

УДК 622.241.54

© В.В. Иванов, 2018

**В.В. ИВАНОВ**

д-р техн. наук, проф.  
 ФГБОУ ВО «КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева»,  
 г. Кемерово  
 e-mail: vvi@kuzstu.ru



## ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА УДАРООПАСНОСТИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Приводятся результаты исследования удельного электросопротивления горных пород Таштагольского железорудного месторождения, а также теоретические и экспериментальные аспекты электрометрического прогноза удароопасности таких месторождений на основе кинетической концепции разрушения горных пород. Дана количественная оценка изменений удельного электросопротивления разных пород в предразрушенном состоянии. Полученные результаты могут служить основой нового метода прогноза горных ударов на железорудных месторождениях.

Ключевые слова: ЖЕЛЕЗОРУДНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ, УДАРООПАСНОСТЬ, УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ, ПРОГНОЗ ГОРНЫХ УДАРОВ.

Согласно современным кинетическим представлениям [1–2] в основе разрушения блоков горных пород любого иерархического уровня лежит случайный процесс накопления трещин меньшего размера. Процесс накопления трещин на наиболее длительной стадии в естественных условиях является квазистационарным марковским случайным процессом, при этом периоды стационарности описываются пуассоновским распределением, когда вероятность появления  $m$  событий за время  $\Delta t$  находится следующим образом:

$$P(\xi(\Delta t) = m) = \frac{(\lambda \Delta t)^m}{m!} e^{-\lambda \Delta t}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — среднее число трещин, возникающих в данном объеме в единицу времени.

Интенсивность случайного потока трещин  $\lambda$  оценивается с помощью кинетического уравнения прочности С.Н. Журкова следующим образом [4]:

$$\lambda(t) = \frac{N^*}{\tau_0 L_c} \exp\left[\frac{\gamma \sigma(t) - U_0}{kT}\right], \quad (2)$$

где  $\sigma$  — интенсивность действующих напряжений;  $\tau_0 \cong 10^{-13}$ , с — период тепловых атомных колебаний;  $U_0, \gamma$  — константы материала и условий нагружения;  $T$  — абсолютная температура материала;  $k$  — постоянная Больцмана;  $L_c$  — масштабный коэффициент. Разрушение блока происходит при выполнении концентрационного критерия [2]:

$$\frac{(N^*)^{-1/3}}{l_0} = K \approx 3, \quad (3)$$

где  $N^*$  — критическая концентрация трещин, накопленных к моменту катастрофического разрушения, для соответствующего уровня разрушения (для масштаба  $L_c$ );  $l_0$  — средний линейный размер трещин на данном иерархическом уровне разрушения (для образцов горных пород  $l_0$  совпадает со средним размером зерна).

Формулы (1)–(3) в работе [4] положены 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). При этом момент  $\tau$  катастрофического разрушения (горного удара или землетрясения) определяется из аналога уравнений Робинсона и Бэйли:

$$\int_0^{\tau} \frac{dt}{\tau[\sigma(t)]} = 1, \quad (4)$$

которое в контексте вышеизложенного записывается следующим образом [4]:

$$\int_0^{\tau} \dot{N} dt = \int_0^{\tau} \frac{N^*}{\tau_0} \exp\left[\frac{\gamma\sigma(t) - U_0}{kT}\right] dt = N^*, \quad (5)$$

где  $\tau$  — время до катастрофического разрушения блока;  $\lambda(t) = \dot{N}$  — скорость трещинообразования (2).

Таким образом, на основе кинетических представлений горный удар определенной энергии произойдет тогда, когда в рассматриваемом объеме (в блоке заданных размеров) накопится критическая концентрация трещин  $N^*$ , необходимая для его разрушения. Данное предположение было взято нами за основу при разработке критериев удароопасности железорудных месторождений.

Рассмотрим сначала модель удельного электросопротивления высокопроводящих горных пород с трещинами. К ним относятся породы с высоким содержанием руды, (магнетиты и др.). Поскольку в процессе подготовки горного удара в породах 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 одной трещины  $\rho = \rho_2 / \zeta$ , где  $\rho_2$  — удельное электросопротивление ненарушенной породы,  $\zeta$  — 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

$$\rho = \rho_2 (1 + \delta / h\zeta), \quad (6)$$

где  $\delta$  — среднестатистическое раскрытие трещин;  $h$  — расстояние между трещинами системы;  $\rho_2$  — удельное электросопротивление ненарушенной породы.

Согласно концентрационному критерию разрушения (3) в предельном предразрушающем состоянии 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 (6) можно привести к виду

$$\rho = 1,4 \cdot \rho_2. \quad (7)$$

Таким образом, в предразрушающем состоянии удельное электросопротивление высокопроводящих пород должно возрастать примерно на 40 %. В дальнейшем мы убедимся в том, что данный результат хорошо подтверждается в лабораторном эксперименте (см. табл. 1), а также при опытно-промышленной проверке в шахтных условиях.

