

МЕХАНОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ ТАШТАГОЛЬСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В результате лабораторных исследований при одноосном сжатии образцов горных пород Таштагольского железорудного месторождения установлено, что этапы изменения напряженно-деформированного состояния горных пород уверенно выявляются по характеристикам электромагнитной эмиссии. Возникающий в процессе деформирования горных пород ток поляризации коррелирует с изменениями характеристик механоэлектрических преобразований. Натурными исследованиями на Таштагольском руднике установлено, что по характеристикам электромагнитной эмиссии можно выявлять подготовку и проявление геодинамических событий, а также определять характер изменения напряженно-деформированного состояния горного массива.

Ключевые слова: горные породы; напряженно-деформированное состояние; механоэлектрические преобразования.

Введение

В конце 60-х годов в Томском политехническом институте под руководством профессора А.А. Воробьева были начаты лабораторные и натурные исследования электромагнитных сигналов диэлектрических структур и горных пород, возникающих вследствие механических и температурных воздействий на них. В дальнейшем возникновение переменных электромагнитных полей при механических и акустических воздействиях стали обозначать термином “механоэлектрические преобразования энергии”. Переход различных видов энергии в энергию электромагнитного поля зависит от свойств взаимодействующих систем. Для механоэлектрических преобразований необходимо наличие хотя бы в одной из взаимодействующих систем свободных зарядов и заряженных частиц с последующим образованием двойных электрических слоев. Образование этих слоев может происходить по разным механизмам. Исследования показали, что механоэлектрические преобразования в твердых телах могут происходить при температурных, акустических, механических, химических, радиационных и других внешних воздействиях. Особый интерес представляет практическое использование параметров электромагнитных сигналов (ЭМС), возникающих при механоэлектрических преобразованиях, для контроля изменений напряженно-деформированного состояния диэлектрических структур, горных пород и бетонов с целью определения их долговечности и прочности, а также прогноза геодинамических проявлений. Первые исследования в этом направлении свидетельствовали о том, что параметры ЭМС и характеристики электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) зависят от прочности горных пород. В дальнейшем было показано, что характеристики ЭМЭ зависят не только от прочности, но и от структурно-текстурных особенностей, проводимости, влажности и минерального состава [1-3]. В сложных

гетерогенных системах, какими являются горные породы, естественно ожидать изменение интенсивности ЭМЭ от состава и строения, а также от характера деформации.

Зарубежными учеными также проводились исследования параметров электромагнитных сигналов в процессе разрушения образцов горных пород [4-5], в том числе и для прогноза геодинамических событий [6].

На протяжении ряда лет в Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников (ПНИЛ ЭДиП) Томского политехнического университета (ТПУ) разрабатывается метод контроля изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов горных пород и прогноза удароопасности, основанный на явлении механоэлектрических преобразований энергии [7]. С этой целью выполняются лабораторные исследования параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ модельных образцов и реальных горных пород при одноосном сжатии и детерминированном импульсном акустическом воздействии. В натуральных условиях действующего рудника по добыче магнетитовой руды в г. Таштагол Кемеровской области ведутся полевые измерения электромагнитной и акустической (АЭ) эмиссии при изменении НДС в результате технологических взрывов. Для реализации метода разрабатывается цифровая аппаратура, способная автономно обеспечивать сбор и анализ контролируемых параметров в условиях рудника.

Методика и техника экспериментов

Натурные исследования проводились в условиях действующего рудника “Таштагольский” по добыче магнетитовой руды. Целью исследований являлось установление закономерных связей параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии с изменениями напряженно-деформированного состояния массивов горных пород при взрывном воздействии. Работы выполняли с

использованием разработанного в ТПУ регистратора электромагнитной и акустической эмиссии РЭМС1 [8]. Регистратор позволяет оценивать в реальном режиме времени изменения интенсивности электромагнитной эмиссии, амплитуд ЭМЭ по трем узкополосным частотным каналам 2, 15 и 100 кГц и в широкой полосе частот от 1 до 100 кГц, а также изменения АЭ.

