

DOI: 10.25558/VOSTNII.2020.83.93.007

УДК 622.834:550.37

© К.Х. Ли, 2020

К.Х. ЛИ

научный сотрудник

АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово

e-mail: chiterzz@mail.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА УДАРООПАСНОСТИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ КОНЦЕПЦИИ ПОДГОТОВКИ ГОРНЫХ УДАРОВ

Рассматривается методика регионального и локального прогноза удароопасности железорудных месторождений на основе кинетической концепции процесса накопления трещин и подготовки горных ударов. Вводится понятие вероятности горного удара как отношения изменения удельного электросопротивления в процессе подготовки горного удара к электросопротивлению в неудароопасном состоянии и критическому значению его изменений.

Ключевые слова: УДАРООПАСНОСТЬ, ЭЛЕКТРОМЕТРИЯ, МЕТОДИКА, ПРОГНОЗ, ВЕРОЯТНОСТЬ ГОРНОГО УДАРА, КРИТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ.

В работе [1] приведены результаты опытно-промышленных испытаний четырехэлектродного метода кажущегося удельного электрического сопротивления при прогнозе удароопасности вмещающих пород и руд Таштагольского рудника на основе ретроспективного анализа данных службы прогноза и предотвращения горных ударов рудника с 1985 года и по настоящее время. Всего проанализировано более 50 случаев горных ударов и толчков с энергией сейсмических волн от 105 до 109 Дж с размерами зоны разрушений от 20 м до 400 м [1]. Причем из каталога горных ударов и каталога результатов электрометрии выбирались те данные мониторинга, которые касались измерений в тех местах и которые попадали в последующем в зону очага разрушения либо были весьма близки к этому очагу.

В результате этого анализа были получены критические значения изменений электросопротивления горных пород и руд в удароопасном состоянии и предложен крите-

рий удароопасности — вероятность горного удара [1]. В этой связи необходимо создание новой методики прогноза удароопасности железорудных месторождений, поскольку действующая методика, по признанию членов группы прогноза и предотвращения горных ударов рудника Таштагол, не дает достоверного прогноза удароопасности, особенно при работе на глубоких горизонтах рудника. Этой теме и посвящена настоящая статья.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Электрометрические измерения производятся методами подземного электропрофилеирования (ПЭП) и электророндирования (ПЭЗ) с помощью симметричной четырехэлектродной установки (AM = BN) аппаратурой АНЧ-3, ЭРА с использованием переносных (прижимных) реперов-электродов.

Прижимные электроды выполняются в виде чашечек, закрепленных на электроизоляционных рукоятках и заполняемых поро-

лоном, пропитанным раствором соли. Измерительная линия состоит из прижимных электродов и электропроводящих кабелей.

МЕТОД ПОДЗЕМНОГО ЭЛЕКТРОПРОФИЛИРОВАНИЯ (ПЭП) ВЫРАБОТОК

Методом электропрофилеирования выработок вмещающего массива контролируется региональная напряжённость массива, определяются пригруженные участки (блоки) массива, в пределах которых необходимо проведение работ по локальному прогнозу удароопасности. Наблюдения методом ПЭП проводятся в кваршлагах, подводящих к рудным телам, и в полевых штреках на всех эксплуатируемых и вновь вскрываемых горизонтах.

На участках пород с низким удельным электросопротивлением, к которым относятся магнетиты и рудные тела, пригруженные участки отличаются от остальных более высокими значениями электросопротивления. Причем при повторных измерениях в одних и тех же точках массива наблюдается монотонный рост электросопротивления. Непосредственно перед горным ударом или толчком рост УЭС составляет примерно 40 %. Полностью разрушенные участки рудных тел, потерявшие несущую способность, отличаются в несколько раз (иногда более чем на порядок) от остальных пород по электросопротивлению в сторону его роста.

