

УДК 622.831

**АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ,
СОПУТСТВУЮЩЕГО РАЗРУШЕНИЮ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД**

А. А. Бизяев^{1,2}, А. Г. Вострецов^{1,2}, И. И. Смирнягин¹, М. Д. Шарапова¹

¹*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,*

E-mail: bizyaev@yandex.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

²*Новосибирский государственный технический университет,
Карла Маркса, 20, 630073, г. Новосибирск, Россия*

Приведены результаты экспериментальных исследований разрушения образцов горных пород, имеющих порфиробластовую, гранобластовую, лепидобластовую и слоистую структуру. Эксперименты проводились на лабораторном стенде АСИ-2. Образцы горной породы подвергались одноосному сжатию до нарушения сплошности с синхронной регистрацией сигналов сопутствующего электромагнитного излучения, нагрузки и перемещения вдоль оси сжатия. При разрушении горной породы слоистой структуры проявляются анизотропные свойства геофизических параметров и электромагнитного излучения.

Динамические проявления горного давления, напряженно-деформированное состояние, электромагнитное излучение, лабораторные исследования, критерии прогноза горных ударов

DOI: 10.15372/FTPRP120230520

В настоящее время успешно развиваются геофизические методы прогнозирования динамических проявлений горного давления в окрестности выработок, основанные на регистрации и интерпретации электромагнитного излучения (ЭМИ). Известно, что в процессе разрушения горных пород наблюдается ЭМИ, спектр которого на разных стадиях нарушения сплошности отличается [1–3]. В [2] приведена модель, основанная на механо-электромагнитных преобразованиях, но она не учитывала структуру горной породы. В настоящей работе формируется модель разрушения горной породы с учетом структурной организации.

В лабораторных условиях установлено, что при разрушении горных пород увеличивается количество одиночных импульсов [4]. Спектральная плотность мощности сигнала по мере разрушения смещается в верхнюю область частотного спектра, затем обратно в нижнюю, но с большей энергией излучения. При разработке аппаратуры, прогнозирующей динамические проявления горного давления в виде горного удара или стреляния, необходимо учитывать геологическую структуру горных пород, их механические, физические свойства, а также контакты с другими породами.

В настоящем исследовании для разработки модели разрушения горных пород лабораторными испытаниями проведено деформирование образцов горных пород, имеющих слоистую, порфириобластовую, гранобластовую и лепидобластовую структуру.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ СИНХРОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ ЭМИ, НАГРУЗКИ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

В Институте горного дела СО РАН разработан автоматизированный лабораторный стенд АСИ-2 для исследования трещинообразования в твердых материалах (рис. 1). Он представляет собой пресс для одноосного сжатия образцов горных пород с одновременной регистрацией электромагнитных сигналов, нагрузки и перемещений.

