы в горную выработку, ее разрушением, сильным звуковым эффектом и возникновением мощной ударной волны, выделением энергии акустических колебаний, тепловых потоков, электромагнитного излучения, а также разгрузкой окрестностей выработки от напряжений. Наиболее интенсивно указанный процесс и сопровождающие его явления происходят в начальный период перенапряжений, вызываемых, в частности, созданием полостей в ходе технологических процессов. Прогнозирование горных ударов обеспечивает безопасность горных работ, развитие методов оценки удароопасности является актуальным.

Оценка удароопасности может быть основана на непосредственном наблюдении за физическими явлениями, которые происходят внутри массива горных пород (МГП). К таким явлениям, в частности, относятся процессы разрушения, проявляющиеся в образовании трещин с выделением энергии акустических колебаний, тепловых потоков и электромагнитных излучений. Поля упругих колебаний в скальных массивах по сравнению с электромагнитными, тепловыми, гравитационными и другими полями, имеют длину волн, соизмеримую с исследуемыми неоднородностями среды распространения. Упругие колебания в скальных породах интерпретируются как сейсмоакустические импульсы, имеют удовлетворительную дальность распределения и определяют приемлемую масштабность методов, использующих их поля.

Степень удароопасности МГП наиболее полно может характеризоваться временем, местом и энергоемкостью прогнозируемого динамического явления. Развитие сейсмоакустических методов прогнозирования горных ударов происходит в настоящее время по двум направлениям:

• на уровне регионального прогноза, при котором наиболее опасные по проявлению горных ударов районы выделяются по поверхности изолиний сейсмической активности. Размеры областей, представляющих опасность по возможному проявлению горных ударов, могут составлять десятки и сотни метров;

• на уровне локального прогноза степени удароопасности, когда оценка состояния МГП сводится к определению времени динамического явления.

Первое направление более развито, используемые же при локальном прогнозе методические разработки менее эффективны, поскольку опираются, главным образом, на статистический подход в поиске корреляций между первичными параметрами акустической эмиссии (АЭ) и параметрами удароопасности массива. В качестве первичных параметров АЭ чаще всего используют число импульсов АЭ, суммарную и максимальную амплитуды, статистические параметры амплитудных распределений, суммарную энергию импульсов, зарегистрированных при горном ударе или после динамического воздействии на массив посредством технологического взрыва, и др. [1]. Невоспроизводимость найденных корреляций создает проблемы низкой эффективности контроля. Покажем их решение на основе микромеханической модели процесса разрушения и временны́х зависимостей параметров акустической эмиссии, позволяющих прогнозировать момент разрушения [2-16].

Основой моделирования АЭ является связь информативных параметров АЭ ξ с параметрами повреждаемости материала – концентрацией образующихся микротрещин C (рис.1):

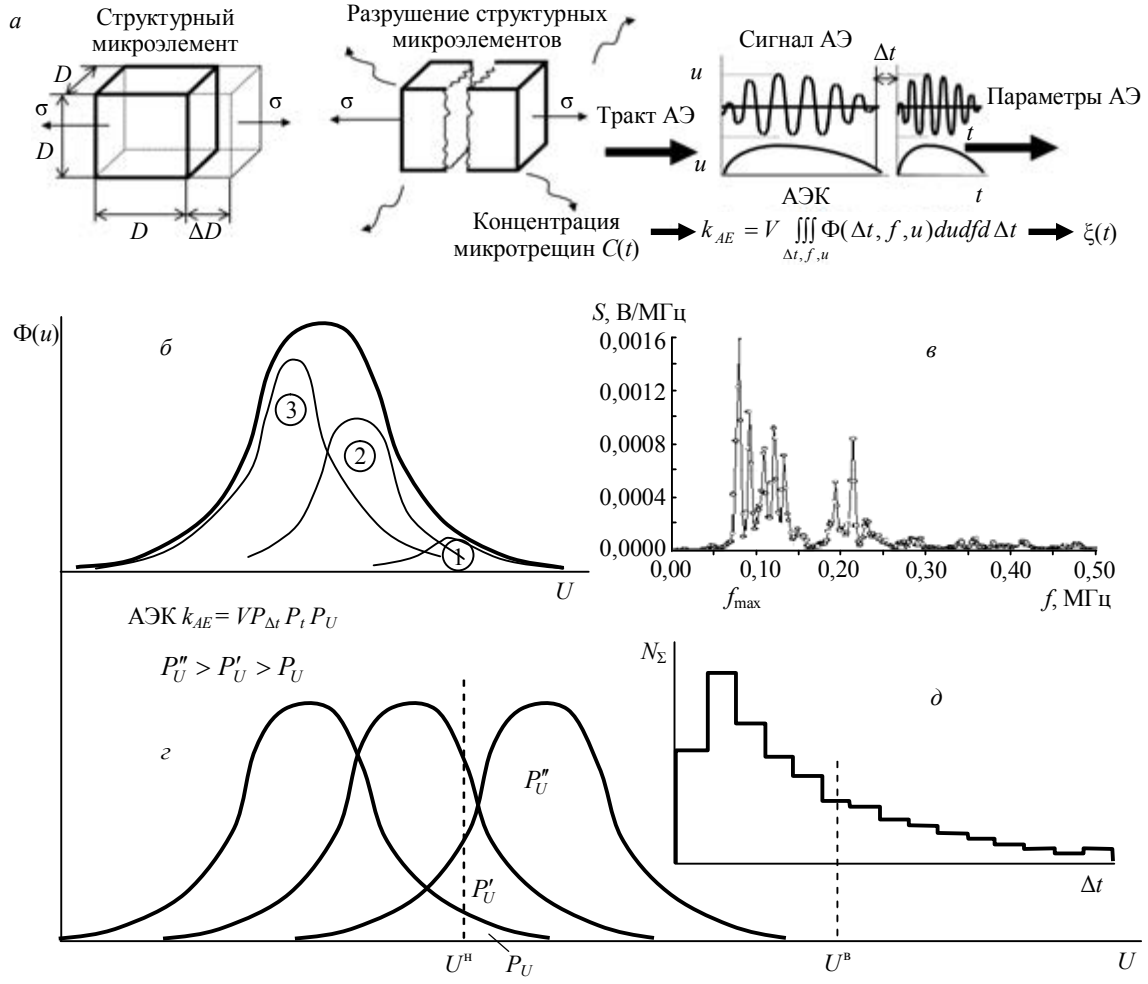


Рис.1. Модель источника АЭ и интерпретация значения, включающего в себя факторы тракта сигнала АЭ акустико-эмиссионного коэффициента: *а* – модель источника сигнала АЭ и факторы АЭ регистрации; *б* – амплитудное распределение сигналов АЭ; *в* – частотное распределение сигналов АЭ, *г* – вероятности регистрации сигналов АЭ в заданном амплитудном диапазоне; *д* – распределение сигналов АЭ по длительности пауз 1, 2, 3 – распределения от разрушения структурных элементов граничной зоны адгезионных связей композита или материала сварного шва (1), волокна композита или околошовной зоны, зоны нормализации и основного металла сварного соединения (2), матрицы композита или элементов разупрочненной зоны сварного соединения (3); P_U, P'_U, P''_U – вероятности попадания амплитуды сигнала АЭ в регистрируемый амплитудный диапазон [$U^н$; $U^в$] при равномерном, экспоненциальном (показательном) и с наличием максимума в наблюдаемом амплитудном распределении сигналов АЭ соответственно; $P_{\Delta t}$, P_f – вероятности регистрации сигналов в заданном временном и частотном диапазоне соответственно

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

где t – текущее время, k_{AE} – акустико-эмиссионный коэффициент (АЭК).