Наоборот, на участках пород с высоким электросопротивлением, к которым относятся диориты, скарны, метасоматиты, порфириты и другие породы, пригруженные части массива отличаются по электросопротивлению от остальных на 27–37 % в сторону уменьшения удельного электросопротивления.

Поскольку сравнение абсолютных значений УЭС на разных участках массивов горных пород не может привести к правильным выводам относительно пригруженных зон, т. к. на результаты измерений очень сильно влияют неоднородность пород в массиве, влажность контура выработок (при зондировании) или поверхности скважин (при измерениях по скважине) и другие факторы, зоны повышен-

ных напряжений при профилировании следует искать по монотонному росту или убыванию УЭС на каких-либо участках массивов при повторных измерениях в одних и тех же точках выработки или скважины.

Вдоль профилей электрометрических наблюдений размечаются пикеты с шагом $AB = 20-25$ м, причем точки установки электродов необходимо размечать так, чтобы они были легко найдены при повторных измерениях даже через большой промежуток времени. Два соседних пикета используются для установки питающих электродов АВ. Приемные электроды MN с расстоянием между ними $MN = 1$ м устанавливаются на равном расстоянии между питающими электродами, при этом $AM = NB = (AB - 1) / 2$ м. Для измерений используют переносные линии и прижимные электроды.

МЕТОД ПОДЗЕМНОГО ЭЛЕКТРОЗОНДИРОВАНИЯ (ПЭЗ) НА КРУПНЫХ БАЗАХ

Метод крупнобазового ПЭЗ предназначен для глубинного контроля массива в районах тектонических нарушений и прогноза горных ударов с энергией 107–109 Дж.

Замеры производятся по следующей схеме. Приемные электроды MN устанавливаются на расстоянии 3 м друг от друга. На равном расстоянии от них устанавливаются питающие электроды АВ. Величины разносов приведены в таблице 1.

Таблица 1
Величины разносов питающей линии
и соответствующие геометрические
коэффициенты установки

AB/2, м	Геометрический коэффициент установки K
7	48,92
9	82,44
11	124,32
13	174,44
15	237,10
20	416,19
25	651,67
30	940,28
35	1280,00
40	1672,50

ТЕХНИКА ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Работа с электрометрической установкой проводится согласно инструкциям по работе с приборами АНЧ-3 или ЭРА. При измерениях в шахте для уменьшения искажающего влияния индуктивного поля питающей линии необходимо следить, чтобы провода питающей и приёмной линий находились не ближе 1 м друг от друга. Данные электрометрических измерений заносят в базу данных (таблица 2). Вычисление электросопротивления пород на участках массива производится по формуле

$$\rho = K \cdot C \cdot \Delta U / I, \text{ Ом}\cdot\text{м}, \quad (1)$$

где ΔU — измеренная разность потенциалов между электродами, мВ; I — измеренная величина тока, мА; K, C — геометрический коэффициент установки и поправочный коэффициент, C — коэффициент, учитывающий геометрические размеры выработки.

Для квершлагов и штреков при методе ПЭП $C = 2$, т. к. $AB/2$ превышает размер сечения выработки более чем в 2 раза, т. е. происходит пространственное распространение электрического тока по массиву.

Коэффициент K вычисляется по формуле

$$K = \pi \cdot AM \cdot AN / MN, \quad (2)$$

где AM, AN, MN — расстояние между электродами.

По формуле (1) вычисляется ρ для каждого замера

Таблица 2

Поля базы данных

Дата измерений
Горизонт
Выработка
Привязка
Метод измерений
Замерный центр
Величина разноса питающей линии, м
Расстояние между приёмными электродами, м
Сила тока, мА
Измеренная разность потенциалов, мВ
Измеренное электросопротивление, ρ , ом·м

При повторных измерениях в одних и тех же точках массива вычисляются изменения ρ в процентах, причем разница УЭС в повторных измерениях относится к первоначальному значению ρ_{in} , по которым для профиля строится график, отражающий изменение ρ во времени в процентах. По вертикальной оси откладываются значения $(\Delta\rho / \rho) \cdot 100$, по оси абсцисс — календарное время в сутках.

