

На правах рукописи



Ли Константин Хиунович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА
ПРОГНОЗА УДАРООПАСНОСТИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ЦЕЛЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНЫХ
УСЛОВИЙ ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ**

Специальность 05.26.03 –
Пожарная и промышленная безопасность (горная промышленность)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово 2020

Работа выполнена в акционерном обществе «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли (АО «НЦ ВостНИИ»))»

Научный руководитель **Иванов Вадим Васильевич**, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник АО «НЦ ВостНИИ»

Официальные оппоненты **Еременко Виталий Андреевич**, доктор технических наук, директор научно-исследовательского центра «Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии» НИТУ МИСиС

Ким Татьяна Леонидовна, кандидат технических наук, заведующая кафедрой физики Кузбасского государственного технического университета

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук»

Защита состоится «11» декабря 2020 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 520.063.03 при АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» по адресу: 650002, г. Кемерово, ул. Институтская, 3

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте АО «НЦ ВостНИИ»:

<http://www.nc-vostnii.ru/napravleniya-deyatelnosti/nauchno-obrazovatel'naya-deyatelnost/soiskateli.php>

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь совета Д 620.063.03



Д.В. Ботвенко

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Безопасность ведения горных работ на железорудных месторождениях представляет собой одну из важнейших составляющих политики в сфере горной промышленности. Динамические формы проявления горного давления, включая удароопасность при ведении горных работ, являются одной из причин нарушения нормальной работы предприятий и часто приводят к несчастным случаям на производстве. В настоящее время к опасным и склонным к горным ударам месторождениям отнесены 43 рудных месторождения России. К разрабатываемым железорудным месторождениям Кузбасса относятся Таштагольское, Шерегешское и Казское месторождения. В настоящее время Таштагольское месторождение с глубины 600 метров отнесено к удароопасным, а Шерегешское и Казское – к опасным и склонным к горным ударам. Среди рассмотренных месторождений выделяется Таштагольское, которое является наиболее удароопасным, кроме того, область, в которой расположены вышеперечисленные месторождения характеризуется повышенной сейсмической активностью (до 7–8 баллов по шкале Рихтера). Наиболее важными причинами возникновения динамических явлений в массивах горных пород данных месторождений являются высокие тектонические напряжения и большие площади обнажения при ведении взрывных горных работ.

Начиная с 1959 года на Таштагольском руднике регистрируются случаи динамических проявлений горного давления. Так с 1983 по 2011 год на этом руднике зарегистрировано 10 случаев горных ударов, 11 случаев микроударов, 18729 случаев толчков, 31 случай стрельяния, 76 случаев интенсивного заколообразования, т. е. всего 18857 динамических явлений. С 2015 года четырехэлектродный метод кажущегося удельного электросопротивления (КУЭС) является базовым при региональном и локальном прогнозе удароопасности на Таштагольском руднике. Однако, по признанию работников службы прогноза и предотвращения горных ударов рудника, предлагаемая методика прогноза в 50 % случаев, начиная с 1985 года, не дает объективной оценки удароопасности. Причина, на наш взгляд, заключается в том, что методика прогноза удароопасности строится на абсолютных значениях кажущегося удельного электросопротивления пород, которые подвержены существенному влиянию влажности, вкраплений руды, вкраплений минералов разного электросопротивления и других факторов, что приводит к разбросу значений КУЭС на сотни и даже тысячи процентов.

В связи с вышесказанным, совершенствование методики электрометрического прогноза удароопасности железорудных месторождений, существенно повышающей точность прогноза и обеспечивающей безопасность ведения горных работ, является актуальной научной задачей.

Диссертационная работа выполнена в рамках целевой программы «Система обеспечения охраны труда, промышленной и экологической безопасности, предупреждения крупных аварий и катастроф на предприятиях горной отрасли», утвержденной генеральным директором АО «НЦ ВостНИИ», как отдельный этап

работы «Разработка системы информационной поддержки контроля и управления технологическими и производственными процессами для обеспечения промышленной безопасности и охраны труда» (раздел 3, направление 4.1 целевой программы).

Целью работы является совершенствование методики электрометрического прогноза удароопасности железорудных месторождений на основе кинетической концепции подготовки горных ударов для обеспечения безопасных условий ведения горных работ.

Задачи исследований:

- установить характер изменения удельного электросопротивления железных руд и вмещающих пород при повышении напряжений, вплоть до разрушающих;
- определить критические значения изменения удельного электросопротивления руд и пород при подготовке динамического события;
- ввести показатель удароопасности железорудного массива на основе изменения удельного электросопротивления и сравнения его с критическим значением.

Идея работы состоит в том, что повышение достоверности и точности прогноза удароопасности железорудных месторождений возможно путем установления количественных критериев изменения удельного электросопротивления рудного тела и вмещающих пород в процессе накопления трещин при повышении механических напряжений вплоть до разрушения.

Объект исследования – удароопасный железорудный массив горных пород.

Предмет исследования – электросопротивления руд и вмещающих пород в процессе нагружения и трещинообразования.

Методы исследования. В работе использованы методы теоретического анализа и статистической обработки результатов лабораторного и шахтного эксперимента – при исследовании зависимости КУЭС руд и вмещающих пород от механических напряжений и их трещиноватости, а также метод ретроспективного анализа случаев динамических форм проявлений горного давления (горных ударов и толчков) на Таштагольском руднике – при установлении критериальных изменений КУЭС руд и вмещающих пород на основе данных службы прогноза и предотвращения горных ударов рудника, начиная с 1985 года.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. В процессе повышения механических напряжений и подготовки горного удара удельное электросопротивление железорудных тел растет вследствие накопления трещин, а удельное электросопротивление вмещающих пород при этом уменьшается за счет накопления на поверхности трещин заряженных точечных дефектов кристаллической структуры.

