

УДК 622.834: 550.37

Иванов Вадим Васильевич, профессор, д.т.н., профессор  
(КузГТУ, г. Кемерово)

Пашин Дмитрий Сергеевич, инженер  
(ОАО «Евразруда», г. Новокузнецк)

Ivanov Vadim, professor, doctor of engineering sciences  
(KuzSTU, Kemerovo)

Pashin Dmitry, engineer  
(Evrazruda, Novokuznetsk)

**ИССЛЕДОВАНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО  
СОПРОТИВЛЕНИЯ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД И РУД  
ТАШТАГОЛЬСКОГО РУДНИКА В ПРЕДРАЗРУШЕННОМ  
СОСТОЯНИИ С ЦЕЛЬЮ РАЗРАБОТКИ НОВОГО МЕТОДА  
ПРОГНОЗА ГОРНЫХ УДАРОВ**

**THE STUDY OF ELECTRICAL RESISTIVITY OF HOST ROCKS AND  
ORES OF THE TASHTAGOL MINE IN PRELIMINARY FRACTURE TO  
DEVELOP A NEW METHOD OF PREDICTION OF ROCK BURSTS**

Аннотация

Проведен анализ лабораторных и шахтных измерений удельного электрического сопротивления вмещающих горных пород и руд Таштагольского железорудного месторождения при нагружении до предразрушенного состояния. Результаты позволяют предложить критерии и новый количественный метод прогноза горных ударов.

Abstract

The analysis of laboratory and mine measurements of the electrical resistivity of the enclosing rocks and ores of the Tashtagol iron-ore Deposit at loading to preliminary fracture state. The results allow us to propose criteria and a new quantitative method of forecasting rock bursts.

На ряде рудных месторождений таких, как Таштагольский и Шерегешский рудники, опасных по горным ударам, в настоящее время применяется метод прогноза динамических проявлений горного давления на основе измерений удельного электросопротивления вмещающих горных пород и руд. Для прогноза горных ударов этим методом на рудниках применяется методика в устаревшей редакции конца девяностых - начала 2000 – х годов [1]. Согласно этой методике прогноз удароопасности осуществляется, в основном, на основе абсолютных критических значений удельного электросопротивления

пород и руд, установленных для каждого месторождения в отдельности. По признанию специалистов службы прогноза горных ударов Таштагольского рудника эта методика дает пятидесяти процентную ошибку, т.е. в 50 % случаев она работает, а в остальном - не дает правильного прогноза.

На наш взгляд, коренной недостаток этой методики состоит в том, что она не учитывает возможности резкого изменения значений удельного электросопротивления при незначительном изменении влажности пород, влияния различных вкраплений минералов, естественной нарушенности на абсолютные критериальные значения электросопротивления. Кроме того, в данной методике не учитываются современные представления о кинетике подготовки горных ударов, которые, как будет видно из дальнейшего, позволяют раскрыть закономерности изменения удельного электросопротивления пород и руд при нагружении их до состояния предразрушения, переходящего в процесс неустойчивого развития трещин (разломов) – собственно горный удар или толчок в глубине массива.

Как известно из современных представлений кинетической теории прочности С.Н. Журкова [2], катастрофическому разрушению горных пород (что собственно и представляет собой горный удар) предшествует стадия делокализованного накопления трещин, рассеянного по всему объему нагружаемого участка массива, причем число таких трещин в единице объема массива на конечной стадии подчиняется так называемому концентрационному критерию разрушения [3], т.е. не является произвольным. Данная закономерность не обладает масштабным эффектом, т.е. как это показано в работе [4], справедлива для любого масштаба разрушения, начиная от образцов горных пород до крупномасштабного разрушения (землетрясение).

Основные породообразующие минералы вмещающих пород железорудных месторождений (кварциты, кварцевые диориты, скарны, порфириты, сланцы и др.) являются ионными или ионно - ковалентными структурами, поэтому закономерности электризации щелочно-галоидных соединений имеют место и в таких горных породах [5-10].

Природные минералы, находящиеся под постоянным воздействием температуры, радиации, механических напряжений и т.п. не обладают совершенством структуры, т.е. кристаллическая решетка таких минералов искажена. Простейшими нульмерными дефектами структуры кристаллов являются точечные дефекты, т.е. наличие в решетке межузельных атомов (ионов) или вакансий атомов (ионов). Во всех трех измерениях искажения

решетки вокруг атома (иона) внедрения или вакансии сосредоточены в микроскопическом объеме. Если в кристалле имеются несколько вакансий, то его энергия должна понижаться при их объединении. В результате образуются поливакансии (или микропоры) [5-10].