В лабораторных экспериментах исследовались закономерности механоэлектрических преобразований при одноосном сжатии и при детерминированном акустическом воздействии. Это позволяло с определенным приближением моделировать внешние воздействия, испытываемые горными породами в естественных условиях. Сжатие образцов производилось до их разрушения. Поскольку горные породы имеют сложный состав, который не воспроизводим от образца к образцу, необходимо было измерять максимально возможное число физических величин, характеризующих состояние исследуемой породы.

Экспериментальная установка для исследования параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ при одноосном сжатии образцов горных пород представлена на рис. 1. Она состоит из нескольких основных узлов. Одноосное сжатие

осуществлялось прессом, развивающим усилия до 50 тонн, с подвижной и опорной плитами и встроенной силоизмерительной системой СИ. Аналоговый сигнал силоизмерительной системы через осциллографическую приставку PCS-500 Velleman, работавшую в режиме самописца, записывался в память компьютера (ПК). Значения продольной деформации, возникающей в процессе сжатия образца, регистрировались на этой же осциллографической приставке посредством мостовой схемы тензометрических резисторов и усилителя БТД. Электромагнитный сигнал с исследуемого образца принимался дифференциальным емкостным датчиком ЭМД1 со встроенным усилителем мощности и регистрировался с помощью второй осциллографической приставки на ПК для дальнейшего анализа его параметров. В процессе одноосного сжатия измерялся ток поляризации вольтметром-электронметром В7Э-42, сигнал с которого также записывался через осциллографическую приставку на ПК. Информация об изменениях ЭМЭ при деформировании образцов, поступающую с датчика ЭМД2, записывалась в память прибора РЭМС1, данные с которого после окончания эксперимента считывались на ПК и анализировались.

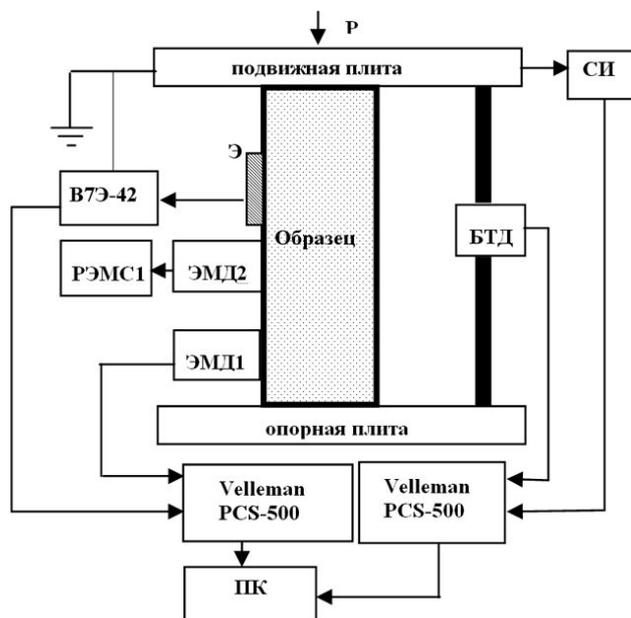


Рис. 1. Блок-схема установки для исследования параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ при одноосном сжатии образцов

Экспериментальные результаты на образцах горных пород

В процессе возникновения ЭМС можно выделить этап формирования электрических диполей и этап их активизации. В зависимости от того, какому внешнему воздействию подвергается исследуемая горная порода, определяется и механизм активизации диполей. Одним из

механизмов при одноосном сжатии образцов горных пород в лабораторных условиях является возникновение акустических сигналов в процессе образования и роста трещин, приводящее к возбуждению диполей. Колебания акустическими сигналами границ неоднородностей и контактов разных пород и минералов, в которых формируются двойные электрические