2. Критическое увеличение удельного электросопротивления железорудных тел перед разрушением составляет 40 %, а критическое уменьшение удельного

электросопротивления вмещающих пород при этом достигает 27-37 % в зависимости от их минерального состава.

3. Критерием удароопасности руд и пород может служить показатель, определяемый как отношение изменения удельного электросопротивления массива в одних и тех же точках по сравнению с начальным электросопротивлением в неудароопасном состоянии к начальному электросопротивлению и критическому изменению удельного электросопротивления данных участков в предразрушенном состоянии, определяемому предварительно. При значении показателя 0,5 и выше устанавливается категория «удароопасно», при значении ниже 0,5 – «неопасно».

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в работе, подтверждаются:

- представительным объемом статистической информации об изменениях КУЭС пород и руд перед горными ударами и толчками рудника Таштагол (1985–2019 гг.);

- достаточным объемом лабораторных экспериментальных данных и оценкой их результатов методами математической статистики (коэффициенты корреляции зависимостей изменений КУЭС пород и руд от механических напряжений от 0,69 до 0,96);

- значимым (с доверительной вероятностью 0,95) совпадением результатов опытно – промышленной проверки критических изменений КУЭС пород и руд в удароопасном состоянии с результатами лабораторных и теоретических исследований.

Научная новизна работы.

1. Предложен кинетический подход к обоснованию процесса подготовки горных ударов и установлены количественные закономерности влияния механических напряжений и процесса накопления трещин на КУЭС пород и руд железорудных месторождений.

2. Установлены масштабные нечувствительные количественные критерии изменений КУЭС пород и руд железорудных месторождений с начала процесса подготовки горного удара и до критического удароопасного состояния.

3. В качестве количественного критерия удароопасности пород и руд железорудных месторождений предложен новый показатель удароопасности.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии кинетической теории прочности и разрушения горных пород, на основе которой сформулирован новый критерий удароопасности и установлены закономерности изменения КУЭС руд и вмещающих пород в удароопасном состоянии.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Разработана методика электрометрического прогноза удароопасности рудных тел и вмещающих пород железорудных месторождений, основанная на кинетической концепции прочности и разрушения горных пород, позволяющая существенно повысить точность прогноза и безопасность ведения горных работ.

2. На основе ретроспективного анализа данных электрометрических измерений на Таштагольском руднике (начиная с 1985 года и по настоящее время) проведена опытно – промышленная проверка методики электрометрического прогноза удароопасности пород и руд и проверены установленные критерии изменений их КУЭС в удароопасном состоянии.

3. Результаты исследований рекомендованы службе прогноза и предотвращения горных ударов Таштагольского рудника и могут быть использованы для прогноза удароопасности других железорудных месторождений России.

Реализация результатов работы.

Научные положения, выводы и рекомендации диссертационного исследования были использованы при разработке методики электрометрического прогноза удароопасности железорудных месторождений и переданы для внедрения службе прогноза и предотвращения горных ударов рудника Таштагол.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и были одобрены на научно-технических семинарах и совещаниях АО «НЦ ВостНИИ» (в 2016–2020 годах), на Международных конференциях «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (Сибресурс – 2018, 2019)», на Всероссийских научно-практических конференциях молодых ученых с Международным участием «Россия молодая» (г. Кемерово, 2019–2020 гг.), на технических совещаниях ОАО «Евразруда» (2018–2019 гг.).

Личный вклад автора заключается в проведенном анализе существующей нормативной базы по прогнозированию динамических явлений на железорудных месторождениях, установлении характера изменения удельного электросопротивления железных руд и вмещающих пород при повышении напряжений, вплоть до разрушающих, определении критических значений изменения удельного электросопротивления руд и пород при подготовке динамического события и введении показателя удароопасности железорудного массива на основе изменения удельного электросопротивления и сравнения его с критическим значением. Проведенные автором исследования и разработанный метод прогнозирования динамических явлений на железорудных месторождениях являются практически значимыми и вносят весомый вклад в развитие горной науки.

Публикации. Основные результаты работы отражены в 7 публикациях, в том числе в 5 работах, рекомендованных ВАК РФ, включая один патент на изобретение, выпущен один нормативный документ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав заключения, изложенных на 119 страницах, содержит 12 рисунков, 25 таблиц, список литературы из 115 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во вводной главе диссертации проведен анализ литературы по динамическим проявлениям горного давления на угольных и рудных предприятиях, основным гипотезам возникновения сейсмических событий, прогнозу и контролю динамических явлений, существующим методам контроля сейсмических явлений, характеристике железорудных месторождений Кузбасса, включая Таштагольское железорудное месторождение.

Начиная с 1959 года на Таштагольском руднике зарегистрировано 18857 случаев динамических проявлений горного давления. Поэтому задача разработки надежного метода прогноза удароопасности месторождения является весьма актуальной. Решение этой задачи должно строиться на известных концептуальных принципах и теориях подготовки сейсмических явлений.

