



УДК 622.285.5

А. Г. АНОХИН, К. А. СЕМЕНЬКО, Т. П. ДАРБИНЯН (ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель»)**С. В. ЦИРЕЛЬ** (Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»)**С. Н. МУЛЁВ** (ОАО «ВНИИМ»)

МЕТОДОЛОГИЯ УЧЕТА СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ НАРУШЕННОСТИ РУДОПОРОДНОГО МАССИВА НА СЕЙСМИЧЕСКИЙ РИСК*



А. Г. АНОХИН,
директор Центра
геодинамической
безопасности,
канд. техн. наук



К. А. СЕМЕНЬКО,
главный инженер
Горно-геологического
управления



Т. П. ДАРБИНЯН,
главный инженер
рудника «Октябрьский»



С. В. ЦИРЕЛЬ,
главный научный
сотрудник,
д-р техн. наук



С. Н. МУЛЁВ,
зав. лабораторией
геофизических
исследований

Число сейсмических событий, их суммарная энергия, наклон графика повторяемости и обобщающий показатель F служат характеристиками сейсмического процесса в руднике. Однако для оценки опасности сейсмического процесса необходимо не только знание самой численной характеристики, но и сопоставление с условиями ее проявления. По многолетним наблюдениям на вышеуказанные параметры сейсмической активности при одинаковых горно-геологических характеристиках наибольшее влияние оказывает нарушенность горного массива в широком смысле слова, включая изменения состояния в процессе и в результате отработки: сдвигение, закладка, взрывные работы, бурение разгрузочных скважин. В статье описана методология учета вышеперечисленных факторов при построении зон удароопасности по сейсмическим данным.

Ключевые слова: сейсмические события, взрывные работы, скорость сдвижения поверхности, коэффициент удароопасности, разгрузочные скважины, площадь отработки.

В настоящее время Центр геодинамической безопасности проводит непрерывный сейсмический мониторинг на удароопасных участках массива горных пород рудников «Октябрьский» и «Таймырский». На планах горных работ ежедневно строятся карты сейсмической активности с выделением динамически активных зон.

Известно, что основная сейсмическая активность наблюдается в зонах ведения горных работ и развития процессов сдвижения. При этом проявляются и более тонкие различия. В первую очередь в результате продолжительных наблюдений (1992–2013 гг.) отмечено, что крупные события (до 150 кДж) происходят в зонах, имеющих малую нарушенность горного массива, например в охранном целике стволов ВЗС и ВСС рудника «Октябрьский». При этом в зонах сильной нарушенности, например в северной части разделительного массива РМ-1, сильных событий практически не происходит. Кроме того, несмотря на то, что сейсмоактивность сопровождает процессы сдвижения, при большой скорости сдвижения энергия сейсмических событий убывает.

Однако для оценки активности сейсмического процесса необходимо не только знание самой численной характеристики, но и ее сопоставление с какими-то реперными, в том числе критическими значениями. Например, при определенном тектоническом строении и определенной интенсивности процессов сдвижения значения $F = 150$ в блоке, в котором интенсивно ведутся горные работы, является естественной и относительно безопасной реакцией массива на ведение очистных работ. Если же F достигает того же значения в зоне с малой интенсивностью ведения горных работ, то это говорит о каких-то мощных геодинамических процессах на этом участке массива. Иначе говоря, повышение активности сейсмического процесса в зоне интенсивного ведения горных работ раскладывается на две составляющие: нормальную реакцию массива и дополнительный рост риска горных ударов.

Выбор способов такого разложения сопровождается риском совершения ошибок двух видов. С одной стороны, излишняя осторожность, недоучет влияния естественной и техногенной нарушенности на фоновый уровень сейсмоактивности ведут к ошиб-

* В работе принимали участие Л. В. Какошина, начальник отдела Центра геодинамической безопасности (ЦГБ); Е. В. Родионова, зам. начальника отдела ЦГБ; О. В. Ситникова, ведущий инженер отдела ЦГБ; М. В. Терещенко, инженер 2-й категории отдела ЦГБ.

