

УДК 532.685; 533.15

**О КОНТРОЛЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ АППАРАТУРЫ
РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ ЭМИ**

А. А. Бизяев, Г. Е. Яковицкая

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: yge@ngs.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Представлены результаты измерений сигналов электромагнитного излучения (ЭМИ) горных пород с помощью разработанных совместно в ИГД СО РАН и НГТУ приборов типа РЭМИ-2 и регистрационно-диагностического комплекса РДК РЭМИ-3. Прибором РЭМИ-2 измеряется мощность регистрируемых сигналов ЭМИ, а результаты измерений отображаются в цифровом виде. Прибор РДК РЭМИ-3 имеет существенные преимущества перед более ранними разработками, позволяя вести запись измерений на встроенную плату памяти. Результаты регистрации электромагнитных импульсов представляются на экране монитора в виде осциллограмм, позволяя на основе анализа изменений структуры, параметров и спектрально-временных характеристик сигналов ЭМИ диагностировать начальную стадию разрушения горных пород.

Горные выработки, разрушение, электромагнитное излучение, регистрация, приборы, диагностика

Известно, что электромагнитное излучение породного массива в последние десятилетия достаточно широко используется для диагностики и контроля как землетрясений [1, 2], так и различного рода динамических проявлений горного давления [2]. При прогнозе динамических проявлений в природных условиях на карналлитовых пластах использовалась методика, разработанная в [3]. С помощью прибора ЕГ-6, работающего на фиксированной частоте 40 кГц, выявлено, что при регистрации сигнала с амплитудой, не превышающей в 3 раза ее значение, измеренное вне зоны опорного давления, геомеханическую ситуацию считают невыбросоопасной, а при больших значениях амплитуд — выбросоопасной [4]. Разработанный ВНИМИ с использованием новых методических подходов и на новой элементной базе измерительный комплекс “Ангел” позволяет проводить оценку параметров нестационарных электромагнитных геофизических полей, связанных с разрушением горных пород, а также экспресс-прогноз удароопасности участков массива [5]. Прибор работает на частоте 31 кГц. Программа накопления и анализа экспериментальных данных дает возможность оценивать несколько параметров сигналов ЭМИ, из которых наиболее информативным считается их амплитуда.

На Таштагольском месторождении для прогноза удароопасности использовались и другие методики [6, 7], основанные, например, на регистрации амплитуды суммарного поля ЭМИ за определенный интервал времени. Эта методика реализована на базе применения аппаратуры РВИНДС [6, 8].

Попытка расширить частотный диапазон исследований при регистрации ЭМИ от 20 до 200 кГц опробована с помощью макета аппаратуры, разработанной Центральной научно-исследовательской лабораторией военизированных горноспасательных частей (ЦНИЛ ВГСЧ) Урала [9], включающей набор узкополосных электрических и магнитных антенн и прошедшей испытания на месторождениях СУБРа (ш. 14-14 бис).

Основные критерии, реализованные в аппаратуре, — это количество импульсов ЭМИ от начала наблюдения, т. е. так называемый “счет” импульсов и скорость счета — скорость следования импульсов в единицу времени.

В [10] предлагается осуществлять контроль процесса разрушения горных пород в природных условиях с помощью метода ЭМИ, ориентируя антенну в виде рамки диаметром 0.5 м параллельно или ортогонально стенке выработки. Методика исследований включает измерения сигнала при расположении рамки либо перпендикулярно поверхности стенки выработки так, чтобы максимум диаграммы направленности антенны был ориентирован на нее, либо попеременно (перпендикулярно стенке выработки и параллельно ей), либо в трех взаимно перпендикулярных направлениях — с добавлением вертикального, когда сигнал приходит из кровли (или почвы) выработки, и двух горизонтальных.