Основными гипотезами возникновения сейсмических явлений, а также исследованиями в области разработки геофизических методов контроля и прогнозирования НДС и удароопасности массива горных пород, занимались отечественные и зарубежные ученые Авершин С.Г., Барях А.А., Ваганова В.А., Гольдин С.В., Гохберг М.Б., Гор А.Ю., Григорян, С.С., Добровольский И.П., Дырдин В.В., Егоров П.В., Еременко А.А., Еременко В.А., Журков С.Н., Иванов В.В., Курленя М.В., Куксенко В.С., Касахара К., Костров Б.В., Копытов А.И., Ким Т.Л., Мезенцев К.Т., Мячкин В.И., Моги К., Пимонов А.Г., Петухов И.М., Соболев Г.А., Трофимов И.М., Тарасов Б.Г., Шемякин Е.И., Baily J., Reid H.F., Benioff H., Bullen K.E., Bath M., Scholz C.H., Phillips D., Rice G.S., Uyshima M. Наиболее близкими к реальности гипотезами возникновения сейсмических явлений, являются кинетические подходы к описанию процесса подготовки сейсмического события, содержащиеся в работах Мячкина В.И., Соболева Г.А., Шаминой О.Г., кинетическая концепция прочности Журкова С.Н., Куксенко В.С., Петрова В.А., дилатантно-диффузионная модель Anderson D.L., Scholz C.H., модель с неоднородностью или консолидированным включением Добровольского И.П., двухстадийная кинетическая модель подготовки сейсмических событий и, в частности, горных ударов, предложенная Ивановым В.В..

В настоящее время, наиболее простым в практическом использовании методом прогноза удароопасности железорудных месторождений, нашедшим широкое применение, является электрометрический метод кажущегося удельного электрического сопротивления (КУЭС), однако действующая методика электрометрического прогноза удароопасности требует серьезной корректировки, т. к. не учитывает современных представлений о процессе подготовки горных ударов и основана на показателе удароопасности, использующем абсолютные значения удельного электросопротивления пород и руды. На основе анализа сформулирована цель и поставлены задачи исследований. Основные результаты исследования отражены в следующих защищаемых положениях:

1. В процессе повышения механических напряжений и подготовки горного удара удельное электросопротивление железорудных тел растет вследствие накопления трещин, а удельное электросопротивление вмещающих пород при этом уменьшается за счет накопления на поверхности трещин заряженных точечных дефектов кристаллической структуры.

Земная кора состоит из трех слоев (осадочного, гранитного и базальтового). Горизонтальная неоднородность земной коры определяется ее делением на континентальную, океаническую и кору переходного типа (сочетание первых двух типов слагает области шельфа, океанических хребтов и островных дуг).

В результате магматических, метаморфических, тектонических процессов и процессов осадкообразования земная кора резко дифференцирована, в ней протекают сложные процессы концентрации и рассеяния химических элементов, приводящие к образованию различных типов пород: магматических, метаморфических, осадочных и др.

Наиболее распространенным химическим элементом твердой оболочки земной коры является кислород, массовая доля которого составляет 46,6 %. За ним следуют в порядке убывания кремний (27,7 %), алюминий (8,1 %), железо (5 %), кальций (3,6 %), натрий (2,8 %), калий (2,6 %) и магний (2 %), составляющие вместе примерно 98 % всех элементов земной коры. Объемная доля ионов кислорода в кристаллах таких породообразующих минералов, как кварц, ортоклаз, мусковит, составляет 87–97 %, поэтому не подлежит сомнению, что геометрия размещения сфер, представленных кислородными анионами, имеет решающее значение в строении этих кристаллов. В изверженных вмещающих породах рудника Таштагол существенное значение имеет наличие в слагающих их минералах таких элементов как калий, натрий, магний и железо. Отсутствие в некоторых узлах кристаллической решетки минералов одного из этих элементов называется катионной вакансией. При нагружении горных пород и образовании трещин катионы металлов и их вакансии приходят в движение, что приводит к появлению разделения зарядов на берегах трещин и соответствующему изменению их удельного электросопротивления.

При накоплении трещин в процессе механического нагружения вмещающих горных пород Таштагольского рудника возрастает число заряженных точечных дефектов структуры на их берегах, удельное электрическое сопротивление таких пород падает с накоплением числа трещин. Наоборот, в рудных телах (и магнетитах) с ростом нарушенности их электрическое сопротивление растет.

Теоретическими расчетами, которые проведены проф. Ивановым В.В. на основе теории линейных электрических цепей с учетом закономерностей деформирования трещиноватых массивов, показано, что, действительно, электрическое сопротивление высокопроводящих пород (магнетиты, рудные тела) при накоплении трещин растет вплоть до значения его изменения на 40 % в критическом состоянии, а электросопротивление вмещающих пород низкой проводимости при этом падает на 23–39 %. Из этих исследований также следует,

что полученные результаты не зависят от масштаба разрушения, т. е. от энергии готовящегося горного удара.

Для изучения зависимости удельного электросопротивления горных пород от механических напряжений были проведены испытания согласно ГОСТ 25494–82.

При обработке результатов измерений рассчитывалось изменение в процентах электросопротивления образца на каждом этапе нагружения (см. табл. 1, 2). В табл. 1, 2 приведены некоторые результаты изучения изменения электросопротивления высокопроводящих руд и низкопроводящих вмещающих пород Таштагольского рудника. Анализ результатов говорит о том, что для высокопроводящих пород при нагружении характерно увеличение удельного электросопротивления с ростом прикладываемой нагрузки, т. к. при этом число накапливаемых трещин в образце растет, как и следует из теории. Для предельного состояния (максимальное напряжение σ на образце) характерно увеличение удельного электросопротивления пород на 30–50 %, среднее значение изменения электросопротивления образцов в критическом состоянии составляет 37 %, что практически совпадает с теоретическим значением (40 %).