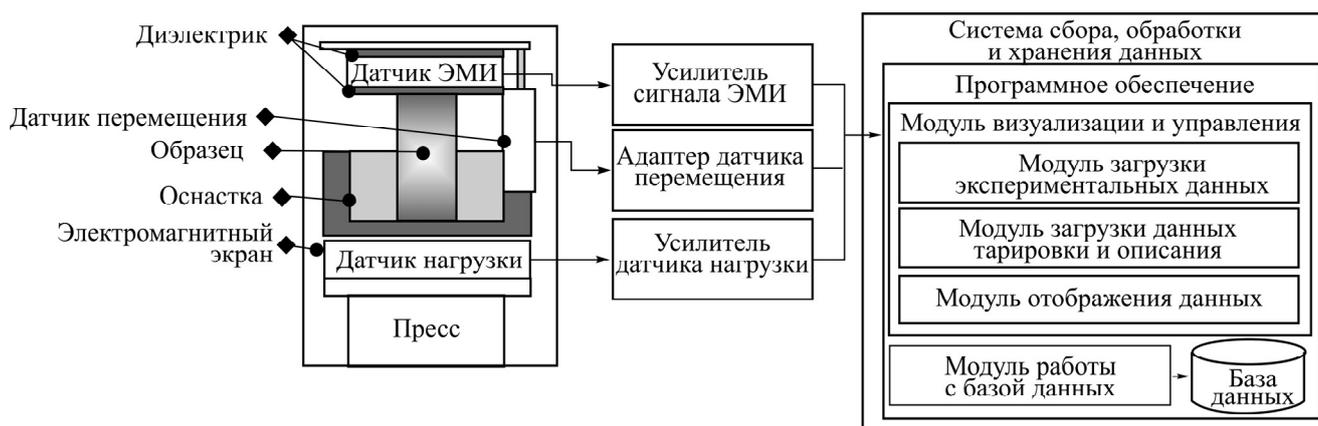


Рис. 1. Схема лабораторного стенда АСИ-2

В качестве нагружающего устройства применяется гидравлический пресс усилием до 300 кН с гидронасосом. Высота исследуемого образца выбирается не менее двух его диаметров для обеспечения в средней части области однородного напряженно-деформированного состояния. Нагрузка на образец регистрируется датчиком силы в виде кольцевого цилиндра, на поверхности которого наклеены тензорезисторы, включенные по мостовой схеме Уитстона. Система одноосного нагружения подключена к измерительно-вычислительному комплексу.

Определение деформации заключается в измерении продольного перемещения образца горной выработки с помощью оптомеханического датчика точностью до 1 мкм [5, 6]. Вблизи образца устанавливается датчик ЭМИ. Для уменьшения наводок все используемые датчики соединяются с измерительным комплексом с помощью согласованных коаксиальных кабелей, а сам пресс с оснасткой и датчиками закрывается электромагнитным экраном.

С использованием программного обеспечения системы сбора, обработки и хранения данных осуществляется запись в базу данных. Показания со всех датчиков синхронно считываются с интервалом 1 мс и записываются в память в виде кадров. Признак формирования кадра — превышение порогового уровня, выставленного в системе сбора, обработки и хранения данных. При этом в память записывается 4000 отсчетов до превышения порога и 16000 после его превышения.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В ходе лабораторных исследований образцов мрамора с гранобластовой структурой проведено свыше 20 экспериментов. На рис. 2 представлены фотографии образца розового мелкозернистого мрамора до и после нагружения.

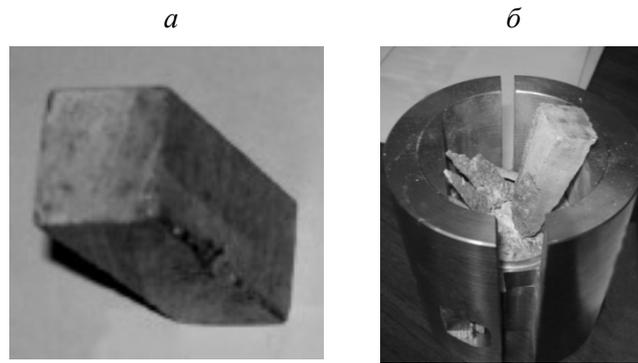


Рис. 2. Образец мелкозернистого мрамора до (а) и после (б) проведения эксперимента

Образец нагружался с постоянной скоростью в течение 10 мин до полного разрушения. Система измерений была настроена на четыре канала, частота взятия отсчетов на один канал составляла 250 кГц; количество претриггерных отсчетов — 2000, послетриггерных — 18 000. Уровень срабатывания триггерного канала составлял 8 мВ относительно уровня собственных шумов усилителя; коэффициент усиления входного каскада канала ЭМИ — 70 дБ. Исследование сигналов ЭМИ проводилось на стадиях предразрушения I–III. Образец деформировался до уровня падения нагрузки, равной нулю, что свидетельствовало о нарушении сплошности горной породы (стадия IV).

