

УДК 622.235 (088.8): 519.21

В.В. Иванов, В.А. Хямяляйнен, Д.С. Пашин

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА СТЕПЕНИ УДАРООПАСНОСТИ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАЗРАБОТКЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПОДГОТОВКЕ ГОРНЫХ УДАРОВ

Предложен новый метод прогноза горных ударов и др. сейсмических событий на основе кинетической концепции разрушения горных пород. Выявлена закономерность изменения удельного электросопротивления непосредственно перед сейсмическими событиями, которая может быть положена в основу метода прогноза горных ударов.

Ключевые слова: удароопасность, вероятность горного удара, удельное электросопротивление, закономерность изменения.

В основе разрушения блоков горных пород любого иерархического уровня лежит случайный процесс накопления трещин меньшего размера. На этот процесс оказывает влияние множество различных горно-геологических и горно-технических факторов. Процесс накопления трещин в естественных условиях является квазистационарным случайнym процессом, описываемым статистикой Пуассона [1].

Интенсивность потока трещин оценивается с помощью кинетического уравнения, вытекающего из кинетической теории прочности С.Н. Журкова [1, 2]:

$$N(t) = \frac{N^*}{\tau_0} \exp \left[\frac{\gamma \sigma(t) - U_0}{kT} \right], \quad (1)$$

где σ - интенсивность действующих напряжений; $\tau_0 \approx 10^{-13}$ с. - период тепловых атомных колебаний; U_0 , γ - кинетические константы материала и условий нагружения; T - абсолютная температура материала, К°; k - постоянная Больцмана. Разрушение блока происходит при выполнении концентрационного критерия разрушения [3]:

$$\frac{(N^*)^{1/3}}{L_0} = K \approx 3, \quad (2)$$

где N^* - критическая концентрация трещин для соответствующего уровня разрушения; L_0 - средний линейный размер трещин на данном иерархическом уровне разрушения (для образцов горных пород L_0 совпадает со средним размером зерна). Формулы (1) - (2) положены нами в основу кинетико-статистической модели разрушения для любых условий нагружения и любых масштабных уровней разрушения [4] (от образцов горных пород до крупных структурных блоков земной коры).

ры). При этом долговечность материала определяется из условия необратимости накопления повреждений Бейли [4]:

$$\int_0^{\tau} \frac{dt}{\tau[\sigma(t)]} = 1 \quad (3)$$

которое в контексте вышеизложенного записывается следующим образом:

$$\int_0^{\tau} \dot{N} dt = \int_0^{\tau} \frac{N^*}{\tau_0} \exp \left[\frac{\gamma \sigma(t) - U_0}{kT} \right] dt = N^* , \quad (4)$$

где τ - долговечность материала под нагрузкой; \dot{N} - скорость трещинообразования.

На основе изложенной выше кинетической концепции разрушения горных пород предложен новый метод количественной оценки степени удароопасности рудных массивов, суть которого состоит в том, что в предразрушенном состоянии (непосредственно перед толчком и горным ударом) в зоне очага будущего события накапливается критическое число трещин N^* , при этом изменение удельного электросопротивления горных пород носит закономерный характер.

Рассмотрим сначала удельное электросопротивление высокопроводящих горных пород. К ним относятся породы с высоким содержанием руды, магнетиты и др. Поскольку в процессе подготовки горного удара в материале пород накапливаются трещины, то с ростом числа трещин электрическое сопротивление породы должно расти. Действительно, используя теорию линейных цепей (законы параллельного и последовательного соединения проводников), можно получить для эффективного удельного электросопротивления трещины $\rho = \rho_2 / \zeta$, где ρ_2 - удельное электросопротивление ненарушенной породы, ζ - относительная среднестатистическая площадь скальных контактов берегов трещин, которая согласно [5] равна примерно $3 \cdot 10^{-4}$. Далее, рассчитывая удельное электросопротивление горной породы с трещинами, получаем

$$\rho = \rho_2 (1 + \delta / h\zeta) , \quad (5)$$

где δ - среднестатистическое раскрытие трещин; h - расстояние между трещинами системы; ρ_2 - удельное электросопротивление ненарушенной породы.

Согласно концентрационному критерию разрушения (2) в предельном предразрушающем состоянии массива расстояние между трещинами h не может быть произвольным и равно примерно $3L$, где L - длина трещин. Согласно результатам эксперимента, приведенным в работе [5], среднестатистическое отношение $\delta / L = 3,6 \cdot 10^{-4}$. Учитывая все сказанное, формулу (5) можно привести к виду

$$\rho = 1,4 \cdot \rho_2 . \quad (6)$$

Таким образом, в предразрушающем состоянии удельное электросопротивление высокопроводящих пород должно возрастать примерно на 40 %. В дальнейшем мы убедимся в том, что этот результат хорошо подтверждается в лабораторном и шахтном эксперименте.