Результаты измерений на образцах высокопроводящих горных пород также дают возможность оценить изменение удельного электросопротивления пород, полностью потерявших свою несущую способность (см. табл. 1). В этом случае рост удельного электросопротивления составляет сотни и даже тысячи процентов. Такого рода изменения ранее регистрировались службой прогноза и предотвращения горных ударов Таштагольского рудника на участках массивов с низким удельным электросопротивлением перед горными ударами и толчками. На рис. 1, 2 приведены примеры полученных зависимостей приведенных электросопротивлений данных пород и руд от приложенных к образцам напряжений, а также уравнения регрессии и коэффициенты корреляции этих статистических зависимостей. Данные рисунки также подтверждают ранее установленные теоретические закономерности.

На основании вышеизложенного сделан следующий вывод: в процессе подготовки горного удара удельное электросопротивление железорудных тел растет вследствие множественного накопления трещин вплоть до критических значений, электросопротивление же вмещающих пород падает вплоть до критических значений вследствие накопления на поверхности трещин большой концентрации заряженных точечных дефектов структуры, обусловленных минеральным составом пород, причем критические значения изменений удельного электросопротивления не зависят от масштаба готовящегося сейсмического события.

Таблица 1 – Высокопроводящие породы

Тип породы	Электросопротивление, ом	ρ , ом·м	$\Delta\rho/\rho$, %	Напряжение на образце, примечание МПа	
Магнетит, 60 % Орт 23	5,53	0,187	0	0	
	6,60		19,3	50,5	
	8,63		56	97,4	
	7,17		30	180,5	Трещины
	22,7		484	108,3	Образец сильно разрушен
Магнетит, 60 % 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, 60 % 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	Сильное разрушение
16 рудное тело 23 орт руда	68979,6	2024	0	0	
	94729,7		37,3	72,2	сколы
	107878,8		56,4	162,4	Сильно разрушен

Таблица 2 – Породы с высоким удельным электросопротивлением

Тип породы	Электросопротивление, 10^6 , ом	$\Delta\rho / \rho$, %	ρ , 10^6 , ом·м	σ , МПа	Примечание
Диорит	11,2	0	337	10,8	
	3,33	71		18,8	Сильно разрушен
Диорит	38,5	0	1160	0	
	46,1	-		36,1	Скол края
	19,4	50		63,5	Сильно разрушен
Диорит	35,85	0	1014	0	
	40,37	12,6		21,6	
	30,28	15,5		43,3	
	25,5	28,9		65	
	25,5	28,9		65	Через 10 мин. образец
	14,14	60,5		90,2	сильно разрушился
Диорит	19,7	0	608	0	

Тип породы	Электросопротивление, 10^6 , ом	$\Delta\rho / \rho$, %	ρ , 10^6 , ом·м	σ , МПа	Примечание
	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
Порфиритовый диорит	37,11	0	1142	0	
	33,68	9,2		21,6	
	34,6	6,8		43,3	
	33,63	9,4		42,6	Образец не разрушился
Метасоматит	6,8	0	183	0	
	5,98	12,1		47	Трещина
	6,12	10		72,2	Множественные трещины
Метасоматит	7,1	0	209	0	
	6,15	12,9		47	
	7,8	10,5		54,7	Множественные

Зависимость приведенного электросопротивления от напряжения на образце, МПа: приведенное электросопротивление: $y = 1,1207 + 0,002 \cdot x$; $r = 0,694$

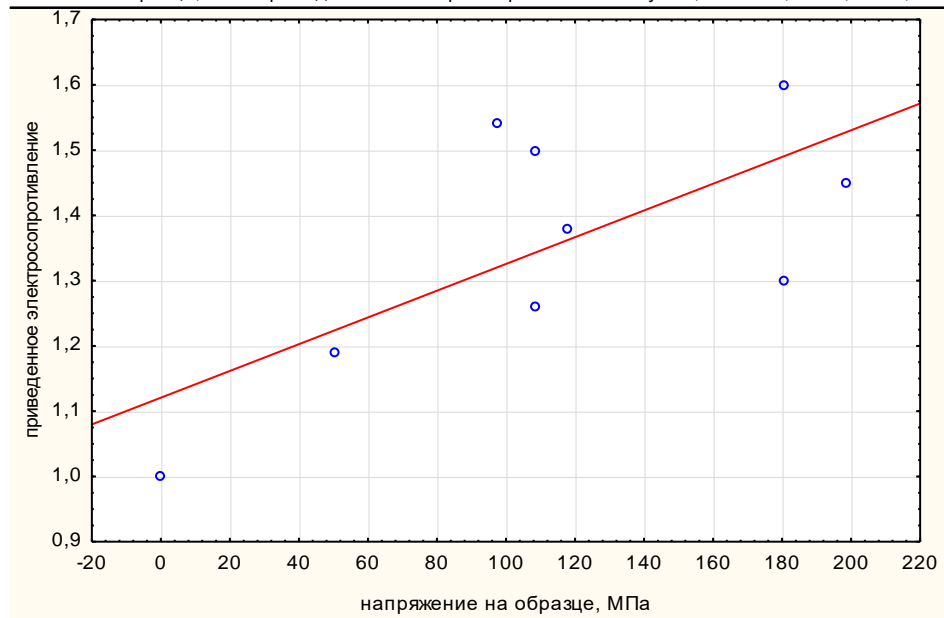


Рисунок 1 – Зависимость приведенного электросопротивления (к электросопротивлению в ненагруженном состоянии) образца магнетита от приложенного к образцу напряжения