Информативными параметрами ξ могут являться любые первичные параметры АЭ – число N_Σ регистрируемых импульсов дискретной АЭ, суммарный счет N АЭ, суммарная амплитуда или комбинация этих параметров.

Его математическая модель

$$\xi(t) = k_{AE} C_0 \int_{\omega_0}^{\omega_0+\Delta\omega} \Psi(\omega)\left\{1 - \exp\left[-\int_0^t dt' / \Theta(U_0, \omega(t'))\right]\right\} d\omega ,$$

где t – текущее время; k_{AE} – имеет смысл «звучащего» объема материала,

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

V – контролируемый объем материала; $\Phi(\Delta t, f, u)$ – функция плотности распределения сигналов АЭ по длительности пауз Δt, частоте f и амплитуде u; C_0 – начальная концентрация структурных элементов; ω – параметр прочностного состояния структурного элемента материала объекта, зависящего от изменяющихся во времени растягивающих напряжений на микроэлементе $\sigma(t)$. Временна́я зависимость прочностного параметра

$$\omega(t) = \gamma\sigma(t)/(KT) ,$$

где γ – активационный объем; K – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; $\Psi(\omega)$ – функция плотности распределения параметра ω по структурным элементам контролируемого объема V материала,

$$\Psi(\omega, \mu, \sigma_3) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_3 \omega} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_3^2}(\ln(\omega) - \mu)^2\right];$$

$\Theta(U_0, \omega(t)) = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma(t))/(KT)]$ – время разрушения микроэлемента (формула Журкова), U_0 – энергия активации процесса разрушения, ω_0 и $\Delta\omega$ – нижняя граница и диапазон рассеяния значений параметра ω соответственно; σ_3, μ – параметры функции $\Psi(\omega)$.

Уравнение (1) представляет собой микромеханическую модель временных зависимостей параметров акустической эмиссии, регистрируемой на стадии мелкодисперсного разрушения любого масштабного уровня в условиях неоднородности механического состояния материала контролируемого объекта, позволяющую оценить остаточный ресурс. Соотношение входящих в формулы описания функции $\Psi(\omega)$ параметров характеризует степень неоднородности прочностного состояния материала (рис.2); параметры τ_0 и U_0 наиболее консервативны и не зависят от состояния структуры, определяются характеристиками межатомного взаимодействия структурного элемента; значения параметра $\gamma \approx 10^{-26} \div 10^{-28}$ м^3 (активационного объема) являются характеристикой наноструктуры материала, которая слабо чувствительна к его химической природе. Совместно с напряжениями σ параметры γ отражает прочностную индивидуальность структурного элемента.

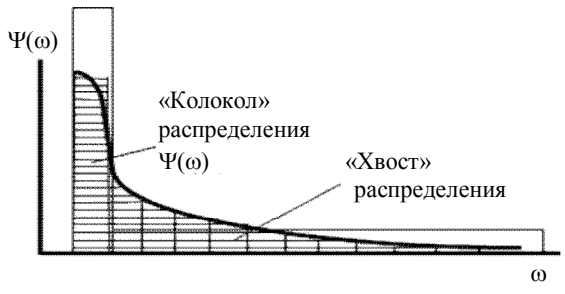


Рис.2. Моделирование прочностной неоднородности материала

Учитывая стохастический характер упругого излучения, входящему в формулу (2) интегралу можно придать смысл вероятности регистрации, т.е. вероятности попадания

параметров упругих волн, пришедших от источника АЭ, в диапазон регистрируемых измерительной аппаратурой частот f, амплитуд u сигналов АЭ и временны́х интервалов Δt между ними. Вид и поведение определяющих функцию $\Phi(\Delta t, f, u)$ распределений длительности пауз между сигналами, амплитудных распределений, распределение сигналов по частоте, изображены на рис.1.

Наиболее динамично во время АЭ-испытаний ведет себя амплитудное распределение $\Phi(u)$. Его вид связан с распределением размеров разрывов сплошности (разрушенных структурных элементов) гетерогенных материалов, типом дефекта и степенью его опасности, скоростью нагружения, напряжениями на структурных элементах в момент разрушения и порогами дискриминации аппаратуры, а также с метрологическими аспектами АЭ-наблюдений. Последние связаны с чувствительностью АЭ-измерений, которая, в свою очередь, зависит от соотношения величин энергии или амплитуды упругой волны и порога дискриминации регистрирующей аппаратуры. Согласно гипотезе о нормальном распределении сигналов по амплитуде (центральной предельной теореме и физическим предпосылкам) очевидна связь доли регистрируемых сигналов АЭ, прошедших временну́ю, частотную и амплитудную фильтрацию, и вида наблюдаемого амплитудного распределения. Искажение этого вида при фиксированном пороге дискриминации аппаратуры может быть связано только с изменением энергоемкости упругого излучения и использовано при обнаружении напряженных объемов.