слои, также сопровождаются электромагнитной эмиссией. Электрические заряды на границах минералов, входящих в состав горных пород, появляются в результате действия различных механизмов. Накопление и разделение зарядов наиболее эффективно происходит в неоднородных горных породах, имеющих свои структурно-текстурные особенности. Все это послужило основанием для разработки метода оценки изменений напряженно-деформированного состояния массивов горных пород и прогноза геодинамических событий по параметрам ЭМС и характеристикам ЭМЭ. Исследования механоэлектрических преобразований в лабораторных условиях являются одной из основных частей разрабатываемого метода. Поэтому объектом для исследования были выбраны образцы горных пород Таштагольского железорудного месторождения, где выполнялись и натурные измерения ЭМЭ. Исследуемые образцы, отобранные из кернов, имели форму цилиндра высотой 8×10^{-2} м и диаметром 4×10^{-2} м. Для контроля изменения напряженно-деформированного состояния горных пород необходимо знание закономерностей изменения интенсивности ЭМЭ или параметров ЭМС в процессе механического нагружения, например, одноосным сжатием образцов. Выявление таких закономерностей и было целью лабораторных исследований. Эксперименты проводили на двух группах образцов, представленных магнетитовой рудой и вмещающей породой. В каждой группе было не менее 15 образцов. В процессе одноосного сжатия регистрировали несколько параметров: приложенное усилие с помощью СИ, что позволяло оценить механи-

ческие напряжения P на каждом этапе нагружения; продольную деформацию образца; интенсивность ЭМЭ; усредненные значения амплитуд ЭМС по 4 каналам с центральными частотами 2, 15 и 100 кГц и в широкой полосе частот от 1 до 100 кГц; величину тока поляризации и аналоговые ЭМС.

Одноосное сжатие на прессе довели до разрушения образцов. При этом для разных образцов магнетитовой руды напряжение разрушения $P_{пред}$ изменялось в пределах от 3050 кН/м² до 6175 кН/м², а для образцов вмещающей породы – от 2250 кН/м² до 6750 кН/м². На рис. 2 приведено изменение средней амплитуды ЭМЭ на частоте 100 кГц и интенсивности ЭМЭ при одноосном сжатии образца магнетитовой руды. На рисунке 2 видно, что все основные этапы напряженно-деформированного состояния образца четко прослеживаются по изменению параметров механоэлектрических преобразований. Первое возрастание ЭМЭ наблюдалось в самом начале одноосного сжатия. Такое увеличение ЭМЭ соответствует этапу уплотнения образца, когда происходит закрытие имеющихся в образце трещин и пор. Второе, более интенсивное увеличение ЭМЭ, наблюдалось при нагрузке, имеющей величину 0,3–0,5 $P_{пред}$. Это соответствует этапу формирования очага разрушения. Следующее увеличение ЭМЭ прослеживалось на этапе предразрушения и соответствовало нагрузке 0,9 $P_{пред}$. Затем следовало разрушение образца, которое сопровождалось ЭМЭ с интенсивностью, превышающей все наблюдавшиеся ранее на других этапах деформирования.