Среди результатов исследования сигналов ЭМИ при проведении природных экспериментов можно отметить следующие:

— в качестве преобразователя механической энергии в электрическую при землетрясениях и динамических проявлениях горного давления в ОИФЗ РАН как один из основополагающих принят механизм дипольного излучения зарядовой мозаики на бортах раскрывающихся трещин [1];

— генерация сигнала ЭМИ — процесс по своей природе динамический, поэтому при активизации деформирования участков массива перед горными ударами или поверхностных слоев земли перед землетрясениями интенсивность ЭМИ увеличивается; на данной стадии деформирования важны не столько абсолютные значения изменений напряжений или деформаций, сколько скорости их нарастания или спада [2–4];

— на стадии подготовки горного удара возникают в большом количестве мелкие трещины, генерирующие высокочастотные электромагнитные импульсы, а при достижении их критической концентрации происходит процесс “слияния” и появление более длинных трещин, излучающих акустические и низкочастотные электромагнитные сигналы [11–13];

— при прогнозе удароопасности в подземных горных выработках с регистрацией сигнала ЭМИ при амплитуде, не превышающей в 3 раза ее значения, измеренного вне зоны опорного давления, геомеханическую ситуацию считают неудароопасной, а при больших значениях амплитуд — удароопасной.

Главная цель настоящих исследований — информационное расширение существующих представлений о процессе разрушения горных пород при разработке их прогнозно-диагностических критериев на основе регистрации изменения параметров и структуры сопутствующего электромагнитного излучения в условиях подземных горных выработок.

Для реализации этих целей необходимо решить следующие задачи:

— разработать, изготовить и испытать в природных условиях регистрационно-диагностический и программно-аппаратный комплекс РДК РЭМИ-3, который мог бы позволить, в отличие от РЭМИ-2, проводить накопление данных и осуществлять их запись в память прибора с последующим анализом цифровой информации на персональном компьютере;

— обеспечить возможность непрерывной работы РДК РЭМИ-3 в течение не менее ~4 ч с одновременной записью информации в память прибора, что позволит выполнять последующий анализ осциллограмм по параметрам и структуре сигналов ЭМИ. Их изменение лежит в основе выбора диагностического критерия приближения стадии разрушения горных пород.

Для проведения экспериментальных исследований по контролю динамических проявлений горного давления с помощью метода ЭМИ выбран Таштагольский рудник как один из наиболее удароопасных. Используемая аппаратура — приборы совместной разработки ИГД СО РАН и НГТУ типа РЭМИ-2 [11] и РДК РЭМИ-3 [11, 12].

КОНТРОЛЬ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД НА ОСНОВЕ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТУРЫ РЭМИ-2

Измерения ЭМИ прибором РЭМИ-2 проведены в ортах 18, 19, 20 гор. – 350 м. Орты пройдены преимущественно в безрудной зоне, представленной скарнами, сиенитами, диоритовой и микросиенитовой дайками. В северо-восточной части месторождения ортами пресекаются граничные участки трех рудных тел мощностью 10–15 м, оконтуренных скарновыми массивами с включениями сиенитовых линз и диоритовых даек. Орт 18 пересекает множество разноориентированных тектонических трещин [14].

Методика измерений включала профилирование вдоль выработки и регистрацию показаний прибора в каждой точке в течение 1–2 мин при ориентации антенны в трех взаимно перпендикулярных направлениях по пикетам, расстояние между которыми составляло 15 м. Данные показаний прибора РЭМИ-2 приведены в таблице.

Показания прибора РЭМИ-2 при профилировании вдоль выработки гор. – 350 м, орт. № 18 накануне микроудара 16.08.01 г., рудник “Таштагольский”

Номер пикета	Показания прибора по направлениям, отн. ед.			Номер пикета	Показания прибора по направлениям, отн. ед.		
	вдоль	поперек	вертикально		вдоль	поперек	вертикально
1	2	3	4	14	2	4	4
2	3	2	2	15	3	3	3
3	2	2	2	16	21	20	24
4	2	2	4	17	2	2	5
5	15	23	25	18	19	24	28
6	2	2	3	19	26	24	27
7	3	3	3	20	18	22	25
8	3	4	5	21	3	3	3
9	20	26	23	22	21	24	29
10	4	4	3	23	3	3	3
11	3	3	3	24	3	3	3
12	21	24	27	25	30	23	23
13	3	3	3	26	3	3	4

Из анализа представленных данных следует, что уровень сигналов ЭМИ во многих точках (пикетах) измерений в 10 раз и более превышает уровень фонового электромагнитного излучения, регистрируемого ранее в этих же выработках (2–4 отн. ед.). Такой повышенный уровень сигналов ЭМИ по сравнению с фоновым вдоль профиля выработки свидетельствует о возможном динамическом проявлении горного давления, которое и было зарегистрировано через 6 ч после выполненных измерений.