Высвобождающаяся при образовании микротрещины потенциальная энергия $E_{\text{у}}$ упругой деформации структурного элемента зависит от его размера D и напряжений σ^* на нем в момент разрушения (см. рис.1, *а*):

$$E_{\text{у}} = \sigma^{*2} D^3/(2E) \sim u^2,$$

где E – модуль упругости материала элемента. Это соотношение учитывает зависимость $E_{\text{у}}$ от размеров и скорости напряжений σ в момент нагружения, поскольку предел прочности

$$\sigma^* = \{U_0 + KT\ln\sigma - KT\ln[KT/(\gamma\tau_0)]\}/\gamma.$$

Часть энергии $E_{\text{у}}$ переходит в энергию упругой волны, которая, по мере приближения к поверхности материала, затухает в зависимости от частоты f волны, коэффициента ее затухания и расстояния, пройденного до места регистрации АЭ. Из всей совокупности испускаемых из материала упругих волн с энергией E_c акустико-эмиссионной аппаратурой регистрируется только часть волн, попадающих в некоторый амплитудный диапазон, ограниченный верхним ($U^{\text{в}}$) и нижним ($U^{\text{н}}$) уровнями дискриминации измерительной аппаратуры. Разнообразие дефектов, неоднородность структуры и напряженного состояния гетерогенных материалов, выражающаяся в вариации значений D, σ^* и σ, приводит к разбросу значений амплитуд сигналов АЭ. Это в совокупности со случайностью процесса разрушения является причиной вариации значений вероятности P_U попадания амплитуды сигнала АЭ в регистрируемый амплитудный диапазон $[U^{\text{н}}; U^{\text{в}}]$ (рис.1, *б*, *г*):

$$P_U = \int_{U^{\text{н}}}^{U^{\text{в}}} \Phi(u)du \ .$$

Вариация P_U, а значит и АЭК, становится существенной в условиях дефицита сигналов даже при стабильных скорости нагружения, порогах дискриминации аппаратуры, коэффициентах усиления и затухания сигнала АЭ. Данная ситуация часто наблюдается при промышленном АЭ-контроле с существенно завышенным (с целью устранения помех) нижним порогом регистрации $U^{\text{н}}$ или при диагностировании объектов, работающих с большим запасом прочности. Нестабильность АЭК в момент проведения АЭ-измерений нарушает подобие процессов разрушения и упругого излучения, а неопределенность значения АЭК

приводит к погрешностям оценки параметров трещинообразования и понижению точности оценки прочности. Это обстоятельство необходимо учитывать при обработке первичной АЭ-информации.

Модель позволяет формулировать соответствующие микро- и наноуровням энергетические, структурные и временные характеристики прочности, предложить ряд информативных диагностических концентрационно-кинетических АЭ-показателей прочностного состояния (табл.1), лежащих в основе формулировки диагностических признаков состояния, алгоритмов оценки трещиностойкости и ресурса, устойчивых к влиянию дестабилизирующих факторов.

Таблица 1

Некоторые АЭ-показатели прочностного состояния технических объектов, устойчивые к влиянию дестабилизирующих факторов

АЭ-показатель	Микромодель	Наномодель	Свойство
X_{AE}	$d\ln\xi/dt$	$\gamma\dot{\sigma}/KT$	Наностуктура
Y_{AE}	$d\ln\xi/d\sigma$	γ/KT	»
Z_{AE}	$\ln\xi$-$\ln A_D$	$\omega=\gamma\sigma/KT$	Опасность разрушения
ΔZ_{AE}	$\ln\xi_1$-$\ln\xi_2$	$\omega_1-\omega_2$	Относительная опасность разрушения
F_{AE}	$\ln\xi_1/\ln\xi_2$	σ_1/σ_2	Относительная нагруженность
W_{AE}	$d\ln\xi/dK_{\text{н}}$	$\omega=\gamma\sigma/KT$	Опасность разрушения

Примечание. $A_D=k_{AE}C_0/\{\tau_0\exp[(U_0-\gamma\sigma(t))/(KT)]\}$; $K_{\text{н}}$ – коэффициент нагрузки (отношение диагностической нагрузки к рабочей).

Время до разрушения при постоянной нагрузке (σ = const)

$$t^*\approx 10^{-15}\exp(U_0/KT-Y_{AE}\sigma)=\exp(M-Y_{AE}\sigma)=B/\exp W_{AE},$$

где $M\approx U_0/(KT)-34;\ \ B=\exp M.$

Предел прочности

$$\sigma_B\approx M/Y_{AE}.$$

Число циклов до разрушения

$$N_c=N_B/\exp W_{AE},$$

где $N_{\text{в}}$ – характеристический параметр материала, температуры и частоты его нагружения, определяемый по кривой усталости образцов данного материала.

Рассмотрим результаты регистрации АЭ участка горного массива после проведения в массиве технологического взрыва с целью обрушения добываемой горной породы. Для регистрации акустической активности использовалась аппаратура «Гроза-4» и «Гроза-16», представляющая собой четырехканальный приемник акустических сигналов в полосе усиливаемых частот канала усиления 0,1-40,0 кГц с коэффициентом усиления 30-70 дБ. Аппаратура «Гроза-4» состоит из блока опроса (БО), блока усиления и счета (БУС), блока сопряжения с массивом (БСМ) и блока декодирования (БД) с цифропечатающим устройством. Аппаратура позволяет подсчитать за установленные промежутки времени по каждому из четырех каналов число сейсмоакустических импульсов, превышающих заданный уровень дискриминации. В аппаратуре предусмотрена возможность изменения амплитудного и частотного диапазонов регистрации сигналов АЭ. В условиях акустических помех применялось сужение полосы пропускания и понижения чувствительности аппаратуры для исключения срабатывания счетчиков от помех. Аппаратура позволяла регистрировать

импульсы акустической эмиссии в автоматическом режиме с отображением информации на цифропечатающем устройстве и цифровом табло, а также прослушивать через головные телефоны и производить запись аналоговых сигналов. Для регистрации акустической активности в аппаратуре использовался пьезоакселерометр АС-31 с частотной характеристикой 0,2-20 кГц. Датчики устанавливались в скважины, выбуренные в различных точках массива. С целью уменьшения влияния промышленных помех в условиях рудника «Таймырский» применялся фильтр низких частот с частотой среза 300 Гц и подавлением 45 дБ на октаву.

При изучении характера изменения акустической активности массива были охвачены наиболее характерные горно-геологические и горно-технические ситуации рудников «Октябрьский» и «Таймырский» Норильского горно-металлургического комбината. Для более детального изучения АЭ массива была установлена минимальная длительность интервала времени счета – минутная. Сравнивался характер изменения акустической активности массива на участках с различным уровнем напряжений при взрыве различного количества взрывчатых веществ, при ведении взрывных работ по проходке горных выработок, по ведению очистной выемки.