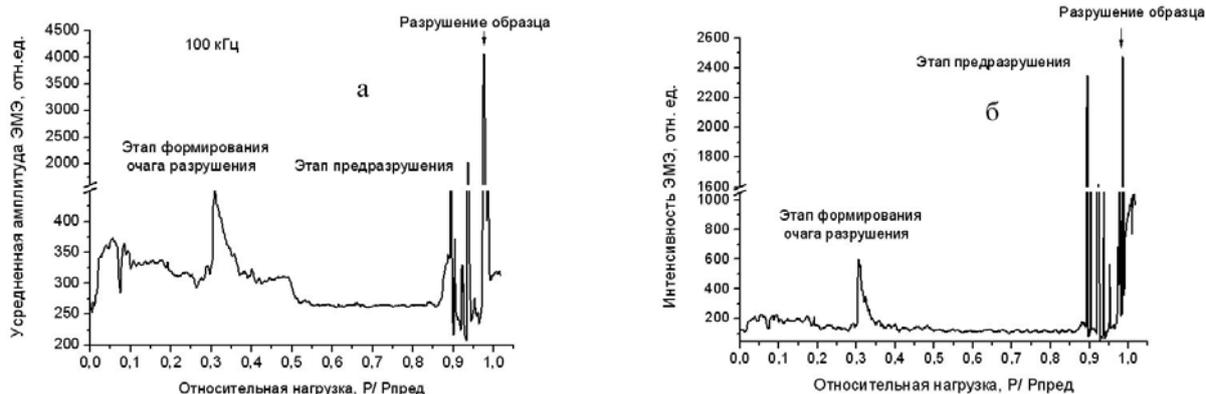


Рис. 2. Изменение амплитуды ЭМЭ на частоте 100 кГц (а.) и интенсивности (б.) для образца магнетитовой руды

Сравнивая рисунки 2.а и 2.б, можно сделать вывод о том, что по изменению усредненной величины амплитуды ЭМЭ на частоте 100 кГц можно с уверенностью отслеживать этапы деформирования и разрушения образцов горной породы. В процессе экспериментов анализировались изменения тока поляризации. При

приложении нагрузки к образцам магнетитовой руды изменения тока поляризации слабо выражены, так как руда обладает повышенной электропроводностью. Наиболее наглядные изменения тока поляризации наблюдались при приложении нагрузки к образцам вмещающих пород, обладающих диэлектрическими свой-

ствами. На рис. 3 для образца вмещающей горной породы приведено сравнение изменений тока поляризации и усредненной амплитуды ЭМЭ в широкой полосе частот 1–100 кГц. В этих породах при одноосном сжатии возникает ток поляризации, обусловленный смещением центров тяжести разноименных зарядов в результате уплотнения образца на начальном этапе сжатия за счет имеющихся в нем трещин и пор. Такое смещение ведет к возникновению электрических диполей. Образование и релаксация их сопряжены с перемещением заряженных частиц и появлением поляризационного тока, а колебания этих диполей акустическими импульсами, возникающими при схлопывании или прорастании пустот и трещин, приводят к возрастанию интенсивности ЭМЭ. Движение дислокаций при одноосном сжатии образцов также приводит к появлению тока. Дальнейшее равномерное увеличение нагрузки в пределах $0,3–0,6 P_{пред}$ приводит к квазистабильности процессов изменения величины тока и его уменьшению в результате появления микро-

трещин, препятствующих движению дислокаций и заряженных дефектов структуры. На этом этапе наблюдается снижение интенсивности ЭМЭ. На этапе укрупнения очагов разрушения и образования магистральных разрывов, соответствующему нагрузке образцов выше $0,7 P_{пред}$, значение тока возрастает. Такое возрастание обусловлено процессом роста трещин и образованием дополнительных заряженных поверхностей. Создаваемые в образцах при их сжатии напряжения в интервалах $0,5–0,7$ и $0,7–0,99 P_{пред}$ выделяются тем, что направленно двигающиеся под действием приложенных квазистатических нагрузок дислокации и заряженные дефекты замыкаются на вновь образованных микротрещинах, контактах зерен и фрагментах включений разных минералов. Происходит образование или подзарядка уже имеющихся двойных электрических слоев. В результате колебания этих слоев акустическими импульсами, возникающими при прорастании трещин, интенсивность ЭМЭ и амплитуда ЭМС возрастают, что мы и наблюдали в опытах.