Рассмотрим теперь, как должно меняться удельное электросопротивление пород с высоким удельным электросопротивлением. К ним относятся диориты, метасоматиты, порфириты, скарны и другие кварцодержащие горные породы. Поскольку с ростом механических напряжений в минералах, слагающих эти породы растет число точечных дефектов структуры - ионов калия, магния, алюминия и их вакансий, особенно вблизи поверхности образующихся трещин, то удельное элек-

тросопротивление таких пород должно падать. Вычислим предельное значение удельного электросопротивления таких пород в предразрушающем состоянии.

Аналогичным способом, как и при выводе формулы (5), получаем

$$\rho = 0,5 \cdot \rho_2 (1 + \rho_1 h / \rho_2 \delta), \quad (7)$$

где ρ_1 – удельное электросопротивление породы вблизи поверхности трещин (в зоне концентрации заряженных точечных дефектов структуры). Остальные обозначения совпадают с пояснениями к формуле (5).

В этом случае относительное изменение удельного электросопротивления в предразрушающем состоянии породы будет равно примерно

$$\Delta \rho / \rho = 8,33 \cdot 10^3 \cdot (\rho_1 / \rho_2). \quad (8)$$

Таким образом, относительное изменение удельного электросопротивления слабопроводящих пород существенным образом зависит от отношения электросопротивлений самой породы и заряженных зон вблизи поверхности образующихся трещин в процессе нагружения породы. Из результатов лабораторного эксперимента, описанного ниже следует, что это отношение для разных пород Таштагольского рудника с высоким электросопротивлением меняется от $2 \cdot 10^{-5}$ до $6 \cdot 10^{-5}$, т.е. в пределах одного порядка.

Полученный теоретический результат применим к массиву горных пород любых размеров, т.е. не зависит от **масштабного уровня** разрушения.

Как будет видно из дальнейшего, эта закономерность подтверждается и результатами шахтного эксперимента для горных ударов и толчков разной энергии, т.е. для разного масштабного уровня разрушения.

Измерения удельного электросопротивления горных пород при разных нагрузках осуществлялись по методу охранного кольца на основе действующего гостандарта РФ. Для испытаний были изготовлены образцы правильной цилиндрической формы.

Испытания проводились следующим образом. Сначала измерялось электросопротивление образца в ненагруженном состоянии. Затем образец нагружался до некоторого напряжения, вынимался из нагружающего устройства (из плит 10 –ти и 50 –тонного пресса) и производилось повторное измерение его электросопротивления.

Следующий этап нагружения заключался в том, что образец приводился в состояние, близкое к полному разрушению и в этом состоянии измерялось его электросопротивление. Затем образец полностью разрушался, собирался из кусков в цилиндрическую форму (если это было возможно после полного разрушения) и снова измерялось его электросопротивление.

При обработке результатов измерений рассчитывалось изменение в процентах электросопротивления образца на каждом этапе нагружения.

В табл.1 приведены результаты статистической обработки изменений электросопротивления образцов разных пород в предразрушающем состоянии.

Для опытно – промышленной проверки полученной закономерности в шахтных условиях были проанализированы данные работы службы прогноза горных ударов Таштагольского рудника с 1995 года по 2012 год. Причем анализировались только те данные, где измерения осуществлялись повторно в одних и тех же точках массива, поскольку в массиве наблюдаются существенные вариации электросопротивления в зависимости от участка, наличия вкраплений разных пород, изменения влажности при переходе от участка к участку и пр. факторов. Результаты измерений выбирались исходя из тех условий, чтобы они были проведены,

Таблица 1

Усредненные значения отношения ρ_1/ρ_2 для пород Таштагольского рудника и среднее изменение их удельного электросопротивления в процентах в предразрушающем состоянии по данным лабораторного эксперимента

Тип породы	$(\rho_1 / \rho_2)_{cp}$, 10^{-5}	$\Delta \rho / \rho$, %	Примечание
Диориты	5,96	27,4	Электросопротивление падает
Порфиритовые диориты	4,7	39,2	Электросопротивление падает
Метасоматиты	2,22	18,5	Электросопротивление падает
Скарны	2,77	23,1	Электросопротивление падает
Магнетиты	-	45,2	При полном запредельном разрушении сопротивление возрастает в 4-8 раз
Рудные тела	-	48	Электросопротивление растет
Руды с содержанием менее 50 %	-	27,5	Электросопротивление растет, при запредельном разрушении рост в 3 – 5 раз
Среднее изменение электросопротивления по всем высокопроводящим породам	-	40,2	Электросопротивление растет