На рис. 3 представлены синхронные осциллограммы сигналов с каналов ЭМИ, нагрузки и перемещения, записанные в ходе эксперимента, при котором образец мрамора подвергался одноосному сжатию до нарушения сплошности породы. Приведены все записанные кадры. Разрушение образца мрамора проходило в три этапа: первый произошел в интервале 152 580–162 580 мс; второй — 162 580–172 580; третий — 172 580–177 580 мс.

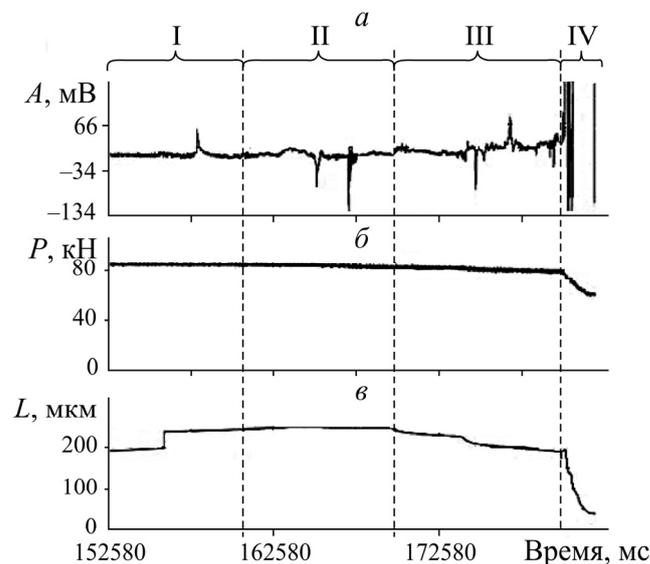


Рис. 3. Осциллограммы деформирования образца среднезернистого мрамора: а — канал сигнала ЭМИ; б — канал нагрузки; в — канал датчика перемещения; I–IV — стадии разрушения

В процессе разрушения на каждом этапе выделяемая мощность в виде электромагнитных колебаний увеличивалась, возрастало и время проявления сигнала ЭМИ. Все этапы предразрушения сопровождаются изменением структуры и параметров сигнала ЭМИ. В процессе раз-

рушения образца наблюдается характерное изменение спектра сигнала от 20 до 140 кГц и выше [2]. Амплитудная составляющая спектра сигнала увеличивается в 2 раза на частотах 20 кГц, выделяется зона разрушения с накоплением микротрещин (рис. 4).

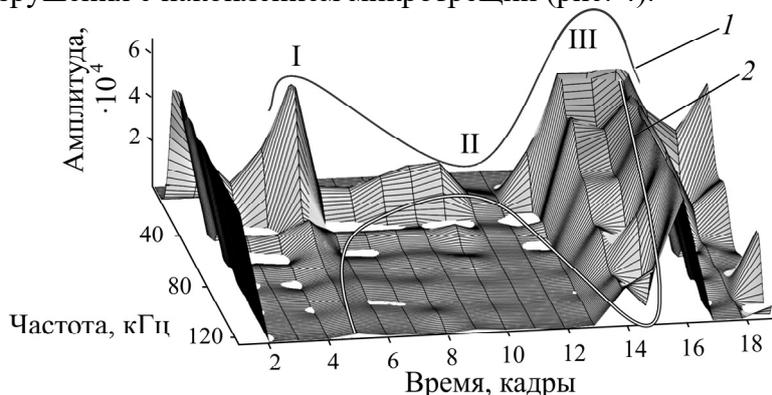


Рис. 4. Спектрально-временной анализ сигналов ЭМИ образца мрамора: 1 — амплитудная; 2 — спектральная составляющая; I–III — стадии разрушения

Образец мрамора в ходе эксперимента раскололся на три крупные части, образовывались три объемные магистральные трещины, отклики роста которых наблюдаются на синхронной осциллограмме, приведенной на рис. 3. На стадии III отмечаются квазирезонансные процессы [7, 8]. Образец нагружался со скоростью 0.3 кН/с. О появлении трещин свидетельствуют наблюдаемые на канале электромагнитные импульсы в сигнале, превышающие уровень собственных шумов. При этом на канале нагрузки отмечается постоянная составляющая, что свидетельствует о механической разгрузке на образце в моменты роста трещин.