В результате исследований установлено, что при отсутствии непосредственного воздействия на массив регистрируемая сейсмоакустическая активность не имеет систематической изменчивости, среднее количество $N'_{p\Sigma}$, зарегистрированных за одинаковые промежутки времени сигналов АЭ, существенно не изменялось (рис.3). Общее количество N_Σ сигналов, регистрируемых за время t, изменялось пропорционально времени:

$$N_\Sigma(t) = N'_{p\Sigma}\, t. \qquad (3)$$

Произведенный в массиве технологический взрыв вызывает импульсное возрастание сейсмоакустической активности (СА). Вызванная взрывом СА массива в первый момент времени (1-2 мин) достигала максимального значения, а далее происходил ее спад. В большинстве случаев регистрируемое за единицу времени количество N'_Σ сигналов АЭ изменялось по экспоненциальному закону (рис.3, кривая 2):

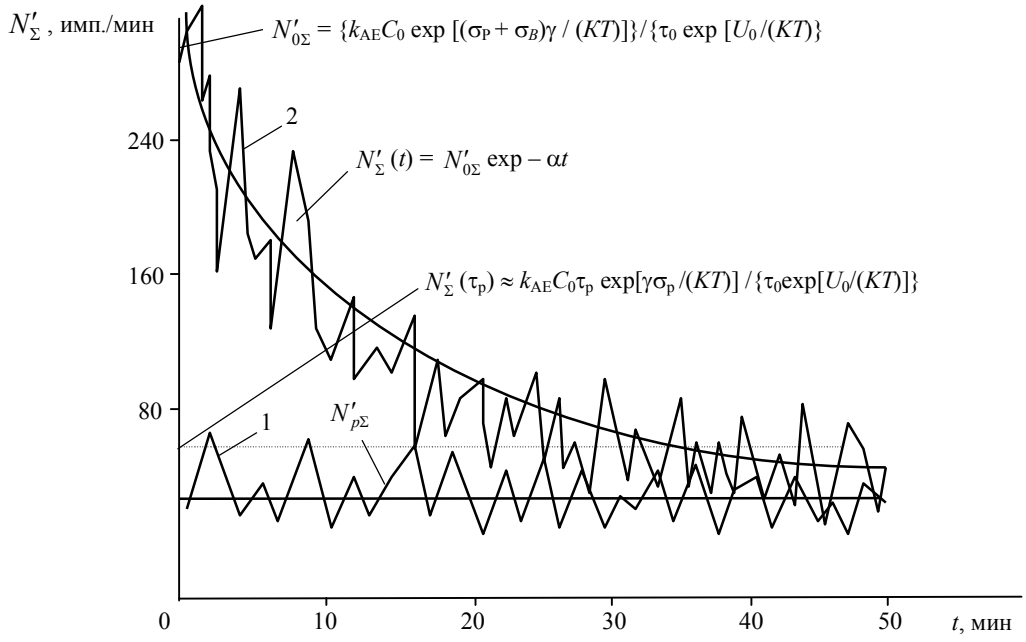


Рис.3. Графики изменения СА массива, находящегося в равновесном состоянии (1), и СА, вызванной взрывом (2)

$$N'_{\Sigma}(t) = N'_{0\Sigma} \exp(-\alpha t), \quad (4)$$

где $N'_{0\Sigma}$ – сейсмоакустическая активность в начальный момент времени ее спада, α – показатель скорости спада СА. Величина коэффициента корреляции между действительными и рассчитанными по уравнению (4) значениями N'_{Σ} для различных случаев регистрации попадали в диапазон 0,8-0,98.

Временная зависимость общего количества N_{Σ} сигналов АЭ, зарегистрированных после взрыва, имела вид

$$N_{\Sigma}(t) = N'_{0\Sigma}[1 - \exp(-\alpha t)]/\alpha. \quad (5)$$

Согласно рассмотренной микромеханической модели (1) разрушения временная зависимость концентрации микротрещин и пропорционального ей числа $N_{\Sigma}(t)$ регистрируемых при нагружении импульсов АЭ при однородном разрушении описывается следующим образом:

• при нагружении постоянной нагрузкой ($\dot{\sigma} = 0$, $\sigma = \text{const}$) число импульсов АЭ

$$N_{\Sigma}(t) = k_{AE} C_0 t \exp\omega / \{\tau_0 \exp[U_0/(KT)]\}; \quad (6)$$

активность АЭ

$$N'_{\Sigma}(t) = k_{AE} C_0 \exp\omega / \{\tau_0 \exp[U_0/(KT)]\}; \quad (7)$$

• при равномерном разгружении с постоянной скоростью $\dot{\sigma}$ снижения напряжений ($\sigma = \sigma_O - \dot{\sigma} t$), число импульсов АЭ

$$N_{\Sigma}(t) = k_{AE} C_0 KT \exp[(\gamma\sigma_0 - U_0)/(KT)]\{1 - \exp[-\gamma\dot{\sigma} t/(KT)]\}/(\tau_0 \gamma \dot{\sigma}); \quad (8)$$

активность АЭ

$$N'_{\Sigma}(t) = k_{AE} C_0 \exp\{[\gamma(\sigma_O - \dot{\sigma} t) - U_0]/(KT)\}/\tau_0. \quad (9)$$

Сравнивая (3) и (6), (4) и (9), (5) и (8), можно записать

$$N'_{p\Sigma} = k_{AE} C_0/\theta_P, \quad (10)$$

$$N'_{0\Sigma}/\alpha = k_{AE} C_0 KT/(\dot{\sigma}\gamma\theta_0), \quad (11)$$

$$\alpha = \gamma\dot{\sigma}/(KT), \quad (12)$$

$$N'_{0\Sigma} = k_{AE} C_0/\theta_0, \quad (13)$$

где $N'_{p\Sigma}$ – сейсмоакустическая активность в конечный момент времени ее спада; $\theta_p = \tau_0 \exp[U_0 - \gamma\sigma_p/(KT)]$ – время до разрушения структурного элемента массива, находящегося в равновесном состоянии; θ_0 – то же после взрыва; $\dot{\sigma}$ – средняя скорость спада напряжений в призабойной области МГП после взрыва.

Возникающие в первый момент времени после взрыва в призабойной области участка массива средние напряжения σ_0 можно представить как сумму среднего напряжения σ_P массива, находящегося в равновесном состоянии, и перенапряжения $\sigma_в$, вызванного взрывом. Тогда из (12) и (13) получим

$$\alpha = (\sigma_0 - \sigma_p)\gamma/(\tau_p KT), \quad (14)$$

где τ_p – время спада напряжений и сейсмоакустической активности после взрыва до минимального уровня.

Таким образом,

$$N'_{0\Sigma} = \{k_{AE} C_0 \exp[(\sigma_p + \sigma_в)\gamma/(KT)]\}/\{\tau_0 \exp[U_0/(KT)\}. \quad (15)$$

Суммарное количество импульсов СА, выделившихся из массива на этапе спада напряжений за время τ_p,

$$N_\Sigma(\tau_p) \approx k_{AE} C_0 \tau_p \exp[\gamma\sigma_p/(KT)]/\{\tau_0 \exp[U_0/(KT)]\}. \quad (16)$$

Из последних выражений следует, что показатель α скорости спада сейсмоакустической активности, величина $N'_{0\Sigma}$ максимального ее всплеска и суммарная АЭ $N_\Sigma(\tau_p)$, выделившаяся за время спада напряжений, связаны с уровнем напряжений σ_P на контролируемом участке массива, что может быть использовано для оценки напряженного состояния.