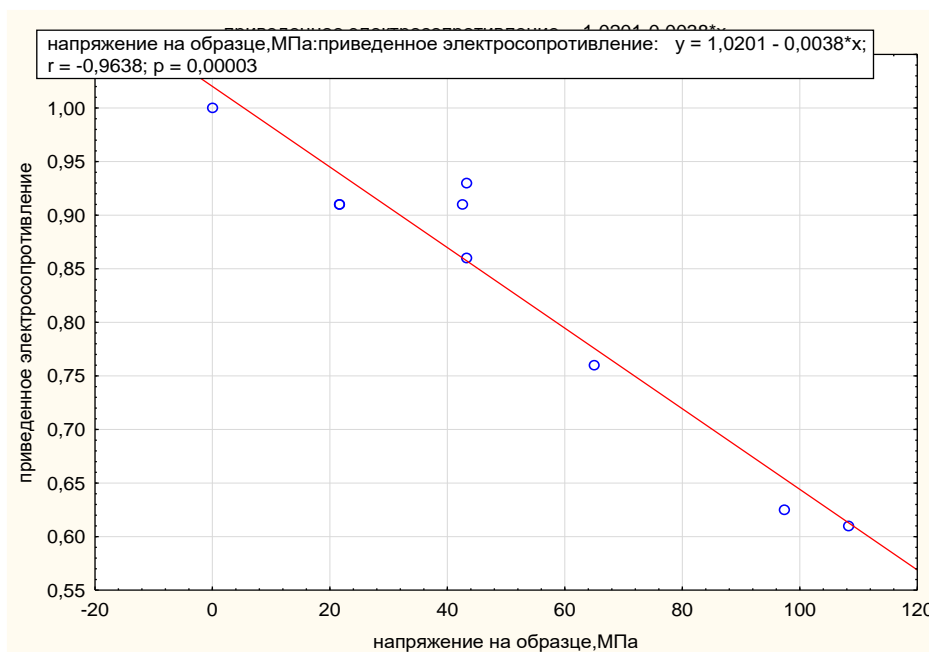


Рисунок 2 – Зависимость приведенного электросопротивления от напряжения на образце порфиритового диорита

2. Критическое увеличение удельного электросопротивления железорудных тел перед разрушением составляет 40 %, а критическое уменьшение удельного электросопротивления вмещающих пород при этом достигает 27-37 % в зависимости от их минерального состава.

Проверка разработанных принципов прогноза удароопасности по электрометрическим измерениям осуществлялась на основе данных службы прогноза и предотвращения горных ударов рудника (ППГУ), начиная с 1985 года и по настоящее время. Результаты измерений выбирались исходя из тех условий, чтобы они были проведены, во-первых, за несколько месяцев перед горным ударом или толчком, во-вторых, в непосредственной близости от места гипоцентра сейсмического события (на расстоянии не более 100 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). Поскольку процесс подготовки горного удара представляет собой кинетический, т. е. протекающий во времени процесс накопления трещин, то удельное электрическое сопротивление (УЭС) горных пород, согласно результатам теоретических и лабораторных исследований, должно для пород с большим электрическим сопротивлением (сиениты, сланцы, скарны, диориты, порфириты и др.) убывать непосредственно перед горным ударом или толчком на 27–37 %, а для высокопроводящих пород (магнетиты и руды) – возрастать примерно на 40 %. Далее в таблице 3 приведены некоторые результаты шахтных измерений изменения удельного электросопротивления вмещающих пород и руд