На рис. 5 представлен спектрально-временной анализ сигналов ЭМИ для образцов диабаз и базальта, имеющих порфиробластовую и лепидобластовую структуру соответственно.

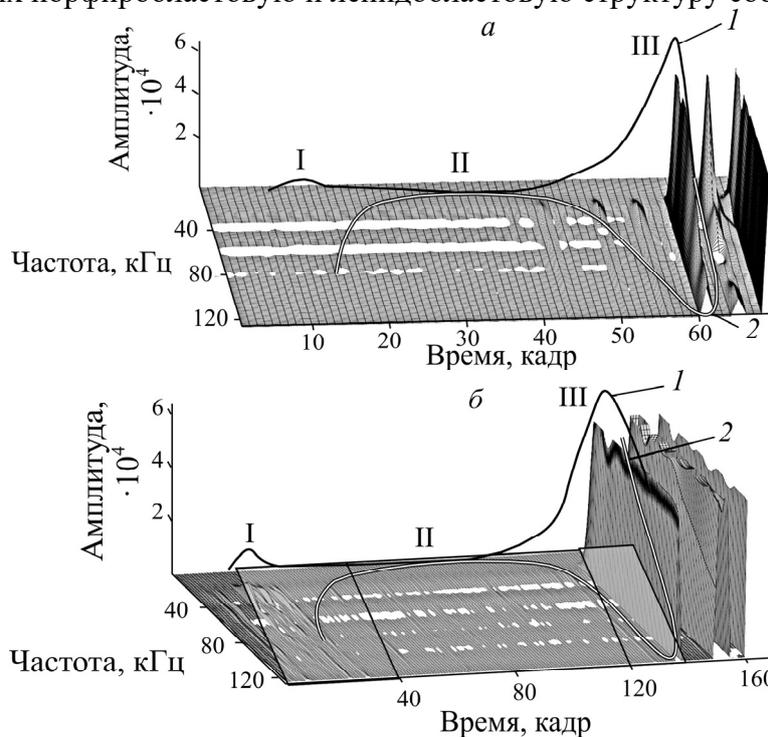


Рис. 5. Спектрально-временной анализ сигналов ЭМИ образцов диабаз (а) и базальта (б): 1 — интенсивности амплитудных характеристик; 2 — смещение активной части спектра; I–III — стадии разрушения

Из спектрально-временного анализа сигналов ЭМИ видно, что на стадии III наблюдается увеличение амплитудных составляющих спектра сигнала более чем в 10 000 раз относительно стадий I и II. Это необходимо учитывать при построении аппаратно-программных комплексов для прогнозирования динамических проявлений горного давления на основе регистрации и интерпретации сигналов ЭМИ.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

При подготовке к испытаниям образцы угля со слоистой структурой распиливались во взаимно перпендикулярных направлениях относительно слоистости горной породы. Образец 1 распилен так, чтобы при установке в стенд нагружение осуществлялось поперек слоистости, образец 2 — вдоль слоистой структуры. Образец, размером $25 \times 25 \times 40$, подвергался одноосному нагружению до полного разрушения. Синхронно регистрировались сигналы ЭМИ и нагрузки. Осциллограммы сигналов ЭМИ и нагрузки показаны на рис. 6а, б (образец 1) и рис. 6в, г (образец 2).