Производится сравнение изменений электросопротивления ρ по профилю и по участкам профиля с предыдущими измерениями

для выявления зон пригрузки и разгрузки, установления активных структурных блоков по знакопеременным изменениям ρ в зонах контакта литологических разностей пород и тектонических нарушений, смыканию или их размыканию по аномальным значениям ρ . Если на каком-то участке массива происходит монотонный рост (в рудных телах) или монотонное уменьшение УЭС (для слабопроводящих вмещающих пород), то по результатам анализа определяется необходимость усиленного контроля нагружаемого участка массива и принятия мер безопасности.

ПРОГНОЗ УДАРООПАСНОСТИ МАССИВА ПО ИЗМЕНЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ

Удароопасность массива определяется степенью его напряженного состояния. За критерий удароопасности для электрометрического метода прогноза может быть принята вероятность горного удара

$$P = |(\rho_i - \rho_{in})| / \rho_{in} \cdot \mu, \quad (3)$$

где ρ_i — электросопротивление, получаемое повторными измерениями в одних и тех же нагруженных участках профиля либо в одних и тех же точках ПЭЗ; ρ_{in} — начальное электросопротивление данных участков при неудароопасном состоянии массива (в начальном слабо нагруженном состоянии); μ — критериальное значение изменения электросопротивления участка массива в предразрушенном состоянии, которое определяется для разных горных пород по таблице 3. При вероятности 0,5 и более участок массива считается удароопасным и на таком участке требуется применять профилактические меры борьбы с горными ударами. При вероятности менее 0,4 участок считается неудароопасным. В формуле (3) разность конечного и начального значений электросопротивления берется по абсолютному значению без учета знака этой разницы.

ОЦЕНКА УДАРООПАСНОСТИ ПОРОД ВБЛИЗИ РАЗЛОМОВ

Оценка уровня напряженного состояния в районе тектонических разломов электрометрическим методом в варианте подземного

электрического зондирования основана на том, что шов разлома является электрически плохо проводящей средой, изменяющейся в зависимости от уплотнения или разуплотнения контактов его берегов в результате тектонических подвижек. Изменение плотности контакта берегов разлома приводит к изменению электросопротивления на несколько порядков на исследуемых участках шахтного поля вдоль плоскости сместителя разрывного нарушения. Так как основным фактором, влияющим на возникновение динамических явлений, является положение фронта очистных работ, то измерения рекомендуется выполнять как на уровне бурового, так и откаточного горизонтов, в пределах выработки, пересекающих разлом. Замеры рекомендуется выполнять посредством подземных зондирований, позволяющих производить измерения в глубине массива. При этом рекомендуется разметить точки установки электродов для повторных измерений так, чтобы глубина зондирований была не менее 20 м ($AB/2 = 20$ м). Часть центров установки должна быть выбрана так, чтобы при данной глубине зондирований отсутствовало существенное влияние разлома (вблизи разлома, но не захватывая самого разлома). Причем эти пикеты должны быть расположены по обе стороны разлома. Один-два пикета (центры установки зондирования) должны быть на каждом горизонте расположены так, чтобы питающие электроды располагались по разные стороны разлома. Расстояние MN должно быть много больше мощности разлома, а расстояние АВ определяется максимально необходимой глубиной зондирования.