Рассмотрим теперь, как должно меняться удельное электросопротивление пород с высоким удельным электросопротивлением. К ним относятся диориты, метасоматиты, порфириты, скарны и другие кварцсодержащие 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 (до  $10^{12}$ – $10^{13}$  на единицу поверхности трещин), то удельное электросопротивление таких пород должно падать (заметим, что при полной потере связности массива при его существенном разрушении электросопротивление таких пород может вырасти в сотни и тысячи раз). Вычислим предельное значение удельного электросопротивления пород в предразрушающем состоянии.

Аналогичным путем, как и при выводе формулы (7), получаем

$$\rho = 0,5 \cdot \rho_2 (1 + \rho_1 h / \rho_2 \delta), \quad (8)$$

где  $\rho_1$  — удельное электросопротивление по-

роды на поверхности трещин (в зоне концентрации заряженных точечных дефектов структуры). Остальные обозначения совпадают с пояснениями к формуле (7).

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

$$\Delta\rho / \rho = 8,33 \cdot 10^3 \cdot (\rho_1 / \rho_2). \quad (9)$$

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. Для разных пород по данным эксперимента (см. далее табл. 2) отношение  $\rho_1 / \rho_2$  варьирует в пределах одного порядка от  $2,8 \cdot 10^{-5}$  до  $6,0 \cdot 10^{-5}$ , т. е. удельное электросопротивление поверхности трещин в таких породах на пять порядков меньше электросопротивления самих пород. При выводе формул (7) и (8) не было необходимости вводить размеры трещин и зоны трещинообразования, поэтому полученные оценки нечувствительны к масштабу разрушения.

Измерения удельного электросопротивления горных пород производились по методу охранного кольца. Для испытаний были изготовлены образцы правильной цилиндрической формы. Измерения проводились двухэлектродной установкой, ток через образец и падение напряжения измерялись с помощью цифровых вольтметра и амперметра. Для улучшения контакта электродов с поверхностью образцов их торцы графитизировались и смазывались глицерином.

Испытания производились 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 прессы), 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. Результаты испытаний приведены в таблицах 1–2. Как видно из приведенных таблиц, удельное электросопротивление высокопроводящих пород при накоплении в образце трещин действительно увеличивается, а в слабо проводящих породах — уменьшается. Согласно табл. 1, в предразрушающем состоянии среднее увеличение электросопротивления высокопроводящих пород составляет примерно 38 % (усредненное значение по таблице), что близко к теоретическому значению (40 %). Для пород с высоким удельным электросопротивлением (см. табл. 2) среднее увеличение проводимости пород в предразрушающем состоянии составляет 17–60 %. Данные количественные оценки положены нами в основу критериев удароопасности участков рудных массивов на Таштагольском руднике при измерениях электрометрическим методом.

Анализ экспериментальных баз данных Таштагольского рудника (данные службы прогноза горных ударов) начиная с 1988 года показал, что непосредственно перед горными ударами удельное электросопротивление высокопроводящих руд возрастает примерно на 40 %, а электросопротивление вмещающих пород падает примерно на 23–39 % (см. табл. 3).

Таблица 1

Высокопроводящие породы

Тип породы	Электро-сопротивление образца R, ом	$\rho$ , ом·м	Изменение удельного электро-сопротивления $\Delta\rho / \rho$ , %	Нагрузка на образец $\sigma$ , МПа	Примечание
Магнетит, орт 23	5,53	0,187	0	0	
	6,6		19,3	50,5	
	8,63		56	97,4	
	7,17		30	180,5	Трещины
	22,7		484	108,3	Полностью разрушен
Магнетит, орт 2	2,01	0,065	0	0	
	3,01		49,7	108,3	
	2,78		38,3	117,7	Скол края образца
	2,92		45,3	198,5	Множественные трещины
Магнетит, орт 2	5,72	0,176	0	0	
	7,18		25,5	108,3	
	9,17		60,3	180,5	Скол и трещины
	53,9		840	129,9	Полностью разрушен
16 рудное тело, 23 орт, руда	68980	2024	0	0	
	94730		37,3	72,2	Сколы
	107879		56,4	162,4	Сильное разрушение
16 рудное тело, 23 орт, руда	13833	405,9	0	0	
	14042		15	72,2	
	19306		40	126,3	Скол и трещины
Руда, СЗУ 3 орт	155490	4683	0	0	
	185349		19,2	65	
	638182		310	122	Полностью разрушен
Руда, СЗУ 3 орт	125,8	3,87	0	0	
	133,0		5,7	72,2	
	166,0		31,9	67,1	Множественные трещины
Руда, СЗУ 3 отр	5505	553,3	0	72,2	
	4532		17,7	108,3	
	6221		13,0	90,2	Множественные трещины
Руда, СЗУ 3 отр	7,58	0,233	0	0	
	7,89		4,1	109,3	
	9,21		21,5	114	Большая трещина