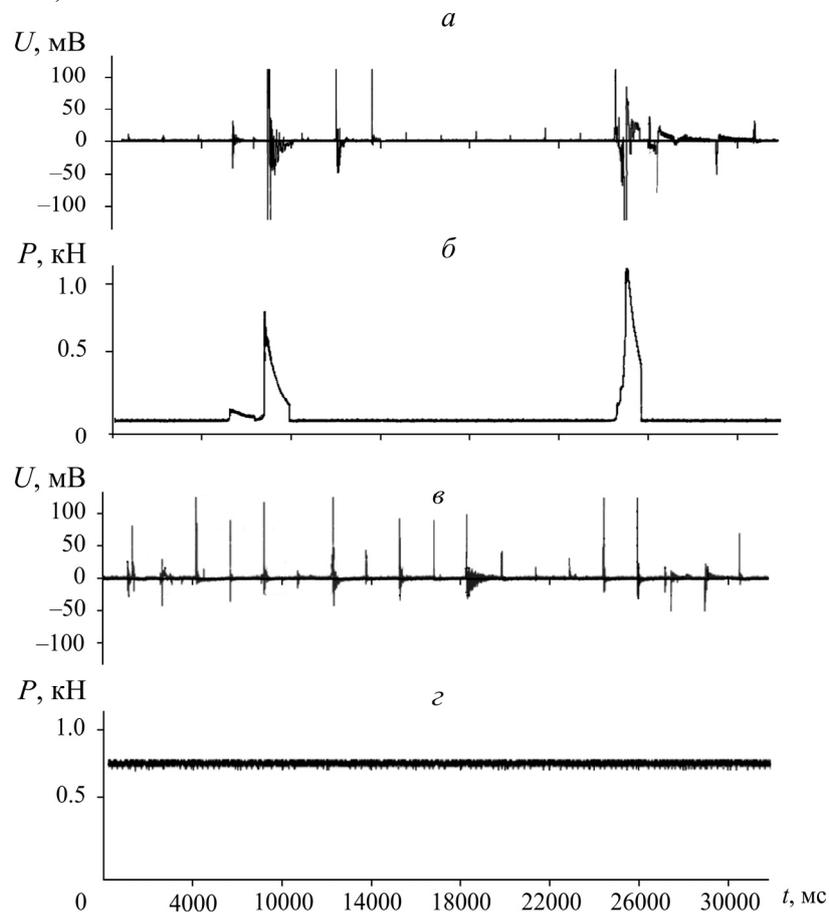


Рис. 6. Синхронно зарегистрированные осциллограммы сигнала ЭМИ (а, в) и нагрузки (б, г) на образцах угля 1 (а, б) и 2 (в, г)

Установлено, что образец угля 1 при нагрузке 1.2 кН разрушается. Возникновение микротрещины сопровождается всплесками одиночных импульсов с энергией не более 25 мВ, что характеризует первую стадию разрушения горной породы. Слиянию микротрещин сопутствует сигнал с амплитудой до 50 мВ (стадия II). Росту магистральной трещины соответствует амплитуда до 100 мВ (стадия III). Образец 2 при нагружении разрушился на большое количество

ство мелких осколков. Наблюдалось множественное формирование одиночных импульсов, образец разрушился, когда нагрузка еще не достигла 1 кН. В отличие от угля, мрамор, базальт, кварц и песчаник выдерживают нагрузку до 30 кН.

Результаты статистического анализа параметров ЭМИ с объемом выборки ~ 20 на каждый вид породы представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Результаты статистического анализа параметров ЭМИ

Горная порода (структура)	Стадия	P_{\max} , кН	E , 10^4 МПа	t , с	U_{\max} , мВ	Активная ширина спектра, кГц
Мрамор (гранобластовая)	I	220	4.4	0.014	11	7.187
	II	225		0.007	6	5.380
	III	225		0.080	41	0.730
Базальт (лепидобластовая)	I	50	14.0	0.006	3	11.500
	II	300		0.004	1.5	6.500
	III	360		0.012	31	2.300
Диабаз (порфиробластовая)	I	45	4.7	0.024	21	12.500
	II	60		0.020	18	—
	III	65		0.100	30	5.750
Вмещающая порода шахты им. С. М. Кирова (слоистая)	I	0.9	10.0	0.003	14	1.700
	II	—		—	—	—
	III	10		0.040	200	0.570
Вмещающая порода шахты им. А. Д. Рубана (слоистая)	I	0.9	9.7	0.000016	14	3.100
	II	—		—	—	—
	III	10		0.002	200	2.500

Примечание. P_{\max} — максимальная нагрузка; E — модуль Юнга; t — длительность низкочастотных импульсов; U_{\max} — максимальная амплитуда низкочастотных импульсов.

