

УДК 622.831

**ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА СИНХРОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ ЭМИ
И МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД В ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ**

А. Г. Вострецов^{1,2}, Г. И. Кулаков¹, А. А. Бизяев^{1,2}, Г. Е. Яковицкая¹

¹*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: yge@ngs.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

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

Приведено описание измерительной системы для синхронной регистрации сигналов электромагнитного излучения (ЭМИ) и механических параметров деформирования образцов горных пород в лабораторных экспериментах. По данным проведенных испытаний определены изменения структуры и спектральных характеристик сигналов электромагнитного излучения на стадии, предшествующей нарушению сплошности образцов горных пород, и предложены прогнозные критерии разрушения.

Разрушение, электромагнитное излучение, нагрузка, деформация, прогноз, нелинейность, квазирезонансный процесс, спектральные характеристики, горные породы

DOI: 10.15372/FTPRPI20170622

Исследования процесса разрушения образцов горных пород в лабораторных экспериментах с регистрацией уровня нагружения на образец и сопутствующего электромагнитного излучения проводились многими научными коллективами. Это, прежде всего, работы [1, 2], где наряду с изменением нагрузки регистрировались импульсы ЭМИ-сигналов и устанавливалось их количество, в основном на стадии, предшествующей нарушению сплошности горных пород. Главным недостатком указанных работ был низкий диапазон регистрируемых частот — до 20 кГц. При этом считалось [3, 4], что разрешающая способность системы обработки информации 300 мкс вполне достаточна для регистрации акустических или электромагнитных сигналов. При меньшем интервале между соседними импульсами они регистрировались как один низкочастотный сигнал, что могло приводить к недостоверным выводам относительно параметров эмиссионных сигналов, характеризующих процесс разрушения горных пород. Кроме того, время передачи сигналов из оперативного запоминающего устройства в память ПЭВМ в течение 1 с в процессе проведения эксперимента, когда эмиссионные сигналы не могли быть зарегистрированы, являлось существенным пропуском информации [5–7].

Поставленные в результате проведения лабораторных экспериментов задачи имели своей целью решение фундаментальных проблем — изучение процесса разрушения горных пород в электромагнитных образах на различных этапах их нагружения, а также решение прикладных задач — диагностику, прогноз и контроль процесса разрушения горных пород [8]. Принципиальный интерес представляли исследования особенностей связей между напряженно-

деформированным состоянием (НДС) пород и амплитудно-временными и амплитудно-частотными параметрами сигналов ЭМИ при синхронной регистрации уровня нагружения и деформации хрупких и пластичных образцов горных пород и сопутствующих сигналов ЭМИ в более высоком диапазоне частот и периодов их следования. Однако такие исследования с синхронной регистрацией сигналов ЭМИ и механических параметров (напряжений и деформаций в образце) практически не проводились [9, 10]. Есть основания ожидать, что изменения структуры эмиссионных сигналов на различных этапах нагружения позволят более детально исследовать особенности процесса разрушения горных пород в электромагнитных образах. Это даст возможность проводить диагностику и разработку прогнозных критериев разрушения горных пород более обосновано.

ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В [8] описаны эксперименты по синхронной двухканальной регистрации нагрузки и сигналов ЭМИ при нагружении образцов горных пород, в настоящей работе проведены эксперименты по трехканальной регистрации.

Для решения поставленных задач выполнено следующее:

— разработаны стенд и методика для регистрации механических параметров и сигналов электромагнитного излучения, а также канал регистрации перемещений (деформаций) в образце;

— обеспечена синхронная регистрация сигналов ЭМИ, нагрузки и перемещений образцов горных пород на различных стадиях нагружения в диапазоне частот до 125 кГц;

— обнаружены наиболее информативные участки осциллограмм сигналов ЭМИ на различных стадиях нагружения;

— определены количество импульсов ЭМИ при разрушении образцов горных пород, их длительности τ и временные интервалы T между соседними импульсами и их изменение по мере увеличения нагрузки на образец;

— выявлены характер изменения в структуре сигналов ЭМИ на различных стадиях нагружения образцов горных пород и на их основе установлены закономерности подготовки и протекания процесса разрушения последних в электромагнитных образах;

— разработаны прогнозные признаки разрушения образцов горных пород.