Для проверки справедливости данного вывода параллельно с регистрацией сигналов АЭ некоторых участков массива производилась оценка их напряженного состояния методом полной разгрузки (разделения керна на диски), который в настоящее время используется как базовый для прогноза степени удароопасности горного массива. В качестве показателя напряженного состояния принималось отношение максимального радиального напряжения σ к пределу прочности породы $[\sigma]$ участка при одноосном сжатии, определяемое по диаметру и толщине дисков, на которые делился выбуриваемый из массива керн. Оценка напряженного состояния участков массива при этом производилась по диаметру d и толщине b дисков, на которые был разделен керн, выбуренный из ориентированной перпендикулярно действию максимальных тангенциальных напряжений скважины. В качестве показателя напряженного состояния принималось отношение максимального радиального напряжения к пределу прочности породы участка при одноосном сжатии, определяемое по формуле

$$\sigma/[\sigma] = (\sqrt{d/b} - 0{,}54 - 0{,}1\sqrt{d})/(0{,}78 + 0{,}165\sqrt{d}).$$

На рис.4 приведены данные, иллюстрирующие изменения параметров $N'_{0\Sigma}$, α и $N_\Sigma(\tau_p)$ в зависимости от уровня напряжений в зоне проходки. Проходка выработки осуществлялась последовательно на интервале 0-20 м в пределах подработанной защищенной зоны со значениями $\sigma/[\sigma] = 0{,}6 \div 0{,}8$, на интервале 20-35 м в частично защищенной зоне со значениями $\sigma/[\sigma] = 0{,}8 \div 1{,}2$, на интервале 35-60 м в зоне повышенного опорного давления при $\sigma/[\sigma] = 1{,}2 \div 1{,}45$. Как видно из рис.4, характер зависимости параметров АЭ от напряжений в массиве соответствует сформулированной выражениями (14)-(16) связи.

Для массива, находящегося в квазистатическом напряженном состоянии, когда средние напряжения σ_p в нем постоянны, время τ^* до разрушения определяется из условия достижения концентрацией C трещин критической величины C^*:

$$\tau^* = 0{,}01\tau_0 \exp[U_0 - \gamma\sigma_p/(KT)]. \quad (17)$$

Значения входящих в правую часть уравнения (17) величин τ_0, U_0, K, T, как правило, известны или могут быть определены перед испытаниями. Поэтому оценка степени удароопасности участка массива горных пород может быть сведена к оценке только величины АЭ-показателя $Z_{AE} = \omega_p = \gamma\sigma_p/(KT)$:

$$Z_{AE} = \ln N'_{p\Sigma} - \ln A_D,$$

где значение $A_D = k_{AE} C_0/\{\tau_0 \exp[U_0/(KT)]\}$ априори неизвестно и может быть рассчитано по формуле

$$\ln A_D = [\ln N'_{p\Sigma} - (\sigma_p/\sigma_0)\ln N'_{o\Sigma}]/[1-(\sigma p/\sigma o)]. \quad (18)$$

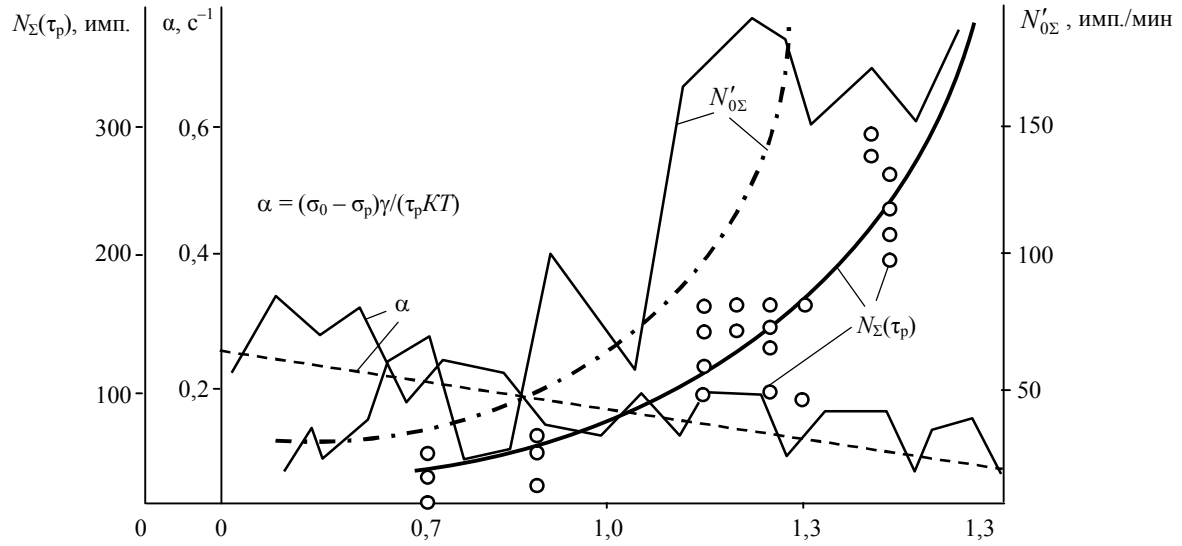


Рис.4. Взаимосвязь напряженного состояния массива с величиной $N'_{0\Sigma}$ максимального всплеска активности, показателем α скорости ее спада и суммарной эмиссией $N_\Sigma(\tau_p)$

Максимальные напряжения σ_0, возникающие в окрестности вновь образованной полости после взрыва, близки к пределу прочности породы. Поэтому входящее в уравнение (18) отношение σ_p/σ_0 можно оценить параметром $\sigma/[\sigma]$ метода разделения керна на диски.

Следует отметить, что согласно используемым физическим представлениям о разрушении действующие в массиве растягивающие напряжения не могут быть выше предела кратковременной прочности, и в отличие от параметра $\sigma/[\sigma]$, всегда $\sigma_p/\sigma_0 < 1$. Учитывая, что $\sigma/[\sigma] < 2$, условно принималось $\sigma_p/\sigma_0 = 0{,}5\sigma/[\sigma]$.