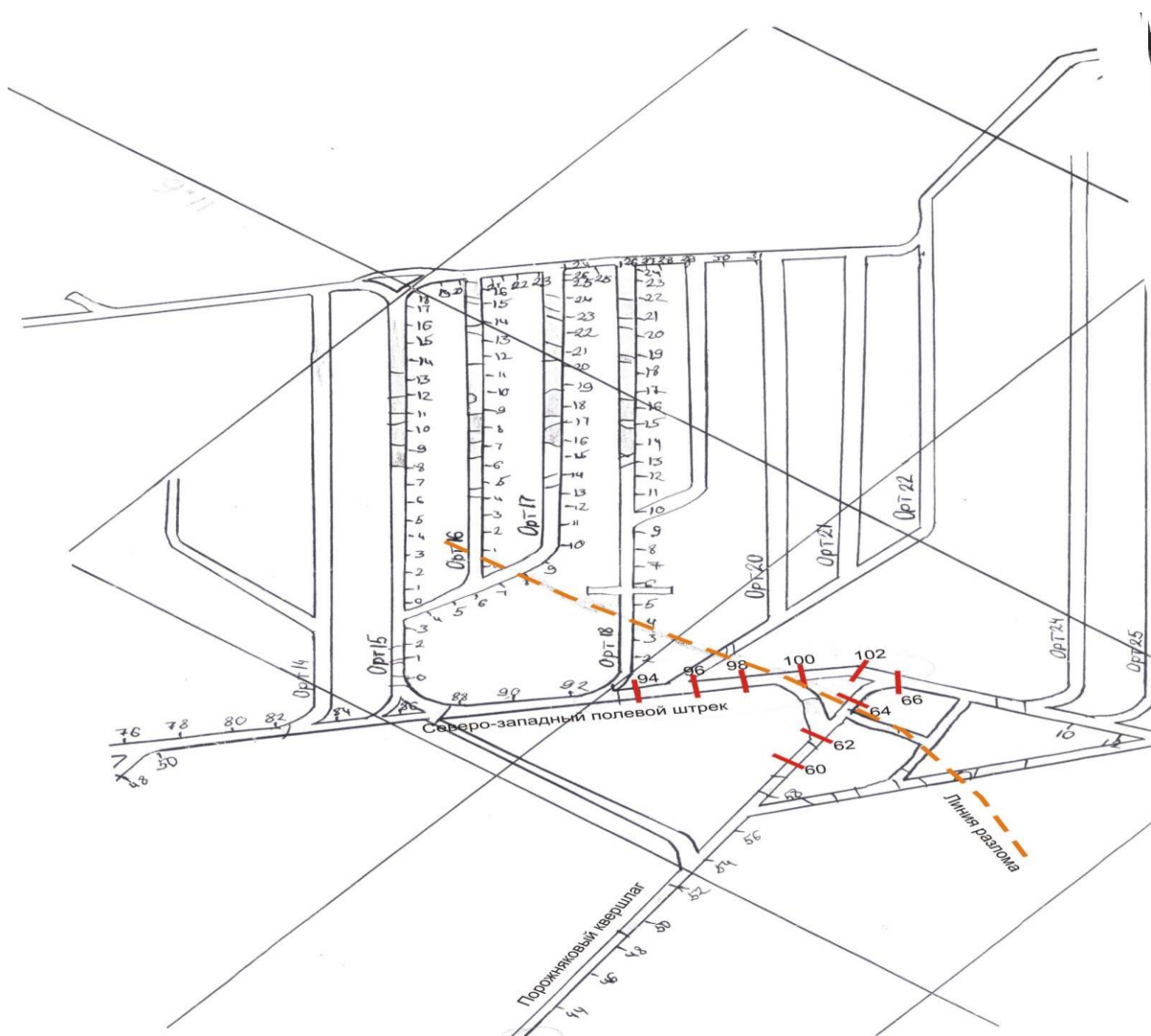
Таштагольского рудника непосредственно перед горными ударами и толчками (проанализировано более 50 случаев горных ударов и толчков). Измерения осуществлялись как методом подземных электрических зондирований с полуразносом питающих электродов $AB/2 = 20$ м (эти данные приведены в таблице 3 также вблизи тектонического разлома на горизонте – 280), так и методом каротажа в скважинах. На рисунке 3 приведены центры установки для электрических зондирований вдоль северо-западного полевого штрека и порожнякового квершлага на горизонте–280 вблизи тектонического разлома, обозначенные как п. 10, 54, 102 и т. д. Как следует из результатов анализа, за один–два месяца до горного удара или толчка, а также в процессе подготовки сейсмического события, в породах с высоким электрическим сопротивлением наблюдается однонаправленное изменение УЭС, а именно – уменьшение электросопротивления, причем непосредственно перед горным ударом или толчком это уменьшение составляет, по данным таблицы 4, от 27 до 37 %. В породах с низким удельным электросопротивлением, наблюдается монотонный его рост, причем непосредственно перед горным ударом или толчком этот рост достигает почти 40 % (см. табл. 4). Особый интерес представляют собой измерения вблизи тектонического разлома (см. табл. 3, рис. 3). Здесь при зондировании пород вне разлома непосредственно перед горным ударом или толчком наблюдается уменьшение удельного электросопротивления слабопроводящих горных пород в тех же пределах, что и на других участках измерений. Для рудного тела непосредственно перед сейсмическим событием наблюдается рост УЭС. При зондировании пород в самом тектоническом разломе или при такой глубине зондирования, при которой часть пород разлома попадает в зону зондирования, непосредственно перед сейсмическим событием наблюдается падение УЭС вмещающих пород, а после удара или горно-тектонического толчка – резкий рост электросопротивления по всем пунктам зондирования, иногда в несколько раз, что связано сначала с закрытием трещин и пор, а затем – с масштабным разрушением горных пород.

В результате вышеизложенного сделан следующий вывод: при накоплении трещин в процессе подготовки горного удара наблюдается закономерный рост удельного электросопротивления рудных тел вплоть до критического значения его изменения, составляющего 40 %, и закономерное же уменьшение электросопротивления вмещающих пород вплоть до критического значения, составляющего 27–37 % в зависимости от минерального состава пород, причем эти критические значения не зависят от масштаба разрушения, т. е. от энергии готовящегося горного удара или толчка.

3. Критерием удароопасности руд и пород может служить показатель, определяемый как отношение изменения удельного электросопротивления массива в одних и тех же точках по сравнению с начальным электросопротивлением в неудароопасном состоянии к критическому изменению удельного электросопротивления данных участков в

предразрушенном состоянии, определяемому предварительно. При значении показателя 0,5 и выше устанавливается категория «удароопасно», при значении ниже 0,5 – «неопасно».

В шахтных условиях электрометрические измерения производятся методами подземного электропрофилирования (ПЭП) и электротондирования (ПЭЗ) с помощью симметричной четырехэлектродной установки. Методом электропрофилирования 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 квершлагах, подводящих к рудным телам, и в полевых штреках на всех эксплуатируемых и вновь вскрываемых горизонтах.