Экспериментальные исследования осуществлялись на лабораторном стенде, включающем гидравлический пресс усилием до 300 кН. Для регистрации сигналов ЭМИ использовались стандартные датчики электрического и магнитного типов фирмы RFT (Германия), выполненные в виде штыревых (электрического типа) и стержневых (магнитного типа) антенн, последовательно подключаемые к широкополосному усилителю с полосой пропускания 3 Гц–300 кГц и коэффициентом усиления 500.

Для регистрации нагрузки на образец использовался датчик силы фирмы НВМ (Hottinger Baldwin Messtechnik, Германия), имеющий вид кольцевого цилиндра и подключенный к симметричному усилителю постоянного тока (УПТ) с полосой пропускания сигнала от 0 до 200 кГц и с коэффициентом усиления 500.

Для измерения перемещений в образцах горных пород служил датчик фирмы “Megatron” (Германия), тип MS 30-1-LD, в основе которого заложена модуляция светового потока при прохождении через измерительную линейку с нанесенными на ее поверхность рисками. Датчик подключался к устройству регистрации деформации, которое преобразовывало сигналы инкрементального датчика в непрерывную аналоговую величину, меняющуюся при передвижении штока датчика в заданном направлении. Это обеспечивало возможность синхронной регистрации сигналов ЭМИ, нагрузки и перемещений в лабораторном эксперименте.

Устройство для регистрации деформаций представляет собой два независимых канала, включающих сдвиг-шифратор, счетчик, сдвиговый (масштабирующий) регистр, цифро-аналоговый преобразователь и фильтр. Общим для двух каналов является последовательный интерфейс, используемый для опроса комбинации на выходе сумматора персональным компьютером.

На рис. 1 представлен один канал регистрации деформации с подключенным датчиком перемещения.

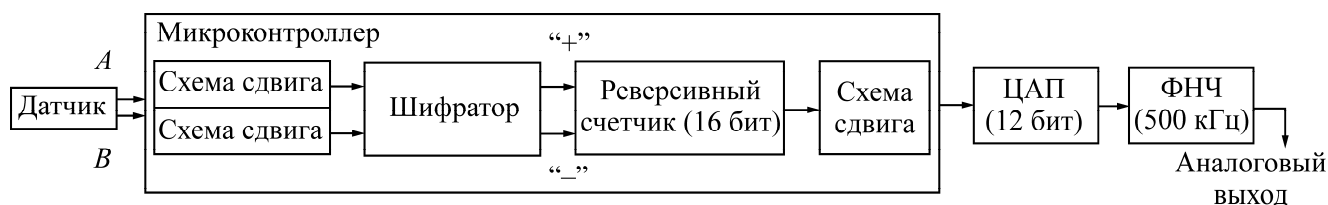


Рис. 1. Общий вид одного канала устройства регистрации деформации с подключенным датчиком перемещения: ЦАП — цифро-аналоговый преобразователь; ФНЧ — фильтр нижних частот

На рис. 2 приведена структурная схема стенда для проведения экспериментальных исследований с синхронной регистрацией нагрузки, продольных перемещений и сигналов ЭМИ на образцах горных пород. Стенд включает пресс, приемную ЭМИ-антенну, датчики измерения нагрузки и перемещений, систему усилителей, систему регистрации АСИ-2 (автоматизированную систему измерений), ПЭВМ. Одноосное нагружение образцов осуществлялось до полного их разрушения, которое определялось по резкому падению перемещения и нагрузки (потерей несущей способности образца). Для минимизации влияния электромагнитных помех на результаты измерений датчики с образцом размещались в электромагнитном экране, выполненном в виде прямоугольного параллелепипеда высотой 110 см, шириной 67 см и толщиной 50 см, толщина стенки 3 мм. На рис. 3 показан общий вид пресса и деформационный канал с подключенным датчиком перемещения.