По результатам использования в данном эксперименте прибора РЭМИ-2 отмечены следующие его недостатки:

- возможность контроля только среднеэнергетического параметра сигналов ЭМИ за определенный промежуток времени (1 с, 10 с, 1 мин и т. д.);
- отсутствие регистрации амплитудных характеристик, а следовательно, невозможность использования диагностических критериев разрушения, разработанных при анализе амплитудных и спектрально-временных характеристик в лабораторном эксперименте;
- отсутствие оперативной памяти в аппаратуре, а значит, невозможность записи результатов эксперимента в натуральных условиях.

В связи с этим возникла необходимость разработки нового, более совершенного вида аппаратуры — регистрационно-диагностического комплекса РДК РЭМИ-3 [12], включающего портативный прибор РЭМИ-3, предназначенный для регистрации сигналов ЭМИ в условиях рудников и шахт, имеющий интерфейс для связи с персональным компьютером и программное обеспечение (ПО) РЭМИ-3 для хранения, обработки и анализа экспериментальных данных на персональном компьютере.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ТАШТАГОЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РДК РЭМИ-3

Регистрация фоновой составляющей сигнала ЭМИ проводилась на гор. –210, орт 4, гор. –280, орт 5, в сборно-вентиляционном штреке, а также на гор. –350, орты 18, 19, 20, 21. Осуществлялось профилирование вдоль выработок с измерением сигналов ЭМИ с шагом 15 м. В каждой точке измерений антенны располагались в трех взаимно перпендикулярных направлениях, зарегистрированный сигнал записывался в память прибора. Результат регистрации в одном из ортов показан на рис. 1. Уровень фоновой составляющей сигнала составлял примерно 150–200 мВ по всей длине штрека.

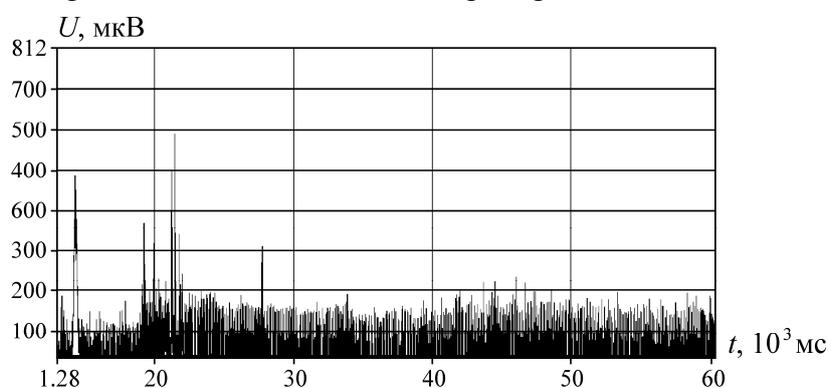


Рис. 1. Результаты регистрации фоновой составляющей ЭМИ в орте 4 гор. – 210 м

Испытания прибора РЭМИ-3 в условиях Таштагольского месторождения осуществлялись на гор. –70, –140, –280 и –350 м [11]. Примеры записи сигналов ЭМИ, полученные в 2008 г. с помощью прибора на горизонтах –210, –280 и –350 м, приведены на рис. 2.

Задачи предварительных испытаний прибора следующие:

- регистрация уровня сигнала ЭМИ в обводненных (гор. –280, орт 5) и необводненных (гор. –210, орт 4) выработках;
- регистрация сигналов ЭМИ при различных ориентациях антенны (соответственно вертикальном и горизонтальном, соосно с выработкой, гор. –210, орт 4);
- регистрация сигналов ЭМИ на обнажении в забое (гор. –350, орт 20).

На рис. 2 представлены участки осциллограмм сигналов ЭМИ, зарегистрированных в ортах: *а* — обводненном; *б, в* — при различных ориентациях антенны (соответственно вертикальном, горизонтальном соосно с выработкой), *г* — запись сигнала ЭМИ, зарегистрированного на обнажении в забое. Видно, что уровни сигналов ЭМИ в ортах не превышают фоновых значений ~ 200 мВ.

Из анализа рис. 2*в* следует, что в забое наблюдается повышенный относительно фоновому уровню сигналов ЭМИ. Это можно объяснить более интенсивным трещинообразованием, т. е. возникновением и развитием большого количества трещин после проведенных ранее технологических взрывов.