кам 1-го рода — завышению уровня опасности, простоям и снижению производительности труда. Наоборот, завышение величины нормальной реакции массива на горные работы ведет к ошибкам 2-го рода — недоучету опасности для людей и оборудования. В представленной ниже методологии делается попытка учесть эти ошибки.

Общие положения методологии

В статье термин «нарушенность» позиционируется как любое нарушение сплошности массива. Это относится не только к природной и техногенной трещиноватости, но и к выработкам, скважинам, взрывным полостям, сдвигению блоков.

Для дифференциации массива по степени нарушенности заявленная методология предполагает разделение рудного поля на блоки (квадраты) размером 120×120 м (рис. 1). Размер блока выбран, исходя из соображения, что ширина обрабатываемых панелей 120 м.

Блоки (квадраты) (см. рис. 1) делятся на три категории:

- 1 — неотработанные блоки (желтый цвет);
- 2 — блоки, находящиеся в процессе отработки (коричневый цвет);
- 3 — заложенные блоки (зеленый цвет).

Существует еще одна категория — отработанные, но еще не полностью заложенные блоки, но их столь мало, что без ущерба для точности их включают в 3-ю категорию (заложенные блоки).

Первая и третья категории обрабатываются отдельно друг от друга, но практически по одинаковым методикам. Для них учитывают только два параметра:

- степень трещиноватости (постоянна) $F(N)$;
- скорость сдвигения (изменяется 1 раз в год) $F(V)$.

К характеристике блоков, находящихся в процессе отработки (2-я категория), к указанным параметрам прибавляют еще четыре:

- максимальное количество ВВ (кг) за 1 взрыв в течение одного месяца $F(m)$;
- число пробуренных разгрузочных скважин (изменяется 1 раз в месяц) $F(n)$;
- скорость отработки квадрата (изменяется 1 раз в месяц) $F(dS)$;
- степень отработки квадрата по месяцам $F(S)$.

Отметим, что скорость отработки квадрата одновременно характеризует и изменения геометрии блока (в том числе расположение зон повышенного горного давления). Это же относится и к интенсивности ведения взрывных работ.

Отметим, что в описанной методике используется параметр $F_{\text{норм}}$ — критерий, при котором вероятность разрушения горных выработок наивысшая. Данный параметр получен в результате длительных наблюдений и статистического анализа. При этом неоднородность массива, например нарушенность, не учитывалась. В статье описана методика, позволяющая учесть данную погрешность при расчете текущего параметра F .