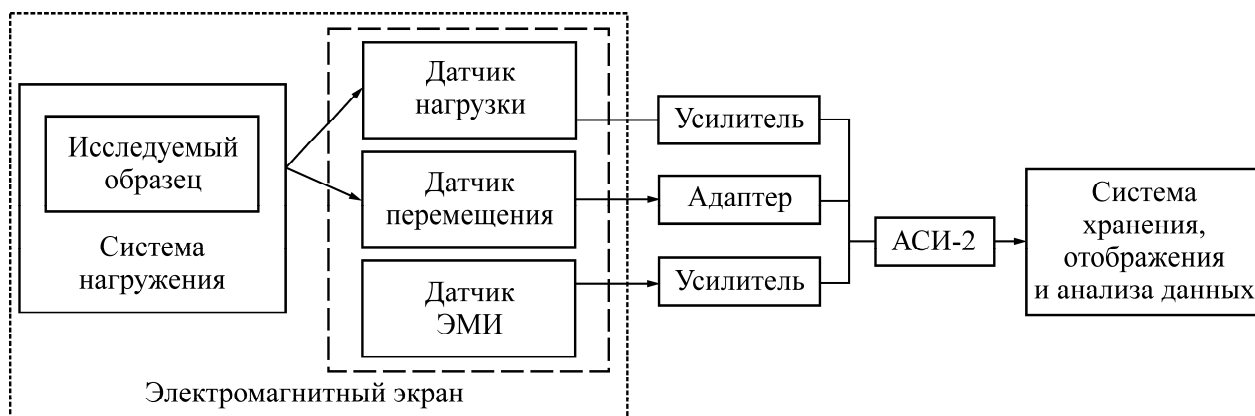


Рис. 2. Структурная схема стенда для проведения экспериментальных исследований с синхронной регистрацией нагрузки, продольных перемещений и сигналов ЭМИ на образцах горных пород: АСИ-2 — автоматизированная система измерений

СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ (АСИ-2)

Основу структурной схемы системы регистрации и обработки информации составляет ПЭВМ с установленным на ее материнской плате высокоскоростным модулем аналогового ввода EISA-A2000 фирмы National Instruments. Модуль аналогового ввода содержит четыре одинаковых канала ввода аналоговой информации (0, ..., 3), один канал аналогового (ATRIG) и один канал цифрового (DTRIG) управления запуском аналого-цифрового преобразователя

(АЦП). Все каналы имеют цепи защиты от перегрузки до 30 В, а каналы аналогового ввода — устройства выборки и хранения. Входная информация запоминается в устройствах выборки и хранения, выходы которых поочередно с помощью мультиплексора подключаются на вход 12-разрядного АЦП, максимальная частота преобразования которого (интервал дискретизации) составляет 10^6 отсчетов в секунду. Следовательно, максимальная частота преобразования по четырем каналам равна 125 кГц. Подробно система регистрации описана в [8].

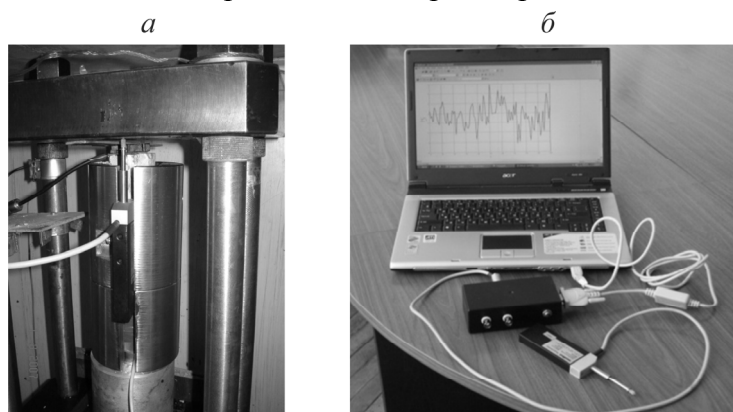


Рис. 3. Внешний вид пресса с датчиком MS-30 в процессе проведения экспериментальных работ по одноосному нагружению образцов горных пород (а) и внешний вид деформационного канала с подключенным датчиком перемещения (б)

АСИ-2 может быть интегрирована в локальную сеть системы сбора и обработки данных RTSI, разработанную фирмой National Instruments, а также (при использовании соответствующего адаптера и программного обеспечения) в любую вычислительную сеть.

На стенде исследовалась структура сигналов ЭМИ при одноосном нагружении образцов со скоростью 0.316 кН/с: мраморной мелкозернистой плитки размерами $80 \times 80 \times 20$ мм, диабаз — высотой 60 мм и диаметром 20 мм, песчаника, базальтов, гранитов, кварцитов, туфов, магнетитовой руды, сиенитов, мраморизованных известняков и других пород, физико-механические свойства которых приведены в таблице.