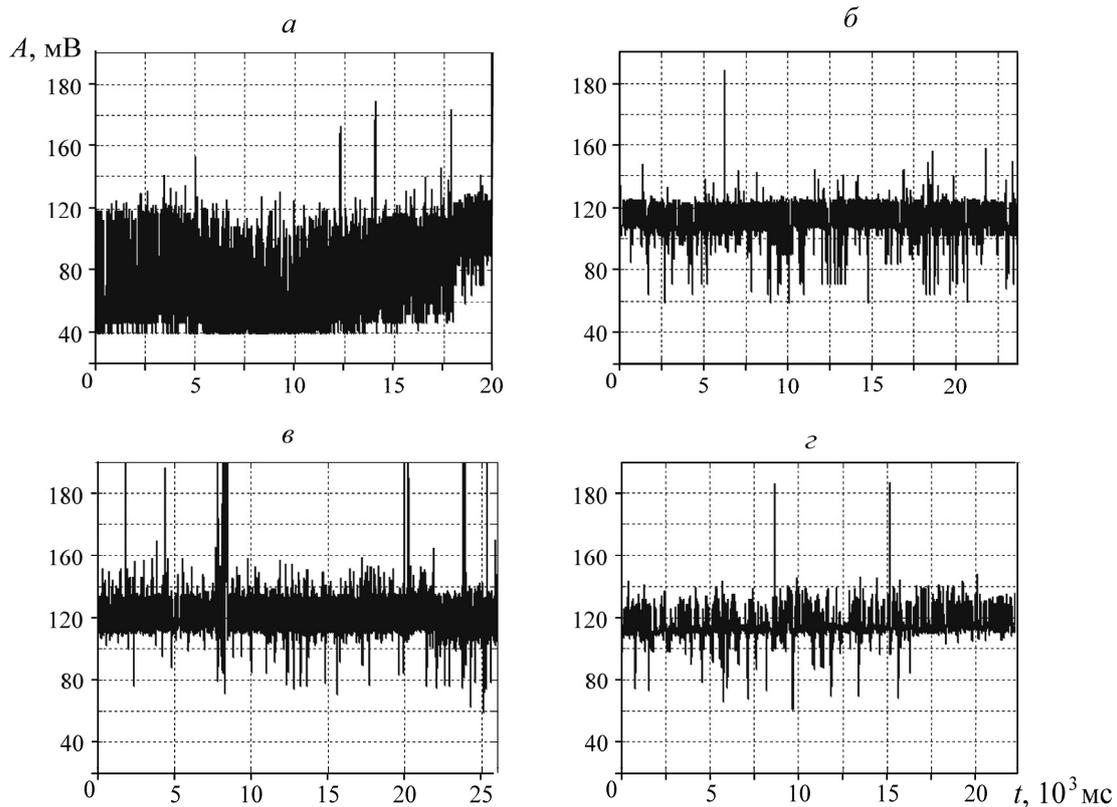


Рис. 2. Записи сигналов ЭМИ, зарегистрированные в условиях подземных горных выработок Таштагольского месторождения: *а* — на обводненном участке (гор. –280, орт 5); *б* — при вертикальной ориентации антенны (гор. –210, орт 4); *в* — при горизонтальной ориентации антенны (гор. –210, орт 4); *г* — на обнажении в забое (гор. –350, орт 20)

КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ УЧАСТКОВ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД С ПОМОЩЬЮ ПРИБОРА РДК РЭМИ-3 НА ТАШТАГОЛЬСКОМ РУДНИКЕ

Контроль процесса разрушения по сигналам ЭМИ при заколообразовании. Характерными признаками этого вида динамических проявлений горного давления является продолжительный по времени повышенный фон сигналов ЭМИ при таком положении антенны магнитного типа, когда направление ее оси совпадает с нормалью к плоскости заколов. Регистрация электромагнитного излучения в местах образования заколов и после их оборки проводилась на руднике “Таштагольский” на гор. –210 м (орты 4, 5) в 27, 28, 29 блоках, когда регистрировалась серия сигналов ЭМИ существенно повышенной амплитуды, при профилировании орта 5 на гор. –280 (рис. 3).

Наличие заколов наблюдалось визуально на протяжении 20 м в кровле выработки. Пример записи сигналов ЭМИ от заколов представлен на рис. 4. Установлено, что в местах интенсивного заколообразования уровень сигналов ЭМИ достигал более 800 мкВ, значительно превышая электромагнитный фон, и резко уменьшался до естественного фона (150–200 мВ) при удалении от них на расстояние 10 м. После оборки заколов уровень сигналов ЭМИ также снижался и регистрировался на уровне естественного фона.