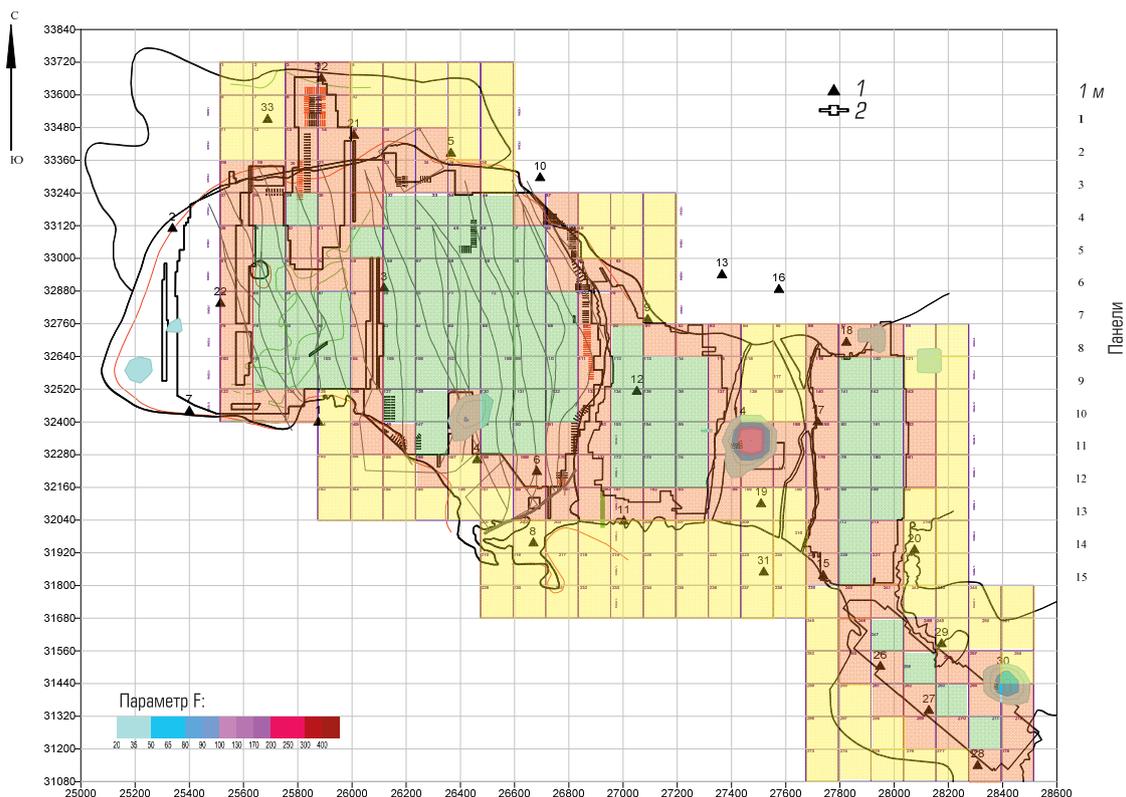


Рис. 1. Горный массив рудников «Октябрьский» и «Таймырский», поделенный на блоки:

1 — сейсмостанции; 2 — отработанный массив



Здесь и далее при рассмотрении влияния различных параметров учтем, что нормативное критическое значение $F_{\text{норм}}$ периодически корректируется, поэтому в дальнейшем для сопоставления данных разных лет будем оперировать не самими текущими значениями F , а \bar{F} — их отношениями к нормативному критическому значению, т. е.

$$\bar{F} = F/F_{\text{норм}}$$

Далее рассмотрим зависимость по каждому типу нарушения.

Зависимость \bar{F} от трещиноватости — $\bar{F}(N)$

Для разделения массива по степени природной нарушенности (трещиноватости) в каждом квадрате подсчитывали число трещин (задокументированных тектонических разломов различного ранга), оконтуренных сторонами квадратов.

Для построения зависимости $\bar{F}(N)$ выбираем разные блоки (квадраты) по отдельным годам и приписываем одинаковые постоянные трещиноватости. Среднегодовые значения F при этом, естественно, будут разными как за счет вариаций сейсмоактивности, так и за счет изменения значения $F_{\text{норм}}$. Как следует из данных **рис. 2, а** для трещиноватости наиболее вероятно линейная зависимость (коэффициент корреляции $R^2 = 0,9072$).

Нормируя график зависимости к единице (за единицу принимаем значение при отсутствии трещин), получаем зависимость

$$\bar{F}_{\text{трещ}} = 1 - 0,145 N_{\text{трещ}}$$

Зависимость \bar{F} от скорости сдвига — $\bar{F}(V)$

График зависимости $\bar{F}(V)$ строим по такому же принципу, как и по трещиноватости. При этом скорость сдвига принимаем как среднее значение скорости по всем реперам за 1 год.

Для анализа связи сдвига и сейсмической активности были обработаны показатели по массиву данных о смещениях 40 реперов за период 1997–2009 гг. (**рис. 3**). Сравнивая средние значения выделившейся за год энергии и энергию самых мощных событий в течение года со скоростью сдвига (см. **рис. 3**), можно отметить следующие противоположные тенденции.

1. Выход сейсмического процесса на новый уровень произошел в 2003–2004 гг. одновременно с существенным ускорением сдвига (началом перехода к полной подработке), т. е. в целом сейсмическая активность прямо пропорциональна сдвигу (на это указывает и их одновременный подъем в 1999 г.).