Физико-механические свойства образцов горных пород [8]

Месторождение	Тип породы	Модуль упругости, 10^4 МПа	Прочность на сжатие, МПа	Коэффициент Пуассона	Объемная плотность, кН/м ³	Удельное сопротивление, Ом/м	Диэлектрическая проницаемость	Скорость продольной волны, 10^3 м/с
Таштагольское	Магнетитовая руда	8.7	143	0.25	44	$10 - 10^5$	6	2.7
	Сиениты	6.0	87	0.25	26	$10^2 - 10^5$	7-14	5.8
	Известняки	3.5	64	0.31	21	$10^2 - 10^3$	8-15	1.8
Шерегешевское	Магнетитовая руда	7.2	174	0.18	44	$10 - 10^5$	6	2.7
	Сиениты	5.1	236	0.26	26	$10^3 - 10^5$	7-14	5.8
Зыряновское	Туфы	6.7	82	0.23	52	10^3	3	3.6
	Кварциты	6.3	84	0.20	26	$10^2 - 10^5$	7	1.0
Абаканское	Туфы	4.1	94	0.22	52	$10^3 - 10^4$	4	3.6
Искитимское	Мраморы	3.5	52	0.28	28	$10^2 - 10^3$	8-10	1.7
Горный карьер	Диабазы	4.6	76	0.24	32	10^2	14-17	—
	Базальты	5.0	92	0.21	38	10^3	4	—

Обеспечение синхронной регистрации сигналов ЭМИ, перемещений и нагрузки в образце по мере ее роста осуществлялось следующим образом. Сигнал ЭМИ с выхода приемной антенны передавался на усилитель, а затем на вход ПЭВМ со встроенным четырехканальным 12-разрядным АЦП. В процессе регистрировались синхронно по трем каналам сигналы ЭМИ, нагрузки и перемещений, параметры которых на экране монитора отображались отдельными кадрами. Каждый кадр содержал по 2^{14} отсчетов напряжений (амплитуд сигналов) с выходов датчиков, взятых с интервалами 4 мкс, т. е. длительность каждого кадра составляла 64 мс. Затем кадры последовательно соединялись и по ним строились осциллограммы и кривые нагружения, перемещений и электроэмиссионных сигналов. Испытано более 40 образцов различных горных пород.

На осциллограмме (рис. 4) по осям абсцисс представлены временные характеристики, а по ординатам — амплитудные параметры сигналов ЭМИ, нагрузки и перемещений (деформационных характеристик). На рис. 4а приведены сигналы ЭМИ, регистрируемые приемной емкостной антенной. Система регистрации настроена так, что амплитуды импульсов сигнала ЭМИ ограничивались на уровне ± 2.5 В.