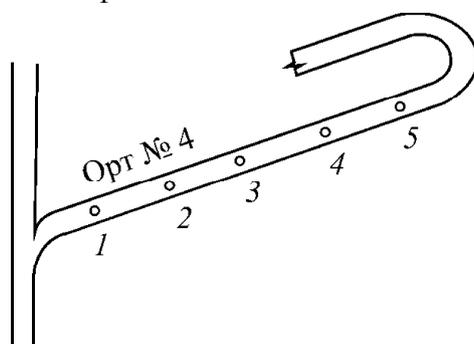


Рис. 3. Участок проведения экспериментальных исследований при контроле заколообразования по сигналам ЭМИ на Таштагольском руднике, гор. –210 м, орт № 4; 1–5 — точки измерений сигналов ЭМИ, шаг — 15 м

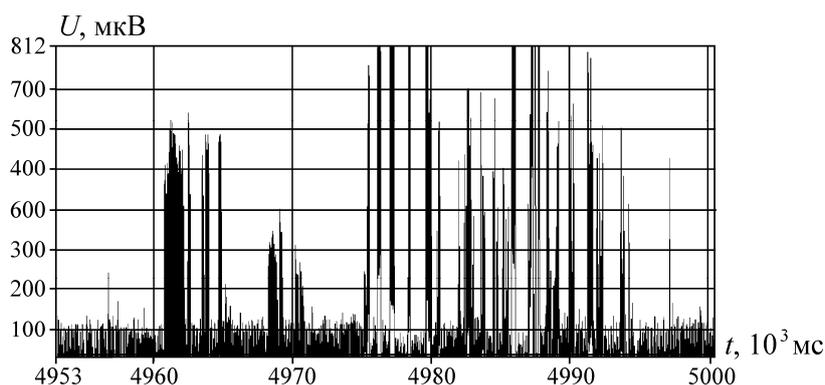


Рис. 4. Запись сигналов ЭМИ при заколообразовании, рудник “Таштагольский”, гор. –280 м, орт 5

Контроль процесса разрушения при других видах динамических проявлений горного давления на Таштагольском руднике. При проведении экспериментов на Таштагольском руднике в ноябре 2011 г. зарегистрировано динамическое проявление горного давления *в виде стрельяния*. Измерения сигналов ЭМИ прибором РЭМИ-3 осуществлялись на гор. –210, орт 4 м по пикетам. В каждой точке регистрировался уровень сигнала, принимаемый антеннами, расположенными в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Время измерений в одной точке составляло 5–10 мин. Затем оператор передвигался в следующую точку. На протяжении всего времени измерений (около 1 ч) уровни сигналов ЭМИ во всех точках были примерно одинаковы, но более высокие, чем во время предыдущих измерений. В одной из точек в вертикальном положении антенны зарегистрирован существенно повышенный уровень сигнала ЭМИ. После измерений в этой точке произошло динамическое проявление горного давления в виде стрельяния, очаг которого находился на гор. –280 м, орт № 12. Энергия от динамического явления распространилась на расстояние 70 м по вертикали и на 120 м по горизонтали, и он был зарегистрирован Таштагольской сейсмостанцией. На рис. 5 показаны результаты измерения сигналов ЭМИ при регистрации динамического проявления в виде стрельяния на руднике “Таштагольский”, гор. –210 м, орт 4.

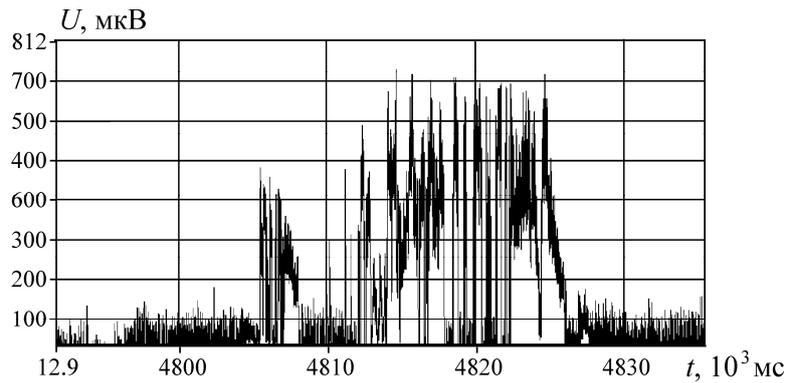


Рис. 5. Запись сигналов ЭМИ перед динамическим проявлением горного давления в виде стрельяния, расстояние до места регистрации ~ 120 м, рудник “Таштагольский”, гор. – 210 м, орт 4