Обработка экспериментальных данных показала, что значения A_D существенно зависят от условий АЭ-измерений. Так, изменение канала регистрации АЭ могло привести к 5-кратному изменению значения A_D. Рассчитанное по четырем каналам среднее значение A_D для защищенной зоны шахты № 1 рудника «Таймырский» равнялось 1,67, для частично защищенной зоны $A_D = 0{,}54$, для зоны повышенного опорного давления $A_D = 0{,}435$. Различие значений A_D может быть связано с различным расстоянием контролируемых зон до датчиков и различием значений коэффициента k_{AE}. Изменение количества используемого взрывчатого вещества существенного влияния на величину A_D не оказывало из-за незначительного изменения объема контролируемого участка МГП. Так, влияние количества m используемого взрывчатого вещества на изменения параметра A_D и площадь S вновь образованной после взрыва полости в зоне повышенного опорного давления характеризуют следующие данные:

m, кг	66	67	105	105	105
$\ln A_D$	–1,097	–0,413	–0,471	–2,363	–0,763
S, м^2	30	32	35	30	32

В качестве АЭ-показателя напряженного состояния участка массива горных пород принята величина (табл.1-3)

$$F_{AE} = \ln N'_{p\Sigma} / \ln N'_{0\Sigma} \approx \sigma_p/\sigma_0 \approx 0{,}5\sigma/[\sigma],$$

где $N'_{p\Sigma}$ – сейсмоакустическая активность в конечный момент времени ее спада, а ударо-опасной следует считать обстановку при $F_{AE} > 0{,}5$ (рис.5).

Таблица 2

Значения показателя напряженного состояния F_{AE} МГП в зонах двух шахт с различным уровнем напряжений

Шахта	Защищенная зона	Частично защищенная зона	Зона повышенного опорного давления
1	0,346 0,262-0,391	0,373 0,344-0,403	0,565 0,5-0,661
2	0,401 0,371-0,432	–	0,576 0,5150,64

Примечание. В числителе – среднее значение; в знаменателе – диапазон.

Таблица 3

Параметры сейсмоакустической активности, зарегистрированной по различным каналам в зонах с различным уровнем напряжений

Номер канала	Защищенная зона				Частично защищенная зона				Зона повышенного опорного давления			
	$\tau_{р,\ мин}$	$\ln N'_p$	$\ln N'_0$	F_{AE}	$\tau_{р,\ мин}$	$\ln N'_p$	$\ln N'_0$	F_{AE}	$\tau_{р,\ мин}$	$\ln N'_p$	$\ln N'_0$	F_{AE}
1	8	0,75	3,4	0,22	24	2,05	5,2	0,39	12	3,15	4,95	0,64
2	8	1,1	4,05	0,27	24	1,85	4,9	0,38	12	2,65	4,0	0,66
3	–	–	–	–	24	1,4	3,95	0,35	12	1,55	2,95	0,53
4	8	1,1	4,05	0,27	24	2,25	5,6	0,4	12	3,15	4,95	0,64

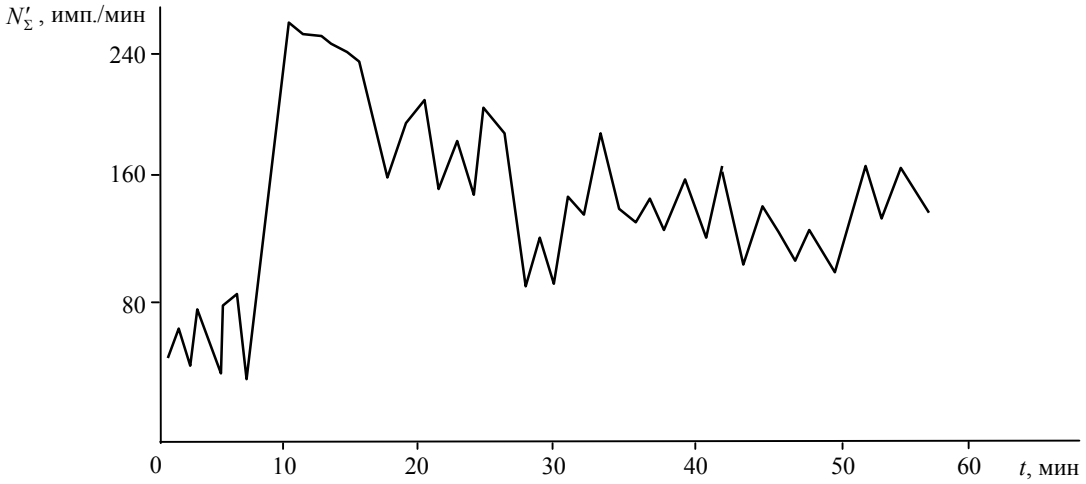


Рис.5. Результаты регистрации вызванной СА при прохождении удароопасного участка МГП

Параметр долговечности призабойной зоны при взрыве

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

где $\Delta K = \sigma_0 /[\sigma] - \sigma_p /[\sigma] \approx [1 - 2F_{AE}]$ – изменение коэффициента нагрузки.

Критическое значение $[W_{AE}]$ определяется из условия разрушения горной породы за время взрывного воздействия $\theta_{взр} \approx 0,1 \div 1$ с:

$$[W_{AE}] = \ln(\tau_0 / \Theta_{взр}) + U_0/(KT),$$

по предварительной оценке $[W_{AE}] \approx 20 \div 30$.

Таблица 4

Результаты регистрации СА массива горных пород после взрыва № 197

Время, мин	Активность N'_Σ, имп./мин по каналам			
	1	2	3	4
0	62	29	5	30
1	13	8	0	6
2	9	5	2	4
3	5	3	3	4
4	23	15	7	15
5	9	6	2	7
6	8	6	2	6
7	10	8	4	8
8	13	11	6	12
9	7	3	1	3
10	11	11	1	9
11	6	5	7	4
12	6	4	1	4
13	8	6	0	5
14	3	2	1	3
15	2	3	0	3
16	2	0	0	0
17	1	0	0	0

Пример оценки состояния участка МГП. Рассмотрим результаты регистрации сейсмоакустической активности горного массива после взрыва № 197 (рудник «Таймырский» Норильского ГМК, табл.4, рис.6)

Шахта ВРШ № 12-6-7. Взрыв № 197 от 20.02.1987, масса взрывчатого вещества 57 кг, площадь вновь образованной поверхности 30 м^2, защищенная зона.

Расчет проведем по первому каналу, так как там было зарегистрировано максимальное число импульсов.