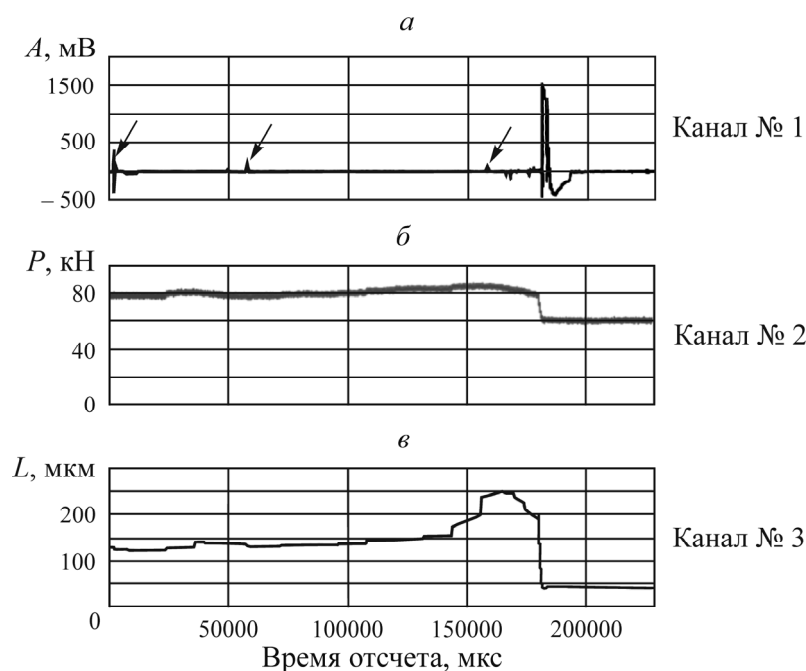


Рис. 4. Осциллограммы сигналов ЭМИ (а), нагрузки (б) и перемещений (в) для образца мрамора от начала нагружения до момента потери сплошности (стрелки указывают на отклики магистральных трещин)

Образец мрамора в ходе эксперимента раскололся на три основные части, в процессе разрушения образовались три объемные магистральные трещины, отклики роста которых можно наблюдать синхронно на осциллограмме. Вначале нагружения сигналы ЭМИ регистрируются на значительных расстояниях друг от друга (рис. 4а) и только вблизи момента нарушения сплошности (рис. 4б) их количество увеличивается. Величина нагрузки в момент нарушения сплошности падает и одновременно сигнал ЭМИ достигает максимального значения. При этом деформация в образце начинает падать несколько раньше, чем нагрузка, что позволяет зарегистрировать процесс начала нарушения сплошности на более ранней стадии.

АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 5 представлена та же, что и на рис. 4, осциллограмма для образца мрамора, но в другом временном масштабе. Показано, что процесс, предшествующий моменту нарушения сплошности образца (разделению его на фрагменты), сопровождается изменением структуры и параметров сигнала ЭМИ. Из осциллограмм (рис. 5а) следует, что начиная с момента времени 157 580 мкс в структуре сигнала ЭМИ появляются изменения в виде возникновения и последующего увеличения низко- и высокочастотных компонент электромагнитных сигналов. Значения сигналов деформаций (рис. 5в) начинают падать со 172 000 мкс.

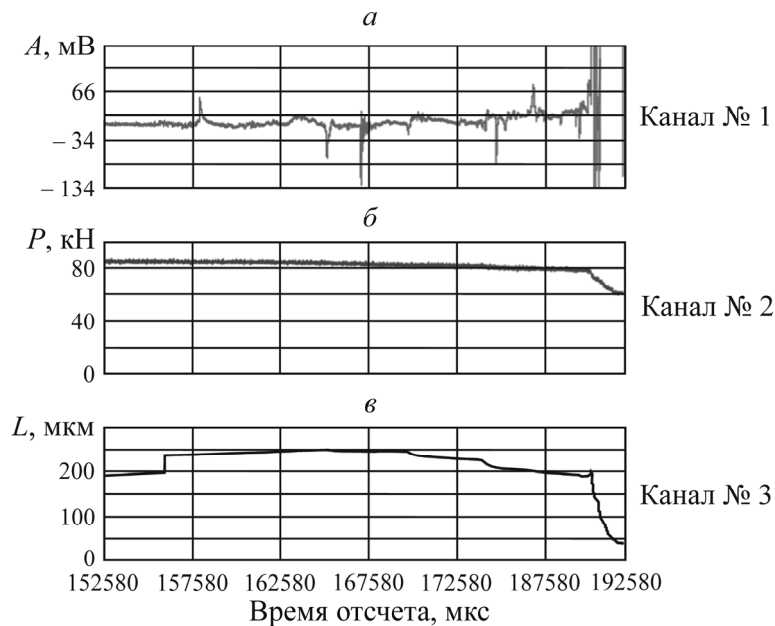


Рис. 5. Осциллограмма сигналов ЭМИ (а), нагрузки (б) и деформаций (в) на стадии предразрушения для образца мрамора

Отметим, что деформационные параметры на образцах и в массиве следует регистрировать на более ранних стадиях, чем напряжения, что позволит более точно зафиксировать начало процесса нарушения сплошности. Для этого был разработан третий (деформационный) канал в стенде, предназначенный для регистрации перемещений. При этом нагрузка начинала падать с еще более позднего момента времени — 180 000 мкс (рис. 5б). Из осциллограмм рис. 5 видно, что наиболее ранняя стадия разрушения образцов регистрируется на канале (а) и характеризуется возникновением сигналов ЭМИ различной структуры, затем следует регистрация сигналов перемещения (канал в) и последняя стадия разрушения — на канале (б).