2. В то же время период этапа активного сдвига (с 2003 г.) как максимальное среднее значение суммарной энергии событий за месяц в году, так и значение энергии самых мощных сейсмособытий в году приурочены к периодам замедления скорости сдвига. То есть оседание налегающей толщи тормозится структурами, способными сдерживать сдвиг, накапливая при этом упругую энергию. При дальнейшей отработке происходит разрушение препятствия в виде сильного динамического явления. Скорость сдвига увеличивается до следу-

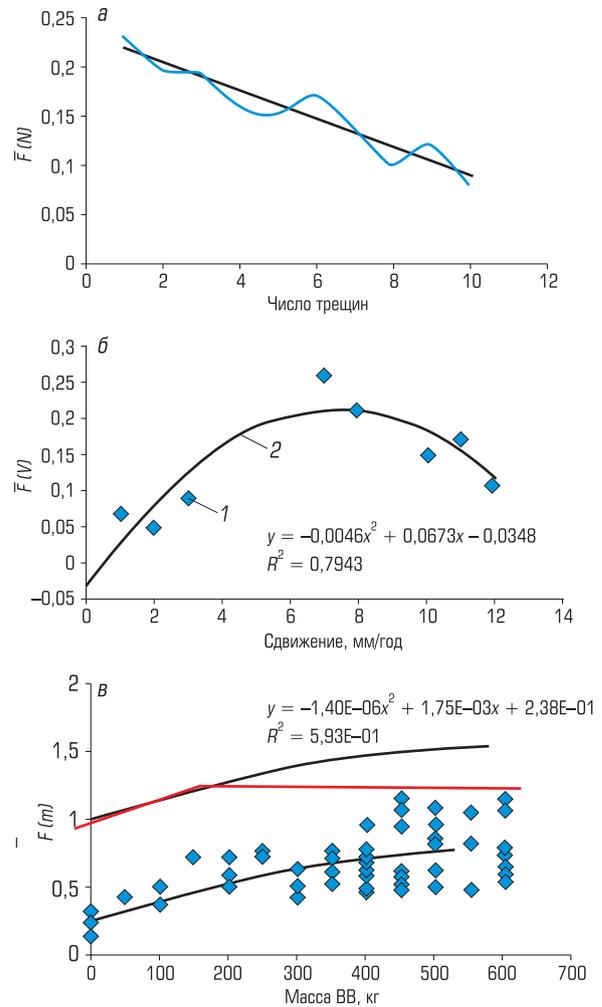


Рис. 2. Зависимости параметра \bar{F} от числа трещин (а), скорости сдвига (б) и массы одновременно взорванного ВВ

ющего препятствия. Графики, представленные на **рис. 3**, наглядно демонстрируют данный процесс.

Для построения зависимости $\bar{F}(V)$ использованы данные о движении реперов, расположенных на поверхности охранного целика стволов ВЗС и ВСС рудника «Октябрьский». Суммарная зависимость аппроксимирована параболой (см. **рис. 2, б**).

При нормировании к единице получена зависимость

$$\bar{F}_{\text{сдвиг}} = 0,0046 \cdot V_{\text{сдвиг}}^2 + 0,0673 \cdot V_{\text{сдвиг}} - 0,0348.$$

Зависимость \bar{F} от максимального количества ВВ на один взрыв — $\bar{F}(m)$

Рассмотрим зависимость \bar{F} от максимальной массы ВВ (кг) за 1 взрыв. В отличие от предыдущих случаев, ежемесячные значения для каждого квадрата различны, но методика построения зависимости такая же, но с разделением по месяцам.