во – первых, непосредственно перед горным ударом или толчком, во – вторых, в непосредственной близости от места гипоцентра сейсмического события (на расстоянии не более 100 – 180 м). Причем главным условием было, чтобы измерения осуществлялись в одних и тех же точках массива и при одной и той же глубине зондирования АВ/2 (или на одной и той же глубине скважины, если измерения осуществлялись по скважине), хотя и в разное время (обычно – за один - два месяца до сейсмического события, либо чуть больше). Особый интерес представляли собой измерения вблизи тектонических нарушений, поскольку при попадании нарушения в зону повышенных напряжений, связанных с перераспределением напряжений при промышленных взрывах, как правило, происходят горные удары, либо толчки большой силы.

Размеры зоны разрушения при горных ударах связаны с выделяемой сейсмической энергией известными эмпирическими законами сейсмологии . Размер очага горного удара восьмого или девятого энергетического класса составляет от 180 до 400 метров и, таким образом, охватывает несколько этажей между горизонтами, что и наблюдается на практике. Толчки же с энергией от 10^5 до 10^7 Дж приводят к образованию зон разрушения в массиве горных пород от 19 до 85 метров.

Поскольку процесс подготовки горного удара представляет собой кинетический, т.е. протекающий во времени процесс накопления трещин, то электросопротивление для пород с большим электрическим сопротивлением (сиениты, сланцы, скарны, диориты, порфириты и др.) должно убывать непосредственно перед горным ударом или толчком на 25 – 38 %, а для высокопроводящих пород (магнетиты и руды) - возрастать примерно на 40 % .

Далее в табл. 2 приведены некоторые результаты шахтных измерений изменения удельного электросопротивления вмещающих пород и руд Таштагольского рудника непосредственно перед горными ударами и толчками. Измерения осуществлялись как методом подземных электрических зондирований с полуразносом питающих электродов АВ/2 = 20 м, так и методом каротажа в скважинах. Как следует из приведенной таблицы и других экспериментальных данных, за один – два месяца до горного удара или толчка в породах с высоким электрическим со-

Таблица 2

Результаты обработки шахтного эксперимента

Сейсмическое событие, место события	Порода, изменение ρ, Ом·м	Период измерения, место измерения	Изменение ρ непосредственно перед событием, %
Горный удар, 2,3·10 ⁹ Дж, 24.10.99, этаж гор. -280/-210, орт 15, центр, рудные тела 1 и 6+9, вблизи нарушения	Скарны 1695,6 – 973,4	01.09.99 – 18.10.99. Гор.- 280, порожняковый квершлаг	42,6
Серия толчков от 2,2·10 ⁴ до 1·10 ⁵ Дж, 05.06.11. в разное время суток, гор. -210, орт 4	Сиениты 18840 – 9646,1	Измерения по скважине, 14.03.11 – 29.04.11, гор.-210, орт 4	48,8
Толчок, 07.04.11, 1,4·10 ⁷ Дж, гор. -350, орты 25, 26, восток	Сиенит, сланцы, скарны 254,3 – 179,0	09.02.01 – 06.03.01. Гор. – 350, северо-западный полевой штrek	29,6
Толчок, 22.04.98, 1,9·10 ⁸ Дж, гор. -350, орт 27, запад	Сланцы 197,8- 135,0	23.03.98-02.04.98, гор.-280, северо-западный полевой штrek	31,7
Толчок, 1,5·10 ³ Дж, 18.07.12, гор. – 280, орт 13,14	Рудное тело 468,5-616,4	04.07.12 – 05.07.12, гор. – 280, 13 – 14 блок, вост. сбойка, 5 подъездаж	31,5

противлением наблюдается однонаправленное изменение УЭС, а именно – уменьшение электросопротивления, причем непосредственно перед горным ударом или толчком это уменьшение составляет по данным таблицы от 25 до 50 %, а в рудных телах – рост удельного электросопротивления в среднем на 40 %.

Результаты шахтного эксперимента позволяют предложить новый метод количественной оценки удароопасности участков рудного массива.