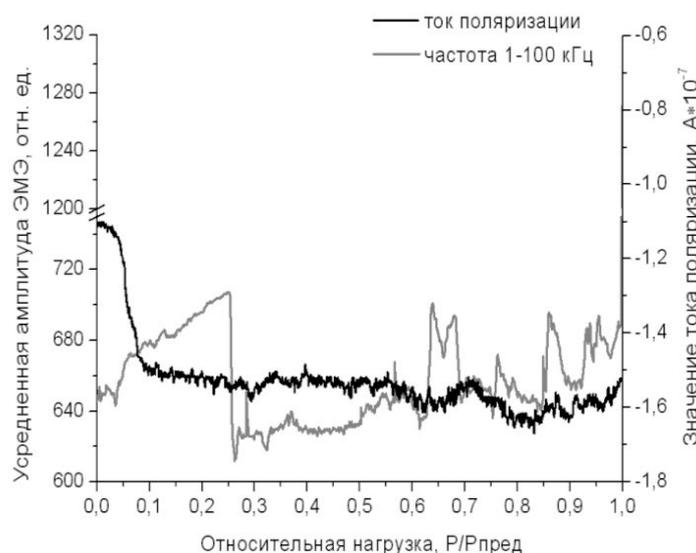


Рис. 3. Изменение интенсивности ЭМЭ и тока поляризации при одноосном сжатии образца вмещающей породы

Натурные исследования

Подземная разработка месторождений твердых полезных ископаемых вызывает изменения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород, влияющих на безопасность окружающей среды, промышленных объектов и самих горных работ. Развитие процесса изменения НДС массива обусловлено применением технологий разработки, свойствами рудных тел и вмещающих пород. В настоящее время при подземной разработке твердых полезных ископаемых широко используется метод, основанный на проведении технологических взрывов большой мощности. В результате таких воздействий происходит существенное перераспре-

деление напряжений в массиве, которые приводят к возникновению геодинамических событий, в том числе к горным и горно-тектоническим ударам [9]. Натурные полевые наблюдения электромагнитной эмиссии, являющейся результатом механоэлектрических преобразований в горных породах, проводились в условиях Таштагольского железорудного месторождения. На протяжении ряда лет ведется формирование банка данных изменений параметров электромагнитной и акустической эмиссии при действии технологических взрывов различной мощности.

Полевые наблюдения механоэлектрических преобразований на Таштагольском руднике при

закладке взрывчатого вещества (ВВ) массой 165 т, что соответствует выделенной энергии 23 МДж, проводились в декабре 2007 года. Для мониторинга электромагнитной эмиссии в шахтных условиях использовался разработанный в ТПУ регистратор электромагнитной и акустической (АЭ) эмиссии РЕМС1, технические характеристики которого приведены в работе [8]. Прибор обеспечивает регистрацию в режиме реального времени усредненных значений интенсивности ЭМЭ, амплитуды ЭМЭ в полосах с центральными частотами 2, 15, 100 кГц и в широкой полосе частот 1–100 кГц, а также акустической эмиссии. Время усреднения 1 или 5 секунд устанавливается оператором. В автономном режиме регистраторы могут непрерывно записывать данные наблюдений ЭМЭ и АЭ в течение 7 суток с последующим продолжением работы при переустановке аккумуляторов и освобождении памяти для записи новой информации. Такие возможности прибора позволяют устанавливать его за 1–2 суток до технологического взрыва с целью определения фонового значения ЭМЭ, регистрировать изменения электромагнитной активности в период технологического взрыва без присутствия оператора, что особенно важно с учетом безопасности людей.

Регистраторы устанавливались на горизонте -280 м (730 м от поверхности земли) с южной и северной стороны от обрушаемого взрывом

блока. Один прибор располагался на расстоянии 70 м от места взрыва, второй на расстоянии 120 м. Такое расположение регистраторов обусловлено тем, что в месте установки приборов горные породы отличались электрическими свойствами. Первый прибор был размещен в массиве горных пород, представленных сиенитами, а в месте размещения второго была магнетитовая руда с включениями кварца. В процессе наблюдений через 97 минут после технологического взрыва зафиксировано геодинамическое событие с энергией 814 МДж. По классификации геодинамических событий такое проявление относят к горным ударам. Сейсмическая активность шахтного поля, в том числе пространственно-временные проявления геодинамических процессов контролировались сейсмической станцией Таштагольского рудника.