Таблица 3

Критериальные значения изменения удельного электросопротивления пород в критическом состоянии

Тип породы	Критериальное значение изменения удельного электросопротивления $\mu = \Delta\rho / \rho$	Примечание
Диориты	0,35	С нагрузкой электросопротивление падает
Порфириновые диориты	0,37	Электросопротивление падает
Метасоматиты	0,273	Электросопротивление падает

Тип породы	Критериальное значение изменения удельного электросопротивления $\mu = \Delta\rho / \rho$	Примечание
Скарны	0,32	Электросопротивление падает
Сиениты, сланцы	0,293	Электросопротивление падает
Сиениты	0,282	Электросопротивление падает
Сиениты, микросиениты	0,387	Электросопротивление падает
Скарны, сланцы	0,316	Электросопротивление падает
Сиениты, скарны	0,318	Электросопротивление падает
Сланцы	0,31	Электросопротивление падает
Магнетиты, рудные тела	0,39	С нагрузкой электросопротивление растет, при запредельном деформировании и потере несущей способности электросопротивление возрастает в 4–10 раз

Первым признаком роста напряженного состояния на границах разлома является однопольное изменение УЭС во времени как на пикетах вне зоны влияния разлома, так и на пикетах, захватывающих разлом (рост УЭС для пород с высокой электрической проводимостью и уменьшение — для вмещающих пород со слабой проводимостью). В этом случае рекомендуется повторные измерения проводить чаще и при достижении вероятностью сейсмического явления значения 0,5 принимать меры борьбы с горными ударами.

Количество электрометрических наблюдательных станций определяется положением фронта очистных работ. Глубинность зондирований определяется протяженностью выработок вблизи исследуемой зоны. Все замеры по наблюдательным станциям начинают выполнять до начала ведения очистных работ.

По электрометрическим станциям изменение уровня напряженного состояния и степени удароопасности определяют по разности измеренных значений $\rho_p, \rho_{ин}$, отнесенных к первоначальной измеренной величине $\rho_{ин}$ по формуле (3).

МЕТОДИКА ЛОКАЛЬНОГО ПРОГНОЗА УДАРООПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Для проведения локального прогноза удароопасности при выполнении инструмен-

тальных наблюдений методом электрометрии необходимо, чтобы расположение измерительных и генераторных электродов совпадало с направлением действия максимальных главных напряжений, действующих в массиве.

Оценка напряженного состояния и степени удароопасности руды и вмещающих пород основана на повторных измерениях в одних и тех же точках массива и на закономерном росте либо уменьшении электросопротивления по мере увеличения напряжений и роста числа трещин под действием горного давления. Если нагрузки близки к пределу прочности породы (критическое состояние), происходит развитие микротрещиноватости, перерастающее в лавинообразный процесс, приводящий к динамическому проявлению и резкому возрастанию электросопротивления в запредельном состоянии как для руды, так и для вмещающих пород с высоким удельным электросопротивлением.

Оценка удароопасности участка массива производится на основе измерений и расчета вероятности горного удара по формуле (3).

По степени удароопасности участки массива, примыкающие к выработкам, подразделяются на две категории.

1. При вероятности более 0,5 «Удароопасно» — участки, опасные по проявлению горных ударов, толчков и микроударов, а также опасные по проявлению стреляния и интенсивного заколообразования. Выработка

должна приводиться в безопасное состояние.

2. При вероятности менее 0,4 «Неопасно» — не представляющие непосредственной опасности проявления горного удара, толчка, микроудара, стреляния и заколообразования пород. Выработка может эксплуатироваться без применения профилактических мероприятий.

Фактически категория «Удароопасно» говорит о возможности проявления горного давления в динамической форме.

Таким образом, при вероятности более 0,5 могут происходить динамические проявления. Наблюдения показывают, что характер и интенсивность проявлений признаков и форм горных ударов определяются глубиной и размером очага разрушения. Очаг удара всегда расположен в зоне опорного давления, и чем ближе эта зона к обнажению, тем меньше интенсивность горного удара. В одном случае разрушение протекает в глубине массива и при этом нарушается участок между очагом удара и контуром выработки (микроудар, собственно горный удар), а в другом – непосредственно на контуре выработки (стреляние и т. п.).