Гор.-280 Масштаб 1:2000

Рисунок 3 – Схема расположения центров электрического зондирования пород вблизи разлома установкой с полуразносом $AB/2 = 20$ м

Таблица 3 – Изменение удельного электросопротивления горных пород Таштагольского рудника по данным шахтных измерений перед сейсмическими событиями

Сейсмическое событие	Энергия, Дж	Дата, время	Место события	Литотип пород, Изменение удельного электросопротивления (УЭС) ρ , Ом·м	Период измерения, место измерения	Изменение ρ перед сейсмическим событием, %
Толчок	$1,9 \cdot 10^8$	22.04.98	Гор.-350, орт 27, запад	Сланцы 197,82-135,02	23.03.98-02.04.98 Гор.-280, СЗПШ, п.102	32
Толчок	$3,2 \cdot 10^6$	01.09.99	Гор.-350, орт 14, центр	Сиенит, сланцы 251,2-197,82	Гор. -280, СЗПШ, п.98	21
Горный удар	$2,3 \cdot 10^9$	24.10.99	Этаж – 280 /-210, орт 15, центр, рудные тела 1 и 6+9 с нарушением между ними	Сиенит, микросиенит 254,34-188,4 Сиенит, сланцы 197,82-160,14	25.08.99-02.09.99 Гор.-280, СЗПШ, п.94 25.08.99-02.09.99 Там же, п.98	26 19
Толчки	$3,74 \cdot 10^4$ $2,44 \cdot 10^4$	Через 30 и 38 с.	Гор.-210 и гор.-350, ств.11 орта и орт 15, центр			
Толчок	$1,3 \cdot 10^6$	24.09.00	Гор. -350, ств.ортов 25-26	Сланцы 659,4-565,2 Сиенит, сланцы 628-395,64	04.07.00-08.09.00 Гор.-280, СЗПШ, п.102 04.07.00-08.09.00 Там же, п.98	14 37
Толчок	$1,4 \cdot 10^7$	07.04.01	Гор.-350, орты 25-26	Сиенит, сланцы 263,76-226,08	06.10.00-02.03.00 Гор.-280, СЗПШ, п.98	14
Толчок	$7,49 \cdot 10^7$	03.02.02	Гор.-350, ств.орта 22, восток	Сиенит, микросиенит 502,4-292,02 Сланцы 722,2-502,4 Сланцы, сиенит 282,6-263,76	21.12.01-22.01.02 Гор.-280, СЗПШ, п.94 21.12.01-22.01.02 Там же, п.102 21.12.01-24.12.01	42 30 7
Толчок	$1,5 \cdot 10^3$	18.07.12	Гор.-280, орт 13-14, восток	Руда (АВ / 2 = 2,5 м) 468,46-616,4	Гор.-280, 13-14 блок, вост. сб, 5 ^й подъезд	04.07.12- 05.07.12 32

Таблица 4 – Значения изменений удельного электросопротивления пород и руд Таштагольского рудника в критическом состоянии по данным шахтного эксперимента

Литотип породы	По данным шахтного эксперимента, %
Диориты, среднее	35
Стандартная ошибка среднего	0,4
Порфириновые диориты, среднее	37
Стандартная ошибка среднего	0,5
Метасоматиты, среднее	27,3
Стандартная ошибка среднего	4,5
Скарны, среднее	32
Стандартная ошибка среднего	2,7
Сиениты, сланцы, среднее	29,3
Стандартная ошибка среднего	0,8
Сиениты, среднее	28,2
Стандартная ошибка среднего	5,2
Сиениты, микросиениты, среднее	32,7
Стандартная ошибка среднего	6,1
Скарны, сланцы, среднее	31,6
Стандартная ошибка	5,9
Сиениты, скарны, среднее	31,8
Стандартная ошибка	2,9
Сланцы, среднее	31
Стандартная ошибка	3,9
Магнетиты, рудные тела, среднее, стандартная ошибка среднего	39 2,5

Таблица 5 – Критериальные значения изменений удельного электросопротивления μ пород и руд Таштагольского рудника в предразрушенном состоянии

Литотип породы		По данным шахтного эксперимента
Диориты	0,35	С нагрузкой электросопротивление падает
Порфириновые диориты	0,37	Электросопротивление падает
Метасоматиты	0,273	Электросопротивление падает
Скарны	0,32	Электросопротивление падает
Сиениты, сланцы	0,293	Электросопротивление падает
Сиениты	0,282	Электросопротивление падает
Сиениты, микросиениты	0,327	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

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 удельного электросопротивления (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 др. 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 повышенных 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 $AB = 20\text{--}25$ 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 от питающих электродов, при этом $AM = NB = (AB - 1) / 2$ м.

Метод крупнобазового ПЭЗ предназначен для глубинного контроля массива в районах *тектонических нарушений и прогноза горных ударов* с энергией $10^7\text{--}10^9$ Дж.

При повторных измерениях в одних и тех же точках массива вычисляются изменения ρ_i в процентах, причем разница УЭС в повторных измерениях относится к первоначальному значению $\rho_{ин}$, по которым для профиля целиком и для каждого структурного блока 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_i 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 пород), то по результатам анализа определяется место локального прогноза удароопасности. В качестве критерия удароопасности может быть принят *показатель удароопасности*

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

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 5. При вероятности 0,5 и выше устанавливается категория «удароопасно», при вероятности ниже 0,5 – «неопасно».