В результате непрерывных наблюдений были зарегистрированы изменения электромагнитной и акустической эмиссии в период проведения технологического взрыва, а также последующего геодинамического события. Наибольшие изменения ЭМЭ в период между подрывом ВВ и горным ударом наблюдали в полосе с центральной частотой 100 кГц. На рис. 4 приведены изменения усредненных значений амплитуды электромагнитной эмиссии на частоте 100 кГц, зарегистрированные по показаниям первого регистратора. Время усреднения соответствует 5 секундам.

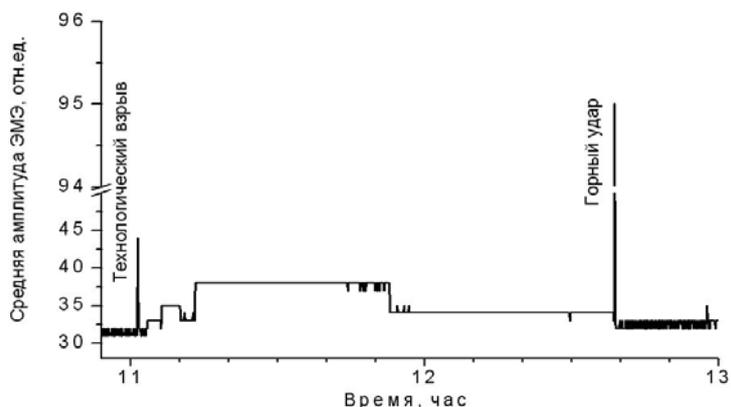


Рис. 4. Изменение средней амплитуды ЭМЭ на частоте 100 кГц на Таштагольском руднике

На рисунке видно, что в момент технологического взрыва наблюдается кратковременное возрастание амплитуды ЭМЭ, после которого уровень эмиссии снижается до первоначального. В последующем величина ЭМЭ вновь возрастает и находится на установившемся уровне около 50 минут. Перед геодинамическим событием величина ЭМЭ снижается и через некоторое время происходит горный удар. В момент горного удара также наблюдается увеличение амплитуды ЭМЭ, которое превышает усредненные значения электромагнитной эмиссии, зафиксированные во

время технологического взрыва. Это означает, что при горном ударе произошло выделение энергии значительно большее, чем во время подрыва ВВ. Этот факт подтвердили данные наблюдений сейсмостанции г. Таштагола. Приведенные на рис. 4 изменения ЭМЭ свидетельствуют о том, что перед горным ударом происходит накопление энергии и формирование очага разрушения. В лабораторных исследованиях разрушения образцов горных пород при одноосном сжатии наблюдали подобные этапные изменения ЭМЭ.

На рис. 5 (а, б) показаны временные изме-

нения интенсивности ЭМЭ, зарегистрированные первым (рис. 5.а) и вторым (рис. 5.б) регистраторами РЭМС1. На рис. 5 видно, что период подготовки горного удара отчетливо выделяется. При этом надо отметить некоторые отличия показаний приборов, размещенных с разных сторон от места обрушения рудного блока. По данным первого регистратора (№1) после технологического взрыва происходит снижение интенсивности ЭМЭ в течение нескольких минут с последующим резким увеличением. Эти повышенные значения интенсивности ЭМЭ, так же как и уровень средних значений амплитуд ЭМЭ на частоте 100 кГц (рис. 4), регистрировались около 50 минут.