В ходе предыдущих исследований на руднике «Октябрьский» установлено, что зависимость сейсмоактивности от максималь-

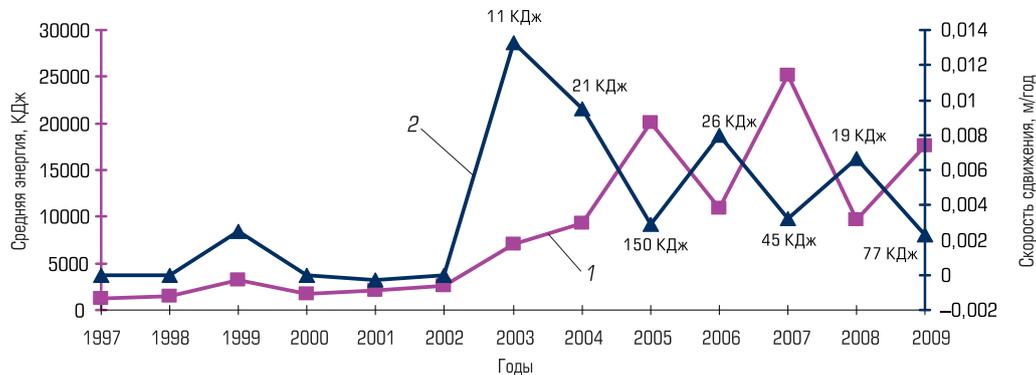


Рис. 3. Изменение среднемесячной максимальной энергии сейсмических событий за год (1) и скорости оседания земной поверхности (2); цифрами показана максимальная энергия сейсмического события за год

ной мощности взрыва различна при разной трещиноватости, а именно:

- в предохранительном целике стволов ВЗС–ВСС наблюдался рост сейсмоактивности с увеличением массы ВВ, взрываемого одновременно; среднестатистически после взрывов ВВ общей массой 500–600 кг с большей вероятностью можно ждать опасных сейсмических явлений;

- в южной части РМ-1 сейсмоактивность увеличивалась только при взрывании ВВ массой до 300–400 кг, а при более мощных взрывах она практически не зависела от массы ВВ;

Основными причинами отмеченных различий являются различная напряженность массива и его трещиноватость. В более напряженном массиве крупноблочной структуры мощные взрывы вызывают сброс энергии в большой области, в менее напряженном и более трещиноватом массиве, во-первых, накапливается меньше энергии, во-вторых, трещины (разрывы) в большей степени гасят волны.

Тем не менее на данном этапе мы не будем делить массив на участки и учитывать члены второго порядка (произведение параметров), а пока рассмотрим зависимость сейсмоактивности от мощности максимального взрыва для всего массива сразу. В дальнейшем полезно провести более детальные исследования.

Судя по данным авторов, рост \bar{F} при больших массах ВВ происходит медленнее, чем при малых, и зависимость можно аппроксимировать параболой (см. рис. 2, в).

На графике вызывают интерес две точки: значение \bar{F} в точке 0 (при отсутствии взрывов), обозначим его \bar{F}_0 , а также масса ВВ при пересечении значения $1 + \bar{F}_0$, обозначим ее m_0 . В данном примере $\bar{F}_0 = 0,238$ и $m_0 = 185$ кг.

Допустимое значение F_0 (график на рис. 2 обозначен красной линией) при различных массах ВВ за 1 взрыв определим следующим образом:

$$\bar{F} = \begin{cases} 1 - \bar{F}_0 + f(m), & \text{если } m < m_0; \\ 1 + \bar{F}_0, & \text{если } m > m_0, \end{cases}$$

где $f(m)$ — функция зависимости \bar{F} от m .

При полученных выше значениях $\bar{F}_0 = 0,238$ и $m_0 = 185$ кг уравнения принимают вид

$$\bar{F} = \begin{cases} 1 - 0,238 + 0,0000014 m^2 + 0,00175 m, & \text{если } m < 185, \\ 1,238, & \text{если } m > 185. \end{cases}$$

Зависимость \bar{F} от числа разгрузочных скважин — $\bar{F}(n)$

Определить данную зависимость достаточно сложно. С одной стороны, бурение разгрузочных скважин снижает геодинамическую активность (для того их и бурят), с другой стороны, их бурят в самых сложных местах с максимальной геодинамической активностью. Поэтому окончательный вид функции в процессе сбора информации будет уточнен. На дальнейших этапах работы предполагается рассматривать не зависимость F от числа пробуренных скважин, а зависимость изменения F от месяца к месяцу от разности приведенных значений числа пробуренных скважин и скорости отработки в данном квадрате.