После проведения выработок в прилегающем массиве устанавливается напряженное состояние, соответствующее той или иной вероятности сейсмических событий. Однако при этом выработка может эксплуатироваться без применения профилактических меро-

приятий, если вокруг нее не происходит изменения уровня напряженного состояния, т. е. однонаправленного изменения УЭС, особенно в виде динамической пригрузки (взрывные работы, проведение выработок, очистная выемка и т. д.).

Как правило, опасность проявления горных ударов возникает при ведении горных работ на расстоянии до 50 м от участка массива с установленным уровнем «удароопасно». Причем в результате изменений напряженного состояния участка массив из категории «неопасно» может перейти в уровень «удароопасно». Такие ситуации возникают при попадании выработок в зону опорного давления от фронта очистных работ после проведения массовых взрывов.

Величина ρ определяется по формуле $\rho = K \cdot \Delta V / I$, где K — коэффициент, учитывающий влияние выработки и геометрические размеры установки; ΔV — измеряемая разность потенциалов между электродами MN; I — ток, измеряемый между питающими электродами АВ.

Наиболее оптимальные расстояния между питающими и измерительными электродами для получения более полных сведений о состоянии массива в зоне опорного давления, а также соответствующий им коэффициент K для различных параметров выработок, даны в таблице 4.

Таблица 4

Рекомендуемые разносы при ПЭЗ и коэффициент K , учитывающий влияние размеров выработки и геометрически размеры установки

AB/2, м	MN/2, м	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
0,5	0,2	1,54	1,54	1,52	1,5	1,48	1,48	1,48
0,7	0,2	3,53	3,53	3,29	3,25	3,21	3,21	3,18
1	0,2	7,8	7,57	7,04	7,04	6,96	6,96	6,96
1,2	0,2	11,7	11,2	11	10,2	10,2	10,2	10,2
1,5	0,2	19	18,2	17,6	17,3	17,3	16,1	16,1
2	0,2	40,2	34,5	33,3	32,3	32	31,4	29,2
2,5	0,2	74,5	59,9	53,6	52,1	50,6	50,2	48,7
3	0,2	116,3	102,2	86,7	77,5	75,4	74	71,9
4	0,2	222,5	206,2	187,5	160	143,7	137,5	132,5
5	0,2	368	343	323	300	265	241	216

AB/2, м	MN/2, м	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
6	0,2	550	522	488	465	437	409	338
7	0,2	760	730	699	661	634	599	518
9	0,2	1270	1251	1213	1175	1118	1080	1003
11	0,2	1000	1891	1872	1824	1767	1710	1606
13	0,2	2652	2652	2639	2599	2546	2480	2346
13	0,4	1326	1326	1319	1299	1273	1240	1173
15	0,2	3530	3530	3530	3495	3460	3389	3265
15	0,4	1765	1765	1765	1746	1729	1693	1632
17	0,4	2268	2268	2268	2268	2245	2222	2155
19	0,4	2832	2832	2832	2832	2818	2789	2704
22	0,4	3798	3798	3798	3798	3798	3798	3741
25	0,4	4904	4904	4904	4904	4904	4904	4855
30	0,4	7064	7064	7064	7064	7064	7064	7064

Четырёхэлектродный зонд монтируется по схеме А 0,37 М 0,06 N 0,37 В или А 0,3 М 0,2 N 0,3 В в зависимости от свойств горных пород; соответственно К = 16,65 и 4,72.

Методика наблюдений с помощью ПЭЗ для оценки степени удароопасности массива заключается в следующем. Для выявления удароопасных участков в зоне влияния очистных работ на протяжении 100 и более метров от зоны обрушения производят по профильным линиям определение значений удельного электрического сопротивления до начала ведения очистных работ как на уровне горизонта подсечки, так и на буровом горизонте, при условии отработки разрезного блока. Такие наблюдения выполняют также до начала проведения технологических операций по образованию подсечки, отрезной щели, массового взрыва. Первый замер обозначается через ρ_{in} и является базовым замером исходного напряжённого состояния.