Указанные изменения в структуре сигнала ЭМИ с ростом нагружения хорошо иллюстрируют изменения его спектральных характеристик. На рис. 6 представлена амплитудно-частотная характеристика сигналов ЭМИ при нагружении образца диабаз. По оси абсцисс показаны временные характеристики сигналов ЭМИ от начала нагружения t , по оси ординат — их частотные параметры f , а по оси аппликат — изменение амплитуд эмиссионных сигналов по мере приближения образца к моменту нарушения сплошности A .

Из рис. 6 следует, что при приближении образца к моменту разрушения в спектре сигнала ЭМИ появляются как высокочастотные, так и отдельные низкочастотные компоненты, являющиеся свидетельством разделения образца на части.

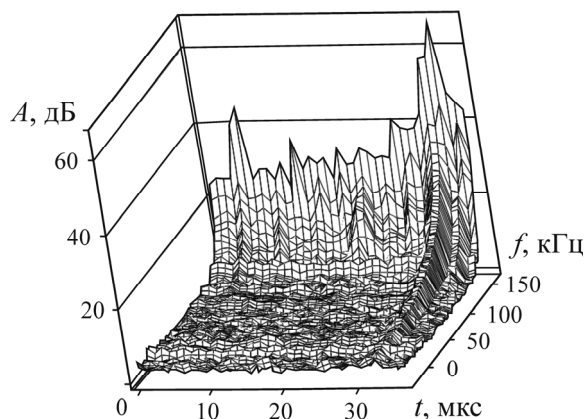


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика сигналов ЭМИ при нагружении образца диабаз

ВЫВОДЫ

Разработан стенд для трехканальной регистрации сигналов ЭМИ, перемещений в образце и нагрузки, а также устройство для регистрации деформаций с подключенным датчиком перемещения типа MS 30-1-LD.

Проведены эксперименты, позволяющие выявить закономерности в изменении структуры и спектральных характеристик сигналов ЭМИ при увеличении нагрузки до разрушающих значений. Предложены диагностические характеристики разрушения при приближении образца к моменту разрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Соболев Г.А.** Основы прогноза землетрясений. — М.: Наука, 1993. — 314 с.
2. **Журков С. Н., Куксенко В. С., Петров В. А.** Физические основы прогнозирования механического разрушения // Докл. АН СССР. — 1981. — Т. 259. — № 6. — С. 1350–1353.
3. **Гуфельд И. Л., Рожной А. А., Яковицкая Г. Е. и др.** Характеристики электромагнитного излучения в массиве // Напряженно-деформированное состояние массивов: сб. науч. тр. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1988. — С. 70–76.
4. **Пат. РФ № 2426880, МПК⁷ С39/00.** Способ диагностики разрушения участка массива горных пород / А. Г. Вострецов, А. В. Кривецкий, А. А. Бизяев, Г. Е. Яковицкая // Оpubл. в БИ. — 2015. — № 8.
5. **Шемякин Е. И., Курленя М. В., Кулаков Г. И.** К вопросу о классификации горных уларов // ФТПРПИ. — 1986. — № 5. — С. 3–11.
6. **Бизяев А. А., Яковицкая Г. Е.** О контроле динамических проявлений горного давления с использованием усовершенствованной аппаратуры регистрации сигналов ЭМИ // ФТПРПИ. — 2015. — № 5. — С. 115–123.
7. **Куксенко В. С., Мансуров В. А.** Локализация разрушения на разных масштабных уровнях // ФТПРПИ. — 1986. — № 3. — С. 49–55.
8. **Яковицкая Г. Е.** Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии. — Новосибирск: Параллель, 2008. — 315 с.
9. **Алексеев Д. В., Егоров П. В.** О форме импульса электромагнитной эмиссии, генерируемого движущейся трещиной // ФТПРПИ. — 1986. — № 5. — С. 3–11.
10. **Вознесенский А. С., Набатов В. В.** Оценка трещинообразования в массиве с гипсосодержащими породами методом регистрации электромагнитного излучения // ФТПРПИ. — 2003. — № 3. — С. 3–12.

Поступила в редакцию 1/XI 2017