Микроудары — это динамические события, которые проявляются в виде разрушений на контуре выработки и высыпаний в нее породной массы до 0.5 м^3 . В 2011 г. экспериментально на Таштагольском руднике зарегистрирован многократно повышенный электромагнитный фон ($\sim 800 \text{ мВ}$) относительно естественного фона ($150\text{--}200 \text{ мВ}$). Измерения проводились методом профилирования вдоль выработок на гор. – 350 м, орты 18, 19. Регистрация ЭМИ прибором РЭМИ-3 осуществлялась по пикетам, отстоящим друг от друга на расстоянии 15 м, в течение 1–2 мин при расположении приемной антенны последовательно в трех взаимно перпендикулярных направлениях.

Из анализа полученных записей (рис. 6) следует, что при приближении времени проявления микроудара изменяются не только параметры, но и структура сигналов ЭМИ. Для более полного их изучения могут быть использованы полученные ранее закономерности в структуре и параметрах таких сигналов, включая разработанные диагностические критерии разрушения [15, 16].

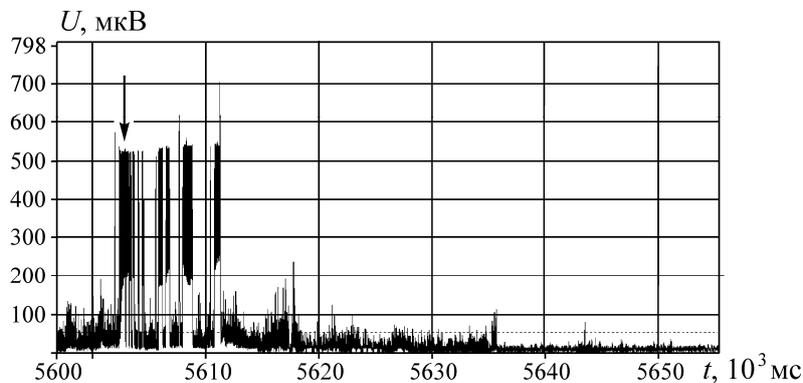


Рис. 6. Запись сигналов ЭМИ за 15 мин перед динамическим проявлением горного давления в виде микроудара 16.08.2011 (расстояние между источником динамического проявления и местом регистрации сигнала ЭМИ 120 м)

Отметим, что на рис. 4–6 при регистрации различных по энергетике динамических проявлений горного давления в виде заколов, стрельяний и микроударов на осциллограммах зафиксированы записи огибающих сигналов ЭМИ квазирезонансного типа с высокочастотным заполнением, возникновение которых связывается нами с моментами времени, предшествующими нарушению сплошности участков массивов горных пород [15]. Это согласуется с “квазирезонансным механизмом” возникновения катастрофических событий, обосновываемым в работе [17].

ВЫВОДЫ

Из проведенных натуральных экспериментов по контролю за процессом разрушения горных пород с помощью измерительного приборного комплекса РДК РЭМИ-3 следует, что на стадии их предразрушения происходит существенное изменение параметров и структуры сигналов ЭМИ, которое может быть положено в основу разработки диагностических критериев и прогнозирования их разрушения.

Выполненные исследования ЭМИ в условиях подземных горных выработок Таштагольского месторождения с помощью аппаратуры РЭМИ-2 показали, что перед динамическими событиями в породном массиве отмечается повышение уровня ЭМИ до значения, превышающего фоновый уровень примерно в 10 раз. Этот признак может свидетельствовать о приближении опасного события.

Разработан, изготовлен и испытан в натуральных условиях регистрационно-диагностический и программно-аппаратный комплекс РДК РЭМИ-3, позволяющий, в отличие от РЭМИ-2, проводить накопление данных и их запись в память прибора с последующим анализом цифровой информации на персональном компьютере. Достоинством его является возможность регистрации осциллограмм сигналов ЭМИ в тех случаях, когда амплитудные значения сигналов перед динамическим проявлением существенно изменяются по отношению к фоновому излучению. При этом он работает непрерывно в течение ~4 ч с одновременной записью информации в память прибора, что позволяет осуществить последующий ее анализ. Появляется также возможность анализа изменения структуры сигналов ЭМИ на стадии предразрушения, что важно для диагностики приближения стадии нарушения сплошности горных пород.