После проведения какой-либо из перечисленных технологических операций замер повторяется в тех же самых пунктах и точках установки электродов. При этом должно быть соблюдено полное совпадение установки измерительных электродов.

Разность измеренных значений, отнесенная к базовой из измеренных величин, отражает истинный характер изменения напряженного состояния на участках, где горные

породы обладают существенным различием электрических свойств в пределах профиля.

По электрометрическим станциям изменение уровня напряженного состояния участков массива определяют по разности измененных значений, отнесенных к измеренной начальной величине ρ_{in} по формуле

$$|\rho_i - \rho_{in}| / \rho_{in},$$

где ρ_{in} — значения первоначального замера, который рекомендуется выполнять в период минимума сейсмической активности; ρ_i — значение второго и последующего замеров. Затем производится расчет вероятности горного удара по формуле (3).

При этом значение вероятности 0,1 соответствует границе влияния производственных процессов; при вероятности менее 0,3 массив разгружен; при вероятности 0,5 и более массив опасен по горным ударам; при вероятности более 8–10 произошла потеря несущей способности и устойчивости части массива. Положение удароопасного участка определяется по глубине зондирования в зависимости от значений параметра вероятности.

Единичные измерения ПЭЗ, проведенные в однородном массиве, соответствуют характеру изменения напряженного состояния в пределах исследуемого региона. Участки, на которых отмечено монотонное умень-

шение УЭС, либо увеличение ρ для данной разновидности пород, должны периодически проверяться.

Для оценки степени удароопасности необходимо знать такие параметры, как величина удельного электрического сопротивления пород нетронутого массива ρ_{in} . Значения ρ_{in} определяются из кривой ПЭС. Определить ρ_{in} можно либо по электрокаротажным диаграммам на данном участке массива, либо по кривой ПЭС на глубине свыше 7 м (вне зоны

влияния очистных выработок). При этом величину ρ_{in} рекомендуется определять в период минимума сейсмической активности массива.

При установлении категории «удароопасно» в одном из направлений выработка приводится в неудароопасное состояние. В выработках, проводимых на капитальных и подготовительных работах, где прогноз осуществляется по передовой скважине, необходимо знать ориентировку главных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.В., Ли К.Х. Количественный прогноз удароопасности вмещающих пород и руд Таштагольского месторождения на основе измерений удельного электросопротивления пород в состоянии предразрушения перед динамическими проявлениями горного давления // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2018. № 3. С. 20–33.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2020.83.93.007

UDC 622.834: 550.37

© K.Kh. Lee, 2020

K.Kh. LEE

Researcher

JSC «NC VostNII», Kemerovo

e-mail: chiterzzz@mail.ru

DEVELOPMENT OF METHOD OF ELECTROMETRIC PREDICTION OF IMPACT HAZARD OF IRON ORE DEPOSITS BASED ON KINETIC CONCEPT OF MINING IMPACT PREPARATION

The method of regional and local prediction of impact hazard of iron ore deposits on the basis of kinetic concept of crack accumulation process and preparation of mining impacts is considered. The concept of probability of rock impact as ratio of change of specific electric resistance in process of preparation of rock impact to electric resistance in non-hazardous state and critical value of its changes is introduced.

Keywords: IMPACT HAZARD, ELECTROMETRICS, TECHNIQUE, FORECAST, PROBABILITY OF ROCK IMPACT, CRITICAL CHANGES OF ELECTRIC RESISTANCE.

REFERENCES

1. Ivanov V.V., Lee K.Kh. A quantitative forecast of the impact hazard of host rocks and ores of the Tashtagol deposit based on measurements of the electrical resistivity of rocks in a state of prefracture before dynamic manifestations of rock pressure // Bulletin of the Scientific Center for the Safety of Work in the Coal Industry. 2018. No. 3. P. 20–33. (In Russ.).