Временна́я зависимость сейсмоакустической активности может быть аппроксимирована экспоненциальной функцией (4):

$$N'_\Sigma(t) = 23{,}71\mathrm{e}^{-0{,}1419t}.$$

Таким образом, сейсмоакустическая активность в начальный момент времени ее спада $N'_{0\Sigma} = 23{,}71$ мин$^{-1}$ коэффициент α = 0,1419, сейсмоакустическая активность в конечный момент времени ее спада

$$N'_{p\Sigma} = N'_\Sigma(17) = 23{,}71\mathrm{e}^{-0{,}1419\cdot 17},$$

акустико-эмиссионный показатель напряженного состояния участка массива горных пород

$$F_{AE} = \frac{\ln N'_{p\Sigma}}{\ln N'_{0\Sigma}} = \frac{\ln(2{,}12)}{\ln(23{,}71)} = 0{,}24.$$

Значение параметра долговечности призабойной зоны при взрыве

$$W_{\mathrm{AE}} = \ln(N'_{0\Sigma}/N'_{p\Sigma})/\Delta K = \ln(23{,}71/2{,}12)/[1\text{-}2\ln(2{,}12)/\ln(23{,}71)] = 4{,}64 < [W_{\mathrm{AE}}],$$

где $\Delta K = \sigma_0/[\sigma] - \sigma_p/[\sigma] \approx [1 - 2F_{\mathrm{AE}}]$ – изменение коэффициента нагрузки за время релаксации напряжений после взрыва.

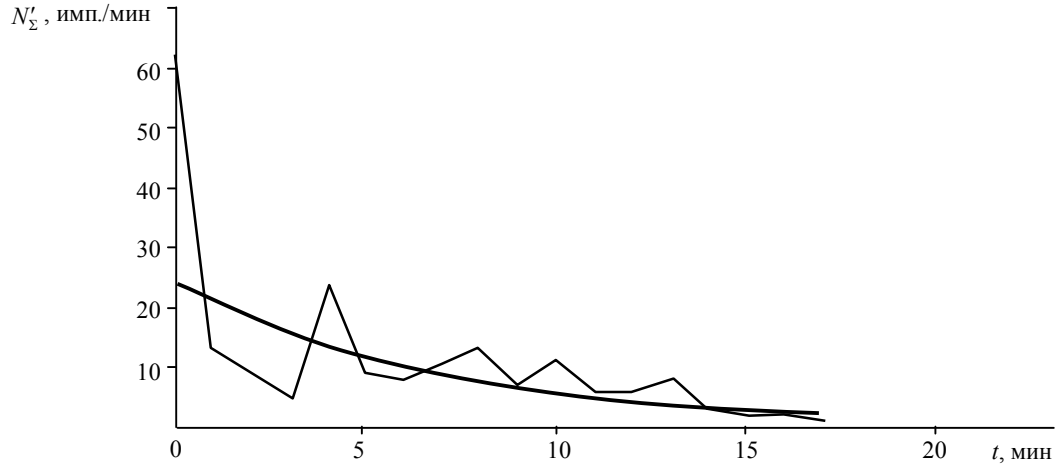


Рис.6. Временная зависимость сейсмоакустической активности после взрыва № 197

Поскольку $F_{AE} < 0,5$, $W_{AE} < [W_{AE}]$, то обстановка не является удароопасной.

Для защищенной зоны по диаметру и толщине дисков, на которые делился выбуриваемый из массива керн, получены значения отношения максимального радиального напряжения к пределу прочности участка $\sigma/[\sigma] = 0,6 \div 0,8$.

Отношение среднего напряжения σ_p массива, находящегося в равновесном состоянии, к среднему напряжению σ_0, возникающему в призабойной области в первый момент времени после взрыва, можно условно принять в виде

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_0} = 0,5\frac{\sigma}{[\sigma]} = 0,5 \cdot 0,7 = 0,35.$$

Тогда

$$A_D = \exp\left(\frac{\ln N'_{p\Sigma} - \frac{\sigma_p}{\sigma_0}\ln N'_{0\Sigma}}{1 - \frac{\sigma_p}{\sigma_0}}\right) = \exp\left(\frac{\ln 2,12 - 0,35 \cdot \ln 23,71}{1 - 0,35}\right) = 0,578;$$

$$Z_{AE} = \ln N'_{p\Sigma} - \ln A_D = \ln 2,12 - \ln 0,578 = 1,3 .$$

что меньше критического значения $[W_{AE}] \approx 20 \div 30$.

Выводы

Таким образом, показана эффективность применения микромеханической модели временны́х зависимостей параметров акустической эмиссии для решения задач локального прогноза удароопасности, интерпретации результатов регистрации сейсмоакустической активности горного массива, физически обоснованного подхода к подбору информативных диагностических параметров, связанных со временем до разрушения объекта контроля и характеризующих степень удароопасности массива. Подход к обработке акустико-эмиссионной информации создает предпосылки для детализации исследований влияния различных технологических и эксплуатационных факторов на производительность и безопасность горных работ, повышает точность оценки удароопасности, развивает представления о происходящих в массиве процессах. Принципы, заложенные в основу создания подхода, имеют универсальное методологическое значение и могут быть положены в основу оптимизации технологий акустико-эмиссионного контроля разнообразных технических объектов различных областей промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кривошеев И.А.* Статистический метод обработки сигналов акустической эмиссии в горном массиве / И.А.Кривошеев, Г.А.Иванов // Дефектоскопия. 2002. № 2. С.62-65.

2. *Носов В.В.* Диагностика машин и оборудования: Учеб. пособие. 2-е изд. испр. и доп. СПб: Лань, 2012. 384 с.

3. *Носов В.В.* Механика композиционных материалов. Лабораторные работы и практические занятия. Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. СПб: Лань, 2013. 240 с.

4. *Носов В.В.* Оценка механического состояния массива горных пород по результатам регистрации сейсмоакустической активности, вызванной взрывом // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1995, № 2. С.3-10.

5. *Носов В.В.* Оценка геомеханического состояния шахты рудника «Октябрьский» Норильского промышленного района / В.В.Носов, А.И.Потапов // Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения: Тр. 11-й междунар. науч.-практ. конф. 11-12 апреля 2013 г. / Воркутинский горный институт (филиал), Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». Воркута, 2013. С.310-314.

6. *Nosov V.V.* Assessment of the mechanical state of a rock mass from the recording of blast-induced seismoacoustic activity // Journal of Mining Science. 1995. Vol.31, Is.2, p.79-86.

7. *Nosov V.V.* Developing Algorithms for Estimating Strength on the Base of Imitating Structural Model of Acoustic Emission.I. Effect of Instability of Acoustic-Emission Coefficient / V.V.Nosov, Yu.V.Kotov // Russian Journal of Nondestructive Testing, 2001, Vol.37. № 9, p.644-649.

8. *Nosov V.V.* A Micromechanical Model of Acoustic Emission of Heterogeneous Materials / V.V.Nosov, I.N.Burakov // Russian Journal of Nondestructive Testing, 2004. Vol.40. № 2, p.113-119.

9. *Nosov V.V.* Use of Amplitude Distribution Parametersof Acoustic Emission Signals for Assessing the Strength of Structural Materials / V.V.Nosov, I.N.Burakov // Russian Journal of Nondestructive Testing, 2004. Vol.40. № 3, p.157-162.