На данном этапе функция построена аналогично предыдущим случаям, но с убыванием значения F и без ограничения (рис. 4, а).

На основании данных по рассмотренным квадратам выбрана функция

$$\bar{F}(n) = 0,572 + 0,000048 n^2 - 0,0092 n,$$

где n — число скважин, пробуренных за месяц.

Зависимость \bar{F} от скорости отработки квадрата — $\bar{F}(dS)$

Данная зависимость (см. рис. 4, б), как показывают наблюдения, является строго увеличивающейся, т. е. чем выше скорость отработки, тем больше сейсмическая активность. Причем это нарастание носит не линейный, а ускоряющийся характер, поэтому аппроксимируем зависимость квадратичной функцией с положительными коэффициентами. При этом авторы, следуя общему принципу, на начальной части кривой принимают большие значения, чем дает кривая, полагая, что таким же образом влияет ведение горных работ в соседних квадратах. Для квадратов с очень высоким темпом ведения горных работ, сле-

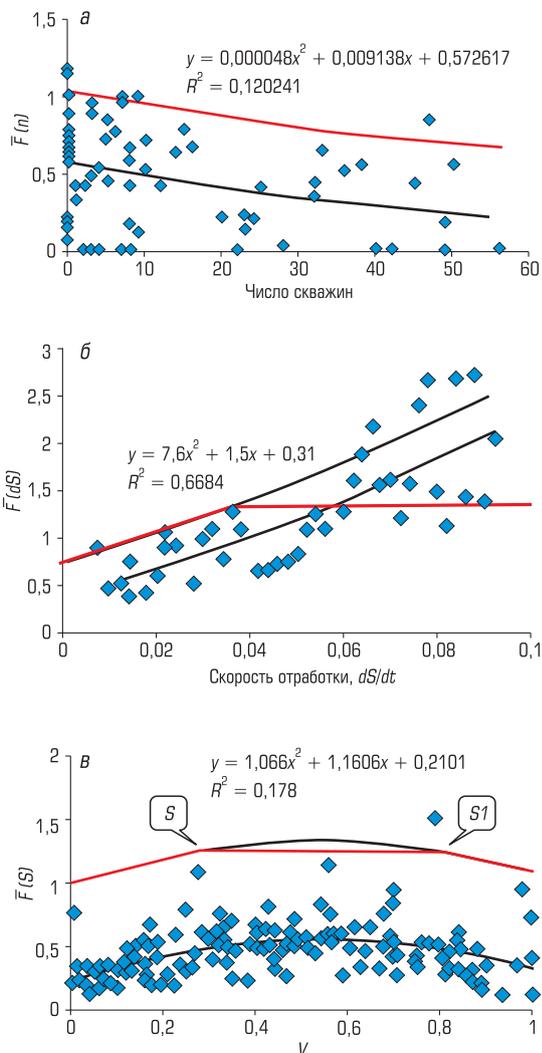


Рис. 4. Зависимость \bar{F} от числа разгрузочных скважин (а), скорости отработки квадрата (б) и степени отработки квадрата (в)

Для тому же принципу, ограничиваем зависимость предельным уровнем $1 + e3$, где $e3$ — свободный член в параболической зависимости, аппроксимирующей натурные данные. То есть рост значения F до уровня $1 + e3$ считается нормальной реакцией массива на ведение горных работ, а дальнейший рост — уже проявлением удароопасности.