Другим наиболее распространенным микродефектом структуры является краевая дислокация, представляющая собой одномерный линейный дефект структуры, который образуется при удалении из кристалла половины атомной плоскости и смыкании соседних плоскостей вокруг образовавшегося дефекта.

При механическом нагружении минерала увеличивается как число точечных дефектов структуры (оно может составлять 1 дефект на 10 - 100 атомов (ионов)), так и число дислокаций (наибольшая регистрируемая в кристаллах плотность дислокаций составляет  $10^{12} - 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ).

Отсутствие в узле решетки катиона металла (например, легко отщепляемого иона калия, слабо связанного с тетраэдрическими и октаэдрическими многогранниками в полевых шпатах) эквивалентно отрицательно заряженной катионной вакансии. Замещение металлов одной валентности в структуре решетки на металлы другой равноценно нескомпенсированному заряду ячейки того или иного знака. Диффузия таких точечных дефектов в поле механических напряжений приводит к направленному их потоку, т.е. эквивалентна возникновению тока. Краевые дислокации в минералах, вследствие различия ионных радиусов катионов и анионов структуры, а значит и энергий образования катионных и анионных вакансий, несут линейный заряд, который в равновесном состоянии скомпенсирован облаком дефектов структуры (вакансий или межузельных ионов). Этот заряд также может проявиться в процессе быстрого перемещения дислокаций в поле механических напряжений [6].

Поскольку в кварцсодержащих горных породах высокого удельного электрического сопротивления железорудных месторождений при механическом нагружении и образовании трещин возрастает число заряженных точечных дефектов структуры (особенно вблизи вершины трещин), удельное электрическое сопротивление таких пород должно падать с накоплением числа трещин. Наоборот, в породах с низким электрическим сопротивлением (типа магнетитов и руд) с ростом нарушенности и трещиноватости пород их электрическое сопротивление должно расти.

Для проверки высказанных выше предположений на руднике Таштагол были отобраны образцы вмещающих пород и руд и проведены измерения их удельного электросопротивления при различных нагрузках.

Для испытаний были изготовлены образцы правильной цилиндрической формы. Измерения проводились двухэлектродной установкой по методу охранного кольца, ток через образец и измерение падения напряжения на нем производились с помощью цифровых вольтметра и амперметра. Для улучшения контакта электродов с поверхностью образцов их торцы графитизировались.

Испытания проводились следующим образом. Сначала измерялось электросопротивление образца в ненагруженном состоянии. Затем образец нагружался до некоторого напряжения, вынимался из нагружающего устройства (из плит 10 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.

На рисунках 1 и 2 приведены результаты исследования зависимости удельного электросопротивления вмещающих пород и руд от приложенного к образцу напряжения.