10 *Nosov V.V.* Estimation of the Strength and Lifetime of Technical Objects Using the Acoustic-Emission Method / V.V.Nosov, A.I.Potapov, I.N.Burakov // Russian Journal of Nondestructive Testing, 2009, Vol.45. № 2, p.109-117.

11. *Nosov V.V.* Estimation of the Strength and Lifetime of Welded Constructions Using the Acoustic-Emission Method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2009. Vol.45, № 2, p.118-124.

12. *Nosov V.V.* The Effect of Strength State Nonuniformity on the Acoustic Emission of Structural Materials / V.V.Nosov, G.S.Eltchaninov // Russian Journal of Nondestructive Testing, 2011, Vol.47, № 12, p.824-833

13. *Nosov V.V.* Estimating the Residual Life of Plastically Deformed Welded Joints using Simulation of Their Acoustic Emission / V.V.Nosov, E.N.Lachova // Russian Journal of Nondestructive Testing, 2012. Vol.48. № 2, p.75-84.

14. *Nosov V.V.* Nondestructive Testing of the Quality of Blanks for the Fabrication of Hot-Rolled Strips Using the Acoustic-Emission Method / V.V.Nosov, V.G.Lavrin // Russian Journal of Nondestructive Testing, 2012. Vol.48, № 3, p.159-165.

15. *Nosov V.V.* Automated Evaluation of the Service Lives of Specimens of Structural Materials on the Basis of a Micromechanical Model of the Time Dependences of Acoustic Emission Parameters//Russian Journal of Nondestructive Testing, 2014. Vol.50, № 12, p.719-729.

16. *Nosov V.V.* Acoustic Emission Testing of the Strength of Metal Structures under Complex Loading / V.V.Nosov, A.I.Potapov // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. Vol.51. № 1, p.50-58.

REFERENCES

1. *Krivocheev I.A.*, *Ivanov G.A.* Statisticheskij metod obrabotki signalov akusticheskoj jemissii v gornom massive (*A statistical method of acoustic emission signals processing in the mountain range*). Defektoskopija. N 2, 2002, p.62-65.

2. *Nosov V.V.* Diagnostika mashin i oborudovanija (*Machines and equipment diagnostics*). St Petersburg, Lan', 2012, p.384.

3. *Nosov V.V.* Mehanika kompozicionnyh materialov (*Composite materials mechanics*). St Petersburg, Lan', 2013, p.240.

4. *Nosov V.V.* Ocenka mehanicheskogo sostojanija massiva gornyh porod po rezul'tatam registracii sejsmoakusticheskoj aktivnosti, vyzvannoj vzryvom (*Mechanical evaluation of a rock mass area condition as a result of blow-triggered seismic-acoustic activity registration*). Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh. 1995, N 2, p.3-10.

5. *Nosov V.V.*, *Potapov A.I.* Ocenka geomehanicheskogo sostojanija shahty rudnika «Oktjabr'skij» Noril'skogo promyshlennogo rajona (G*eomechanical assessment of the coal mine «Oktyabrskiy» condition in Norilsk region*). Osvoenie mineral'nyh resursov Severa: problemy i reshenija: Tr. 11-j mezhdunar. nauch.-prakt. konf. 11-12 aprelja. Vorkutinskij gornyj institut (filial), Nacional'nyj mineral'no-syr'evoj universitet «Gornyj». Vorkuta, 2013, p.310-3145.

6. *Nosov V.V.* Assessment of the mechanical state of a rock mass from the recording of blast-induced seismoacoustic activity.Journal of Mining Science. 1995. Vol.31, Is.2, p.79-86.

7. *Nosov V.V.*, *Kotov Yu.V.* Developing Algorithms for Estimating Strength on the Base of Imitating Structural Model of Acoustic Emission.I. Effect of Instability of Acoustic-Emission Coefficient. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2001, Vol.37. N.9, p.644-649.

8. *Nosov V.V.*, *Burakov I.N.* A Micromechanical Model of Acoustic Emission of Heterogeneous Materials. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2004. Vol.40. N 2, p.113-119.

9. *Nosov V.V.*, *Burakov I.N.* Use of Amplitude Distribution Parametersof Acoustic Emission Signals for Assessing the Strength of Structural Materials. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2004. Vol.40. N 3, p.157-162.

10 *Nosov V.V.*, *Potapov A.I.*, *Burakov I.N.* Estimation of the Strength and Lifetime of Technical Objects Using the Acoustic-Emission Method. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2009, Vol.45. N 2, p.109-117.

11. *Nosov V.V.* Estimation of the Strength and Lifetime of Welded Constructions Using the Acoustic-Emission Method. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2009. Vol.45, N 2, p.118-124.

12. *Nosov V.V.*, *Eltchaninov G.S.* The Effect of Strength State Nonuniformity on the Acoustic Emission of Structural Materials. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2011, Vol.47, N 12, p.824-833

13. *Nosov V.V.*, *Lachova E.N.* Estimating the Residual Life of Plastically Deformed Welded Joints using Simulation of Their Acoustic Emission. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2012. Vol.48. N 2, p.75-84.

14. *Nosov V.V.*, *Lavrin V.G.* Nondestructive Testing of the Quality of Blanks for the Fabrication of Hot-Rolled Strips Using the Acoustic-Emission Method. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2012. Vol.48, N 3, p.159-165.

15. *Nosov V.V.* Automated Evaluation of the Service Lives of Specimens of Structural Materials on the Basis of a Micromechanical Model of the Time Dependences of Acoustic Emission Parameters. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2014. Vol.50, N 12, p.719-729.

16. *Nosov V.V.*, *Potapov A.I.* Acoustic Emission Testing of the Strength of Metal Structures under Complex Loading. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. Vol.51. N 1, p.50-58.

BUMP HAZARD EVALUATION OF A ROCK MASS AREA AS A RESULT OF ITS SEISMIC ACOUSTIC ACTIVITY REGISTRATION

V.V.NOSOV, *Dr. of Engineering Sciences*, *Professor*, *nosovvv@list.ru*
National Mineral Resources University (*Mining University*), *St Petersburg*, *Russia*

Ore production in deep rock-bump hazardous mines is closely connected with the need to increase workers' safety, which demands heavy costs of taking preventive shockproof actions and applying expensive protection systems against mountain blows. The article considers a resource forecasting technique and a bump hazard evaluation method for a rock mass area, based on a micromechanical model, which registers acoustic emission of heterogeneous materials, and empirical data, obtained as a result of acoustic signals registration with the help of the model, aimed at seismic-acoustic activity evaluation at «Taimir» and «Oktyabrsky» rock mass areas, belonging to Norylsk industrial region.

***Key words*:** acoustic emission, microcracks concentration, seismic-acoustic activity, rock mass, resource, forecasting, mountain blow.