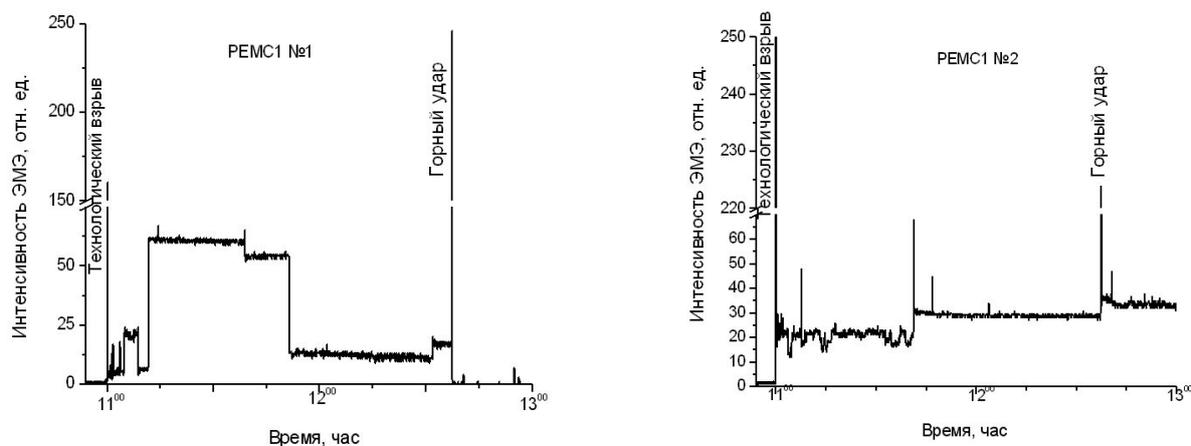


Рис. 5. Изменение интенсивности электромагнитной эмиссии в период проведения технологического взрыва и последующего горного удара, зарегистрированное двумя регистраторами

Увеличение интенсивности ЭМЭ в момент технологического взрыва является следствием искусственного динамического возбуждения массива горных пород. В период формирования очага разрушения и подготовки горного удара, спровоцированного в данном случае технологическим взрывом, происходит изменение напряженно-деформированного состояния массива, сопровождающееся геодинамическими событиями. В результате механоэлектрических преобразований, происходящих в разной степени нагруженных горных породах, электромагнитная эмиссия претерпевает соответствующие изменения. Отличия в величине ЭМЭ для разных приборов после горного удара обусловлены перераспределением НДС массива горных пород шахтного поля на прилегающих горизонтах. С большой вероятностью можно говорить о том, что в месте расположения первого регистратора произошла разгрузка массива, и уровень интенсивности ЭМЭ упал до нулевых значений, а в месте расположения второго регистратора произошло дополнительное нагружение массива, и интенсивность ЭМЭ увеличилась. Косвенным подтверждением тако-

Перед горным ударом наблюдается затишье в течении не менее 40 минут. По данным второго регистратора (№2) после технологического взрыва наблюдается ступенчатое увеличение интенсивности ЭМЭ. В эти же отрезки времени проявления ступенчатых изменений интенсивности происходят геодинамические события в виде толчков. Затем происходит стабилизация ЭМЭ на определенном уровне и горный удар. Кроме того, после горного удара уровень интенсивности ЭМЭ по данным первого прибора падает до нулевых значений, а уровень по данным второго прибора имеет повышенные значения.

го перераспределения НДС в массиве служат вывалы горных пород вблизи второго регистратора и данные сейсмических наблюдений.

Выводы

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. Изменение характеристик электромагнитной эмиссии, возникающей при механоэлектрических преобразованиях в представленных лабораторных экспериментах, соответствует возрастанию и уменьшению токов поляризации образцов магнетитовой руды и вмещающей породы Таштагольского рудного месторождения на всех этапах их одноосного сжатия и разрушения.

2. По характеристикам электромагнитной эмиссии при изменении напряженно-деформированного состояния одноосно сжимаемых образцов горных пород уверенно выделяются этапы уплотнения горной породы, формирования очага разрушения, увеличения размеров трещин в очаге и самого факта разрушения.