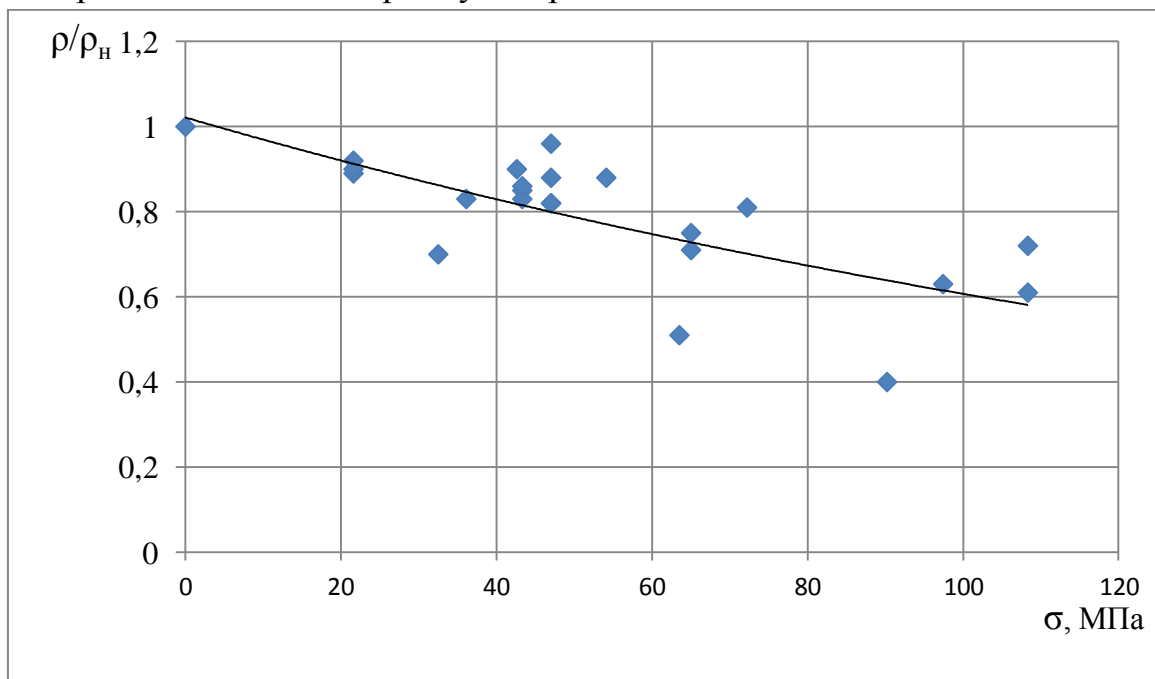


Рис.1 Зависимость приведенного удельного электросопротивления слабопроводящих вмещающих пород от приложенного к образцу напряжения

Зависимость на рис.1 хорошо описывается с помощью линейной функции с коэффициентом корреляции 0,75:

$$\rho/\rho_n = 1 + 0,004 \cdot \sigma,$$

где  $\rho$  – текущее значение удельного электросопротивления при изменении напряжения  $\sigma$ , МПа;  $\rho_n$  – начальное значение удельного электросопротивления до нагружения.

Зависимость на рис.2 хорошо аппроксимируется линейной функцией с коэффициентом корреляции 0,68 :

$$\rho/\rho_n = 1,03 + 0,0025 \cdot \sigma.$$

Как видно из приведенных рисунков, удельное электросопротивление высокопроводящих руд растет с ростом напряжения вплоть до полного разрушения образца, а удельное электросопротивление слабопроводящих вмещающих пород падает с ростом напряжения.

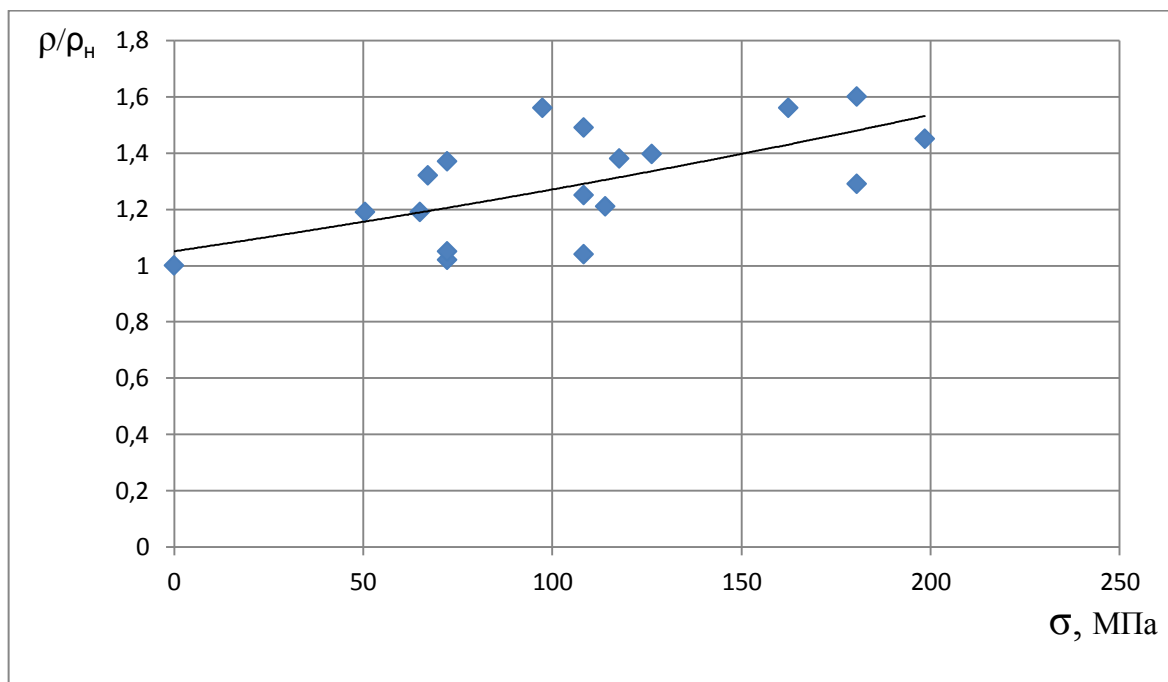


Рис.2 Зависимость приведенного удельного электросопротивления высокопроводящих пород и руд от приложенного напряжения