На основании вышеизложенного был сделан следующий вывод: критерием удароопасности при подземном электрическом зондировании и подземном электропрофилеировании железорудного массива может служить показатель удароопасности как отношение изменения электросопротивления, получаемое в одних и тех же точках профиля повторными измерениями по сравнению с начальным электросопротивлением данных участков в неудароопасном состоянии, к начальному электросопротивлению и критическому изменению этого электросопротивления в предразрушенном состоянии, определяемому по таблице для разных пород и рудных тел. При вероятности 0,5 и выше устанавливается категория «удароопасно», при вероятности ниже 0,5 – «неопасно».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной научной задачи по совершенствованию электрометрического метода прогноза удароопасности железорудных месторождений, основанного на кинетической концепции подготовки горных ударов, включающей двухстадийную модель накопления трещин и их влияния на изменение удельного электросопротивления вмещающих пород высокого сопротивления и рудных тел, закономерности изменения электросопротивления пород и руд в напряженных зонах месторождений и методику прогноза удароопасности, позволяющей существенно повысить точность прогноза, безопасность ведения горных работ на железорудных месторождениях России и имеющей существенное значение в области наук о земле.

Основные научные результаты и выводы, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Лабораторные исследования изменений кажущегося удельного электрического сопротивления (КУЭС) рудных тел и вмещающих пород Таштагольского месторождения позволили установить, что с ростом напряжений на образцах и накоплении трещин КУЭС рудных тел растет и его изменение

достигает 40 % в предразрушенном состоянии за счет критического накопления трещин. Электросопротивление вмещающих пород падает, что обусловлено множественным накоплением заряженных точечных дефектов структуры в поле механических напряжений трещин, и его изменение достигает 15–42 % в зависимости от минерального состава, содержания кварца в этих породах и отношения удельных электросопротивлений вблизи поверхности трещин и на удалении от этой поверхности.

2. Проверка разработанных критериев удароопасности в условиях Таштагольского рудника показала, что в соответствии с установленными теоретически и в лабораторном эксперименте закономерностями, непосредственно перед горными ударами и толчками наблюдается закономерное падение УЭС вмещающих пород вплоть до критических значений и рост УЭС при измерениях в рудных телах.

3. Научными исследованиями в условиях Таштагольского железорудного месторождения установлены критические значения изменений удельного электросопротивления вмещающих пород и рудных тел:

- в порфиритах, скарнах, сиенитах, сланцах, диоритах и других вмещающих породах высокого электросопротивления непосредственно перед горным ударом или толчком наблюдается изменение УЭС на 27–37 % в зависимости от минерального состава пород;

- в рудных телах критическое изменение удельного электросопротивления перед горным ударом или толчком составляет с учетом стандартной ошибки среднего примерно 40 %.

4. За критерий удароопасности для электрометрического метода прогноза может быть принят показатель удароопасности как отношение изменения электросопротивления, получаемое в одних и тех же точках профиля по сравнению с начальным электросопротивлением данных участков при неудароопасном состоянии, к начальному электросопротивлению и критическому изменению этого электросопротивления в предразрушенном состоянии, определяемому по таблице для разных пород и рудных тел. При вероятности 0,5 и выше устанавливается категория «удароопасно», при вероятности ниже 0,5 – «неопасно».

После осуществления мероприятий по приведению выработок в неудароопасное состояние производится оценка их эффективности. Повторные измерения выполняются в тех же пунктах наблюдения, где была зафиксирована категория «удароопасно». Если результаты замеров показывают категорию «неопасно», то необходимость в применении мероприятий отпадает.

Список научных трудов

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ при Минобрнауки РФ

1. Иванов В.В. Расчет поправочного коэффициента в кажущееся удельное электросопротивление выбросоопасного массива горных пород при электрическом зондировании массива с контура подготовительной выработки с

металлической крепью / Иванов В.В., Соболев В.В., Лудзиш В.С., Дягилева А.В., **Ли К.Х.** // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2018. № 4. С. 32–35.

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

3. Иванов В.В. Определение дополнительных тектонических горизонтальных напряжений вблизи разломов и нарушений в земной коре на основе теории разломообразования Андерсона / Иванов В.В., Семенцов В.В., Зыков В.С. Потапов П.В, **Ли К.Х.** // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2019. № 2. С. 6–9.

4. Иванов В.В. Определение удельного давления на крепь с учетом зоны разрушения пород вокруг подготовительной выработки / Иванов В.В., Семенцов В.В., **Ли К.Х.** // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2019. № 1. С. 18–21.

Патенты на изобретение

5. Патент № 2722172. Способ диполь – дипольного электропрофилирования угленосного массива горных пород для прогноза участков неоднородности угольного пласта. Патентообладатель: АО «НЦ ВостНИИ». Заявители: Родионов А.А., Потапов П.В., Сороковых С.В., **Ли К.Х.**, Щенев А.В. Заявл.25.02.2019, опубл. 28.05.2020.

Статьи в сборниках, журналах и материалах конференций:

6. **Ли К.Х.** Метод электротомографии как способ определения выбросоопасных зон угольных пластов и геологических нарушений / Ли К.Х., Родионов А.А., Сороковых С.В. // Сборник материалов XII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с Международным участием. 21–24 апреля 2020 г., г. Кемерово, с.10704.1.

7. **Ли К.Х.** Разработка методики электрометрического прогноза удароопасности железорудных месторождений на основе кинетической концепции подготовки горных ударов / Ли К.Х. // Вестник научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2020. № 2. С. 59–66 .