3. Изменения интенсивности и амплитуды

электромагнитной эмиссии горных пород в природных условиях шахт и других подземных сооружений позволяют выявлять этапы подготовки и проявления геодинамических событий и определять характер перераспределения напряженно-деформированного состояния массива.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 06-08-00693-а и № 06-08-96911p_офи.

Литература

1. Беспалько А.А., Гольд Р.М., Яворович Л.В., Дацко Д.И. Влияние текстурных особенностей образцов алеврита на параметры электромагнитного сигнала при акустическом возбуждении // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2002. – № 2. – С. 27–31.
2. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Гольд Р.М., Дацко Д.И. Возбуждение электромагнитного излучения в слоистых горных породах при акустическом воздействии // ФТПРПИ. – 2003. – №2. – С. 8–14.
3. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Федотов П.И. Связь параметров электромагнитных сигналов с электрическими характеристиками горных пород при акустическом и квазистатическом воздействиях // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308, № 7. – С. 18–23.
4. Tsutsumi A., Shirai N. Electromagnetic signals associated with stick-slip of quartz-free rocks // Tectonophysics, 450, pp. 79–84.
5. Ogawa T., Oike, K., Miura T. Electromagnetic Radiation From Rocks. J/Geoph. Res. V.90, N D4, 6445-6249 30, 1985.
6. Frid V., Vozoff K. Electromagnetic radiation induced by mining rock failure // International Journal of Coal Geology, 2005.
7. Беспалько А.А., Суржиков А.П., Хорсов Н.Н., Клишко В.К., Штирц В.А., Шипеев О.В., Яворович Л.В. Наблюдения изменений напряженного состояния массива горных пород после массового взрыва по параметрам электромагнитной эмиссии // Физическая мезомеханика. Том 7, специальный выпуск, часть 2. – 2004. – С. 253–256.
8. Беспалько А.А., Хорсов Н.Н. Аппаратурный комплекс для исследования напряженно-деформированного состояния горных пород в шахтах // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: Труды Международной конференции. – Новосибирск, 2004. – С. 210–213.
9. Особенности современных достижений в области безопасной отработки удароопасных месторождений, методам прогноза и предупреждения горных ударов. Сб. докладов конференции. – Таштагол, 2000. – С. 12–33.

МЕХАНОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ В ГІРСЬКИХ ПОРОДАХ ТАШТАГОЛЬСЬКОГО ЗАЛІЗОРУДНОГО РОДОВИЩА

А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, П.І. Федотов, Е.В. Вітман

В результаті лабораторних досліджень при одноосному стиску зразків гірських порід Таштагольського залізрудного родовища встановлено, що етапи зміни напружено-деформованого стану гірських порід упевнено виявляються за характеристиками електромагнітної емісії. Виникаючий в процесі деформації гірських порід струм поляризації корелює зі змінами характеристик механоелектричних перетворень. Натурними дослідженнями на Таштагольському руднику встановлено, що за характеристиками електромагнітної емісії можна виявляти підготовку і прояви геодинамічних подій, а також визначати характер перерозподілу напружено-деформованого стану гірського масиву.

Ключові слова: гірські породи; напружено-деформований стан; механоелектричні перетворення.

MECHANOELECTRICAL TRANSFORMATIONS IN ROCKS OF TASHTAGOL IRON-ORE DEPOSIT

A.A. Bepalko, L.V. Yavorovitch, P.I. Fedotov, E.V. Viitman

As a result of laboratory researches at uniaxial compression of core boring from Tashtagolsk iron-ore deposits it is established that stages of change of the deflected mode of formations confidently marks out by characteristics of electromagnetic issue. The polarisation current, which is arising in the course of deformation of rocks, correlates with changes of characteristics of dynamoelectric transformations. It is established by natural researches on Tashtagolsk iron-ore mine that it is possible to reveal the preparation and the display of geodynamic events, and also to define the character of redistribution of the deflected mode of massif by characteristics of electromagnetic issue.

Key words: rocks; deflected mode; dynamoelectric transformations.