Установлено, что при разработке аппаратно-программных комплексов для прогнозирования динамических проявлений горного давления на основе регистрации и интерпретации сигналов ЭМИ необходимо учитывать геологическую и метаморфическую структуру горных пород. Если в породе наблюдается слоистость, ее необходимо также принимать во внимание при формировании оценки временного интервала, на котором должно произойти нарушение сплошности.

ВЫВОДЫ

В ходе проведенных экспериментов на образцах, имеющих различные геологические и метаморфические структуры, показано, что горные породы характеризуются различными способностями к излучению электромагнитного сигнала. Образцы мрамора на стадиях предразрушения I, II излучали сигнал амплитуды спектральной плотности мощности в 2–3 раза ниже относительно уровня стадии III, в отличие от образцов диабаза и базальта, у которых отношение амплитудных составляющих меняется в 1000 раз.

Горным породам со слоистой структурой присуще проявление анизотропных характеристик как в сигналах ЭМИ, сопутствующих разрушению, так и в механических параметрах породы. По форме затухания одиночных импульсов ЭМИ можно определить направление меха-

нического напряжения вдоль слоистости или поперек ее. Когда порода испытывает нагрузки вдоль слоистой структуры, электромагнитное излучение более интенсивное, в отличие от поперечного нагружения.

При разработке аппаратно-программных комплексов прогноза динамических проявлений горного давления необходимо учитывать геологическую структуру вмещающих пород, анизотропные проявления, способность к накоплению механических напряжений, а также направление деформирования пород относительно слоистости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Соболев Г. А., Демин В. М.** Кинетика электромагнитного и акустического излучений как предвестник неустойчивости контактов блоков // ДАН СССР. — 1988. — Т. 303. — № 4. — С. 834–836.
2. **Опарин В. Н., Яковицкая Г. Е., Вострецов А. Г., Серяков В. М., Кривецкий А. В.** О коэффициенте механо-электромагнитных преобразований при разрушении образцов горных пород // ФТПРПИ. — 2013. — № 3. — С. 3–20.
3. **Журков С. Н.** Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вестн. АН СССР. — 1968. — № 3. — С. 46–52.
4. **Вострецов А. Г., Бизяев А. А.** Обнаружение изменения свойств нестационарного пуассоновского потока импульсов неизвестной интенсивности // Научн. вестн. НГТУ. — 2008. — № 3 (32). — С. 37–44.
5. **Панин В. Е., Лихачев В. А., Гриняев Ю. В.** Структурные уровни деформации твердых тел. — Новосибирск: Наука, 1985. — 229 с.
6. **Иванов В. В., Егоров А. А., Колпакова Л. А., Пимонов А. Г.** Динамика трещин и электромагнитное излучение горных пород // ФТПРПИ. — 1988. — № 5. — С. 20–27.
7. **Опарин В. Н., Акинин А. А., Востриков В. И., Юшкин В. Ф.** Нелинейные деформационно-волновые процессы в окрестности выработок // ФТПРПИ. — 2003. — № 4. — С. 3–18.
8. **Алексеев Д. В., Егоров П. В., Иванов В. В., Мальшин А. Н., Пимонов А. Г.** Херстовская статистика временной зависимости электромагнитной эмиссии при нагружении горных пород // ФТПРПИ. — 1993. — № 5. — С. 27–31.

Поступила в редакцию 10/VIII 2023

После доработки 13/IX 2023

Принята к публикации 15/IX 2023