Таким образом, зависимость имеет вид

$$\bar{F}(dS) = \begin{cases} e3 + e1 \cdot dS^2 + e2 \cdot dS, & \text{если } 1 + e1 \cdot dS^2 + e2 \cdot dS < 1 + e3, \\ 1 + e3, & \text{если } 1 + e1 \cdot dS^2 + e2 \cdot dS \geq 1 + e3. \end{cases}$$

При подстановке полученных коэффициентов и нормировании графика к 1 получаем

$$\bar{F}(dS) = \begin{cases} 0,31 + 7,6 \cdot dS^2 + 18,5 \cdot dS, & \text{если } 1 + 7,6 \cdot dS^2 + 18,5 \cdot dS < 1 + 1,31; \\ 1,31, & \text{если } 1 + 7,6 \cdot dS^2 + 18,5 \cdot dS \geq 1 + 1,31, \end{cases}$$

где dS — разница площади отработки между текущим и прошедшим месяцем.

Зависимость \bar{F} от степени отработки квадрата — $\bar{F}(S)$

Зависимость \bar{F} от степени отработки (и закладки) квадрата имеет вид параболы: максимальное значение в середине процесса отработки квадрата и минимальные — в самом начале и самом конце отработки. Доля площади отработки квадратов S находится в пределах от 0 до 1, где ноль — квадрат не отработан (или не заложен), а 1 — квадрат полностью отработан и заложен (см. рис. 4, в).

Получена следующая зависимость:

$$\bar{F} = \begin{cases} 1 + f(s) & \text{при } S < 0,28 \text{ и } S > S_1; \\ 1 + 0,21 & \text{при } S_0 < S \text{ и } S < S_1, \end{cases}$$

где $f(s)$ — функция зависимости \bar{F} от S ; S_0 и S_1 — точки пересечения прямой $1 + f(s)$. При подстановке полученных коэффициентов и нормировании графика к 1 получаем

$$\bar{F} = \begin{cases} 1 + 0,21 + 1,16S + 1,07S_2 & \text{при } S < 0,28 \text{ и } S > 0,78; \\ 1 + 0,21 & \text{при } S > 0,28 \text{ и } S < 0,78. \end{cases}$$

Обобщенный коэффициент учета нарушения

В результате получается 6 значений \bar{F} в каждом квадрате. Вычисление суммарного значения $\bar{F}_{кр}$ производится во всех трех случаях (неотработанные, обрабатываемые и полностью заложенные блоки) с использованием весовых коэффициентов.

$$\bar{F}_{кр} = F_{норм} \cdot (|\alpha1| \cdot \bar{F}_{трещ} + |\alpha2| \cdot \bar{F}_{сдвиж} + |\alpha3| \cdot \bar{F}_{max} \cdot BB + |\alpha4| \cdot \bar{F}_{скв} + |\alpha5| \cdot \bar{F}_{скор} \cdot S + |\alpha6| \cdot \bar{F} \cdot S) / (|\alpha1| + |\alpha2| + |\alpha3| + |\alpha4| + |\alpha5| + |\alpha6|),$$

где $\bar{F}_{кр}$ — критическое значение для данного блока (квадрата) в текущем месяце; $F_{норм}$ — нормативное критическое значение F (в настоящее время $F_{норм} = 200$); $\alpha1, \alpha2, \alpha3, \alpha4, \alpha5, \alpha6$ — весовые коэффициенты значимости факторов.

Значения весовых коэффициентов найдены с помощью нейронной сети, построенной с помощью программы NeuroPro 0,25 (рис. 5).

Сигнал	Значимость
ST OTP	0.1019512
E max	0.942665
Число СКВ	1
K TP	0.5753603
V OTP	0.4204243
V сд	0.4097156

Рис. 5. Степень влияния входных параметров на значение F



Введение дифференцированных критических значений F позволит более точно оценивать уровень сейсмической активности, а в дальнейшем — учесть и зависимость опасности для персонала и риска материального ущерба от множества факторов. Кроме того, построение карт сейсмической активности не в абсолютных величинах, а в уровнях отношения фактического значения F к критическому, сделает их более наглядными и понятными.