Удароопасность массива в соответствии с данным методом предлагается определять по критерию удароопасности, за который может быть принята вероятность горного удара:

$$P = |(\rho_i - \rho_{in})| / \rho_{in} \cdot \mu, \quad (9)$$

где ρ_i – электросопротивление, получаемое повторными измерениями в одних и тех же точках нагруженных участков профиля, либо в одних и тех же точках установки подземного электрического зондирования (ПЭЗ); ρ_{in} – начальное электросопротивление данных участков при первоначально неудароопасном его состоянии; μ – критическое изменение удельного электросопротивления горной породы непосредственно перед горным ударом в долях единицы или другим сейсмическим событием, которое для каждой породы устанавливается экспериментально. При вероятности более 0,5 участок массива считается удароопасным и на таком участке требуется применять профилактические меры борьбы с горными ударами. При вероятности менее 0,5 участок считается неудароопасным. В формуле (9) разность конечного и начального значений электросопротивления берется по абсолютному значению без учета знака этой разницы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 *Иванов В.В.* Физические основы электромагнитных процессов при формировании очага разрушения в массиве горных пород[Текст: дисс.... докт. техн. наук. защищена 28.06.94: утв. 15.09.94 / Иванов Вадим Васильевич] – Кемерово, 1994. – 366 с - Библиогр : с 296-320.
- 2 *Журков С.Н.* Кинетическая концепция прочности твёрдых тел // Вестн АН СССР. - 1968. - №3. - С. 3-17.
- 3 *Концентрационный порог разрушения и прогноз горных ударов / А Ю. Гор,* В.С.Куксенко, Н.Г. Томилин, Д.И. Фролов // ФТПРПИ.- 1989 - №3.- С. 54-60.
4. *Иванов В.В., Егоров П.В., Пимонов А.Г.* Статистическая теория эмиссионных процессов в нагруженных структурно-неоднородных горных породах и задача прогнозирования динамических явлений // ФТПРПИ. - 1990.- №4.- С. 59-65.
5. *Руппенейт К.В.* Деформируемость трещиноватых массивов / К.В. Руппенейт // М. Недра, 1975. – 221 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Хямляйнен Вениамин Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой теоретической и геотехнической механики,
Иванов Вадим Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и геотехнической механики, e-mail: vvi@kuzstu.ru,
Пашин Дмитрий Сергеевич – инженер, соискатель кафедры теоретической и геотехнической механики,
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачёва.

UDC 622 235 (088 8) 519 21

QUANTITATIVE ESTIMATION OF ROCKBURST HAZARD IN ORE MINES BY THE ELECTROMETRIC METHOD BASED ON KINETIC CONCEPT OF ROCKBURST NUCLEATION AND GROWTH

Khyamalyaynen V.A., Dr Eng, Professor, e-mail vah@kuzstu.ru
Ivanov V.V., Dr Eng, Professor, e-mail vvi@kuzstu.ru
Pashin D.C., Engineer,
T F Gorbachev Kuzbass State Technical University

The authors offer a new method of predicting rockbursts and other seismic events based on kinetic concept of rock failure. A regular pattern of the electrical resistivity change immediately before a seismic event is revealed and can be used as the basis of a rockburst prediction method.

Key words: rockburst hazard, rockburst probability, electrical resistivity, regularity of variation

REFERENCES

- 1 Ivanov V V *Fizicheskie osnovy elektromagnitnykh protsessov pri formirovaniu ochaga razrusheniya v massive gornykh porod* (Physical basics of electromagnetic processes in the course of nucleation and growth of a failure source in rock mass). Doctor's thesis zashchishchena 28 06 94 utv 15 09 94. Kemerovo, 1994 366 p , pp 296-320
- 2 Zhurkov, S N *Kineticheskaya kontsepsiya prochnosti tverdykh tel* (Kinetic concept of strength of solids). Vestn AN SSSR 1968 no 3, pp 3-17
- 3 Gor A Yu , Kuksenko V S , Tomilin N G , Frolov D I *Kontsentratsionnyi porog razrusheniya i prognoz gornykh udarov* (Failure concentration limit and rockburst prediction) FTPRPI 1989 no 3, pp 54-60
- 4 Ivanov V V , Egorov P V , Pimonov A.G *Statisticheskaya teoriya emissionnykh protsessov v нагрузкennykh strukturno-neodnorodnykh gornykh porodakh i zadacha prognozirovaniya dinamicheskikh yavlenii* (Statistical theory of emission processes in high-stress structurally inhomogeneous rocks and the seismic event prediction problem). FTPRPI 1990 no 4, pp 59-65
- 5 Ruppeneit K V *Deformiruemost' treshchinovatnykh massivov* (Jointly rock deformability). Moscow, Nedra, 1975 221 p