Ниже в таблице приведены среднестатистические значения относительного изменения удельного электросопротивления вмещающих пород и руд Таштагольского рудника по данным лабораторных исследований. Как видно из таблицы, в предразрушенном состоянии удельное электросопротивление руд возрастает на 40% (теоретическое

значение – 40 % [5], что хорошо коррелирует с данными лабораторного эксперимента), а у вмещающих пород – убывает примерно на 27 %.

Таким образом, полученные критериальные значения изменений удельного электросопротивления пород и руд Таштагольского рудника могут быть использованы для прогноза горных ударов. Для этого необходимо проводить повторные измерения в одних и тех же точках массивов горных пород в местах, опасных по горным ударам, в течение длительного времени и при приближении относительных изменений электросопротивления пород к критериальным значениям принимать меры борьбы с горными ударами.

Анализ экспериментальных баз данных Таштагольского рудника по электрическим измерениям и горным ударам за период с 1998 по 2014 годы показал, что непосредственно перед горными ударами удельное электросопротивление высокопроводящих руд изменяется (возрастает) примерно на 40 %, а электросопротивление вмещающих пород высокого электросопротивления падает примерно на 27 – 35 %, что хорошо

Тип породы	Критериальное значение изменения удельного электросопротивления $\mu = \Delta\rho / \rho$	Примечание
Диориты	0,27	С нагрузкой электросопротивление падает
Порфиритовые диориты	0,39	Электросопротивление падает
Метасоматиты	0,18	Электросопротивление падает
Скарны	0,23	Электросопротивление падает
Магнетиты	0,4	С нагрузкой электросопротивление растёт, при запредельном деформировании и потере несущей способности пород электросопротивление возрастает в 4 – 8 раз
Рудные тела	0,4	Электросопротивление растёт
Руды с содержанием менее 50 %	0,4	Электросопротивление растёт. При запредельном деформировании электросопротивление возрастает в 3 – 5 раз

коррелирует с лабораторными данными.

Таблица

Критериальные значения изменений электросопротивления высокопроводящих руд и пород в предразрушенном состоянии

#### Список литературы

1. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях Горной Шории, склонных и опасных по горным ударам // Изд - во ВостНИГРИ. – Новокузнецк: 2001. – 55 с.

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. Статистическая теория эмиссионных процессов в нагруженных структурно-неоднородных горных породах и задача прогнозирования динамических явлений /В.В. Иванов, П.В. Егоров, А.Г. Пимонов // ФТПРПИ.- 1990.- №4.- С. 59-65.

5. Иванов, В.В. Количественная оценка степени удароопасности массивов горных пород при разработке рудных месторождений электрометрическим методом на основе кинетических представлений о подготовке горных ударов/В.В. Иванов, В.А. Хямяляйнен, Д.С. Пашин // ГИАБ.- 2014. - № 4.- с.195-200.

6. Иванов, В.В. Физические основы электромагнитных процессов при формировании очага разрушения в массиве горных пород [ Текст дисс....докт. техн. наук: Защищена 28.06.1994: утв.15.09.94 / Иванов Вадим Васильевич] – Кемерово, 1994. – 366с.- Библиогр.: с. 296-320.

7. Иванов, В.В. Новые подходы к прогнозу горных ударов/В.В. Иванов, А.Н. Фокин, А.Г. Пимонов // Уголь.- 1990.- №10.- С. 39-41.

8. Троллоп, Г.Х. Введение в механику скальных пород / Г.Х. Троллоп, Х. Бок, Б.С. Бест // М: Мир, 1983. – 276 с.

9. Косевич, А.М. Основы механики кристаллической решетки / А.М. Косевич // М. : Наука, 1972. - 280 с.

10. Головин, Ю.И. Быстропротекающие электрические процессы и динамика дислокаций в пластически деформируемых щелочно – галоидных кристаллах / Ю.И. Головин, А.А.Шибков // ФТТ. – 1986. - Т. 28. – Вып. II. - с.3492 – 3500.