Естественно, введение дифференцированных показателей должно производиться крайне осторожно, чтобы, с одной стороны, не объявить опасное повышение сейсмоактивности нормальной реакцией массива на ведение горных работ, а с другой стороны, не зависить искусственно оценки активности в зонах, где не ведутся или почти не ведутся горные работы. В приведенных выше формулах эта осторожность достигается тремя путями:

- введением жестких ограничений коэффициентов снижения и повышения критических значений;
- взвешиванием вклада каждого фактора в изменение критического значения F с помощью нейросети трехслойной архитекту-

ры, обученной на реальных данных о сейсмической активности на рудниках ОАО «ГМК «Норильский никель»;

- усреднением коэффициентов снижения и повышения критических значений в итоговой формуле.

В дальнейшем, по мере отработки методологии и разрабатываемых методик, эти ограничения могут быть смягчены.

Анохин Александр Геннадьевич,

тел.: +7 (3919) 45-21-57

Семенько Константин Анатолиевич,

тел.: +7 (3919) 40-61-10

Дарбинян Тигран Петросович,

тел.: +7 (3919) 37-21-25

Цирель Сергей Вадимович,

тел.: +7 (812) 321-81-43

Мулёв Сергей Николаевич,

тел.: +7 (812) 327-21-22

METHODOLOGY OF ACCOUNTING FOR EFFECT OF ORE AND HOST ROCK DAMAGE RATIO ON SEISMIC RISK

Anokhin A. G.¹, Director, Geodynamic Safety Center, Candidate of Engineering Sciences, Phone: +7(3919) 45-21-57

Semen'ko K. A.¹, Chief Engineer, Mining and Geology Department

Darbinyan T. P.¹, Chief Engineer, Oktyabrsky Mine

Tsirel' S. V.², Chief Researcher, Doctor of Engineering Sciences

Mulev S. N.³, Head of Laboratory

¹ Polar Division, Norilsk Nickel Mining and Metallurgical Company (Talnakh, Russia)

² National Mineral Resources University (University of Mines) (Saint-Petersburg, Russia)

³ NIMI Inter-Industry Scientific Center (Saint-Petersburg, Russia)

Amount of seismic events, their total energy, slope of frequency curve and a generalizing factor F are the characteristics of a seismic process in a mine. Yet it is not only the numerical characteristic but also the process developing conditions that are required for estimation of seismic hazard. According to the long-term observations, the above listed parameters of seismic activity in a rock mass, at the same mining-and-geological characteristics, are utmost affected by damage state of the rock mass, including its altered condition during and after mining—displacement, backfilling, blasting and distress hole drilling.

The article presents the procedure of accounting for the mentioned factors in plotting the rockburst-hazardous zones based on seismic data. The essence of the procedure is division of spatial and time changes in the values of F into the normal rock mass response to various disturbing effects (damage) and abnormal subsidiary alteration characterizing geodynamic hazard development in the rock mass. The result of the division is the space- and time-graded critical levels of seismic activity.

The differentiated parameters should be carefully introduced so that not to consider a hazardous seismic activation the normal rock mass response to mining operations and not to overestimate seismic activity beyond the mining area limits. This prudence is attained within the suggested formulas owing to introduction of narrow constraints for reduction factors and step-up ratios of critical values, weighting of contribution of each factor in the change of the critical value of F using three-layer architecture neuron network based on the factual data on seismic activity in mines of the Polar Division of the Norilsk Nickel Mining and Metallurgical Company, and averaging of the reduction factors and step-up ratios of the critical value of F in the final formula.

Later on, while the methodology and the related procedures are elaborated, these constraints can be relaxed.

The research work was executed, inter alios, by L. V. Kakoshina, Chief of Department of the Geodynamic Safety Center (GSC); E. V. Rodionova, Assistant Chief of Department, GSC; O. V. Sitnikova, Principal Engineer of Department, GSC; M.V. Tereshenko, Category 2 Engineer of Department, GSC.

Key words: seismic events, blasting, surface movement velocity, rockburst hazard coefficient, distress holes, mining area.