Таблица 2

## Породы высокого электросопротивления

Тип породы	Электросопротивление, $10^6$ , ом	$\Delta\rho / \rho$ , %	$\rho$ , $10^6$ , ом·м	$\sigma$ , МПа	Примечание
Диорит	11,2	0	337	10,8	
	3,33	71		18,8	Сильно разрушен
Диорит	35,85	0	1014	0	
	30,28	15,5	43,3	43,3	
	25,5	28,9		65	
	25,5	28,9		65	
	14,1	60,5		90,2	При этой нагрузке через 10 мин образец полностью разрушился
Диорит	19,7	0	608	0	
	17,6	10,8		21,6	
	16,4	17		43,3	Вертикальная трещина по длине
Порфиритовый диорит	29,4	0	927	0	
	26,9	8,5		21,6	
	25,3	14,1		43,3	
	22,2	24,5		65	
	17,9	39,2		108,3	
	18,4	37,6		97,4	Образец сильно разрушен
Метасоматит	6,33	0	183	0	
	5,2	17,9		47	
	5,12	19,1		72,2	Большая трещина
Метасоматит	8,01	0	247	0	
	6,65	17		36,1	
	5,6	30		32,5	Множественные трещины
Скарн рудный, 13 орт	2,14	0		0	
	1,89	12,1		54,1	
	1,54	28		108,3	Образец не разрушился

Таблица 3

## Результаты шахтных измерений

Тип породы	$\Delta\rho/\rho$ , %
Вмещающие породы	23–39
Руда	40

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твёрдых тел / Вестн. АН СССР, 1968. — № 3. — С. 3–17.
2. Гор А.Ю. 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.
3. Иванов В.В. Новые подходы к прогнозу горных ударов / В.В. Иванов, А.Н. Фокин, А.Г. Пимонов // Уголь. — 1990. — № 10. — С. 39–41.
4. Иванов В.В. Прогноз главного сейсмического толчка на основе автоматизированного контроля сейсмического режима / В.В. Иванов, П.В. Егоров, А.Н. Фокин // Доклады РАН, 1996. — Т. 347. — № 6. — С. 808–810.
5. Руппенейт К.В. Деформируемость трещиноватых массивов. — М.: Недра, 1975. — 221 с.

UDC 622.241.54

© V.V. Ivanov, 2018

V.V. Ivanov

Doctor of Engineering Sciences, Professor

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo

e-mail: vvi@kuzstu.ru

## GEOMECHANICAL ASPECTS OF THE ELECTROMETRIC FORECAST OF THE ROCKBURST IN IRON-ORE DEPOSIT

*The results of the research of the rock electrical resistivity in the Tashtagol iron ore deposit are given. The theoretical and experimental aspects of the electrometric forecast of the rockburst hazard of such deposits on the basis of the kinetic concept of rock destruction is presented. A quantitative assessment of the changes in the electrical resistivity of different rocks in the pre-destroyed state is reviewed. The results are meant to be the basis for a new method for forecasting rockburst impacts in iron ore deposits.*

Key words: IRON-ORE DEPOSIT, ROCKBURST HAZARD, ELECTRICAL RESISTIVITY, ROCK OUTBURST FORECAST.

## REFERENCES

1. Zhurkov S.N. Kineticheskaya kontseptsiya prochnosti tverdykh tel (Kinetic concept of solids strength). Vestnik AN SSSR, 1968. № 3. pp. 3–17.
2. Gor A.Yu., Kuksenko V.S., Tomilin N.G., Frolov D.I. Kongsentratsionnyy porog razrusheniya i prognoz gornyykh udarov (rock Concentration threshold of destruction and rock outburst forecast). FТПРПИ, 1989. № 3. pp. 54–60.
3. Ivanov V.V., Fokin A.N., Pimonov A.G. Novye podkhody k prognozu gornyykh udarov (New approaches to the forecast of rock outburst). Ugol'. 1990. № 10. pp. 39–41.
4. Ivanov V.V., Egorov P.V., Fokin A.N. Prognoz glavnogo seysmicheskogo tolchka na osnove avtomatizirovannogo kontrolya seysmicheskogo rezhima (Forecast of the main earthquake shock based on automated seismic monitoring). Doklady RAN, 1996. Vol. 347. № 6. pp. 808–810.
5. Ruppeneyt K.V. Deformiruemost treshchinovatykh massivov (Deformation of fractured massifs). M.: Nedra, 1975. 221 p.