На основании анализа сигналов электромагнитного излучения установлен эффект перехода от стационарной стадии (накопления трещин) к возникновению нестационарной стадии (разрушения). Данный эффект связан с возникновением в сигналах ЭМИ квазипериодических низкочастотных колебаний с переменной амплитудой и длительностью, что свидетельствует о возникновении геомеханического автоколебательного процесса “квазирезонансного” типа на стадии разрушения горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Соболев Г. А.** Основы прогноза землетрясений. — М.: Наука, 1993.
2. **Опарин В. Н., Сашурин А. Д., Кулаков Г. И. и др.** Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
3. **Вознесенский А. С., Набатов В. В.** Оценка трещинообразования в массиве с гипсосодержащими породами методом регистрации электромагнитного излучения // ФТПРПИ. — 2003. — № 3.
4. **Методические указания** по сейсмоакустическим и электромагнитным методам получения критериев степени удароопасности. — Л.: ВНИМИ, 1980.
5. **Указания** по бесконтактным геофизическим методам прогноза степени удароопасности участков угольных пластов и рудных залежей. — Л.: ВНИМИ, 1981.
6. **Исаев Ю. С., Скакун А. П., Яковлев В. А., Мильман Г. Л.** Новая шахтная геофизическая аппаратура для оценки и контроля строения, свойств и состояния массива горных пород: сб. тр. Междунар. конф. 22 – 25 июня 1998 г. “Горная геофизика”. — СПб., 1998.

7. Гредина Н. Г., Климко В. К., Кручинин В. А., Машковцев Е. А. Результаты наблюдений за изменением естественного электромагнитного излучения по мере отработки очистного блока // Разработка удароопасных месторождений: межвуз. сб. науч. тр. — Кемерово: КузПИ, 1986.
8. Скитович В. П., Лазаревич Л. М. Оценка НДС массива методом регистрации естественного электромагнитного излучения // Геофизические способы контроля напряжений и деформаций: сб. науч. тр. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1985.
9. Курленя М. В., Кулаков Г. И., Вострецов А. Г., Ваганова В. А., Моисеев С. В., Яковицкая Г. Е. Фоновое электромагнитное излучение горных пород, регистрируемое в подземных выработках // ФТПРПИ. — 2002. — № 2.
10. Кузнецов С. В. Совместная регистрация электромагнитных и сейсмоакустических сигналов // Геофизические способы контроля напряжений и деформаций: сб. науч. тр. — Новосибирск, ИГД СО АН СССР, 1985.
11. Королевцев А. Н., Павлюков В. К. Приливной отклик импульсного электромагнитного излучения и краткосрочный прогноз сильных землетрясений // Проблемы сейсмичности Дальнего Востока. — Петропавловск-Камчатский: Изд-во Камчатской опытно-метод. сейсмол. партии геофиз. службы РАН, 2000.
12. Вострецов А. Г., Кривецкий А. В., Бизяев А. А., Яковицкая Г. Е. Аппаратура регистрации сигналов ЭМИ в условиях подземных горных выработок // ФТПРПИ. — 2008. — № 2.
13. Курленя М. В., Еременко А. А., Шрепп Б. В. Геомеханические проблемы разработки железорудных месторождений Сибири. — Новосибирск: Наука, 2001.
14. Вострецов А. Г., Кривецкий А. В., Бизяев А. А., Яковицкая Г. Е. Регистрационно-диагностический комплекс РЭМИ-3 для диагностики разрушения в массиве горных пород на основе сигналов электромагнитного излучения // ФТПРПИ. — 2012. — № 3.
15. Яковицкая Г. Е. Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии. — Новосибирск: Параллель, 2008.
16. Пат. 2426880 РФ, МПК⁷ Е 21 С 39/00. Способ прогноза нарушения сплошности участка массива горных пород /А. Г. Вострецов, А. В. Кривецкий, А. А. Бизяев, Г. Е. Яковицкая // Опубл. в БИ. — 2011. — № 23.
17. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. III //ФТПРПИ. — 2014. — № 4.

Поступила в редакцию 11/IX 2014