

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622. 831

О КОЭФФИЦИЕНТЕ МЕХАНО-ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

В. Н. Опарин^{1,3}, Г. Е. Яковицкая¹, А. Г. Вострецов^{1,2},
В. М. Серяков¹, А. В. Кривецкий^{1,2}

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия
²Новосибирский государственный технический университет,
проспект К. Маркса, 20, 630092, г. Новосибирск, Россия
³Новосибирский государственный университет,
ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Россия

Представлены результаты энергетических оценок при механо-электромагнитных преобразованиях в процессах разрушения образцов горных пород. Оценки можно использовать для диагностики степени удароопасности горных пород в условиях подземных горных выработок.

Разрушение горных пород, электромагнитное излучение, лабораторные эксперименты, деформационные характеристики образцов, коэффициент механо-электромагнитных преобразований

ВВЕДЕНИЕ

Как известно [1, 2], процесс разрушения горных пород сопровождается электромагнитным излучением (ЭМИ). Однако изучение механизма разрушения горных пород на базе анализа сопутствующего ЭМИ дает возможность получить информацию не только для прогнозирования катастрофических событий, но и для решения более широкого круга задач.

К наиболее перспективным из них, одновременно — и проблемным, можно отнести **потенциальную способность управлять дезинтеграционными процессами в механически напряженных образцах горных пород внешними электромагнитными, акустическими или комбинированными (акустоэлектромагнитными) воздействиями в виде волновых пакетов, препарированных по амплитудно-периодному спектру и скважности.**

Можно ставить и более общую, технологическую в своей основе, проблему — **реализация процесса внутреннего изменения структуры образцов гео- или композиционных материалов комбинированным воздействием механических (квазистатических) и физических волновых полей для придания этим материалам требуемых физико-механических и иных свойств.**

Работа выполнена при частичной поддержке партнерского интеграционного проекта СО РАН № 100 и проекта ОНЗ РАН-3.1.

Для такой постановки проблемы и комплекса связанных с ней задач к настоящему времени в геомеханике накоплен достаточный экспериментальный и теоретический материал. В первую очередь это касается фундаментальных достижений в области нелинейной геомеханики [3–5]. К важнейшим из них можно отнести следующие.

Первое. Достижения в области количественного описания блочно-иерархического строения объектов геосреды, практически от нано- до макромасштабных уровней. Крупное научное обобщение этого цикла исследований представлено в работе [6], где с единых позиций обосновывается возможность канонического описания структуры геовещества в аналитических зависимостях с их геотехнологическими свойствами в процессах механического разрушения. Полученные результаты, по существу, закладывают теоретическую базу для нового направления в науках о Земле — **горного породоведения**.

Второе. Открытие явления знакопеременной реакции горных пород на взрывные (динамические) воздействия и сопряженной с ним широкой скоростной группы волн маятникового типа [7–9]. В связи с обсуждаемой проблемой отметим следующие фундаментальные факты:

— возможность поступательного и вращательного осциллирующих движений структурных элементов геоматериалов в стесненных условиях напряженных массивов горных пород (либо искусственно задаваемых напряжений на границах образцов горных пород) и, следовательно, обладания составными фракталами кинетической энергией;

— существование волн маятникового типа позволяет моделировать их вещественные носители — структурные элементы соответствующего уровня (от субмолекулярного до фракталей, соизмеримых с размерами образцов горных пород или композиционных материалов) — как “соударяющиеся” сосредоточенные нелинейно упруго взаимодействующие массы;

— спектральный состав упругих волновых пакетов для волн маятникового типа имеет канонический спектр [9–11]:

$$f_i = (\sqrt{2})^i f_0, \quad i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (1)$$

$$f_0 = \mathcal{G}_p / (2\Delta),$$

\mathcal{G}_p — скорость распространения продольной волны в геоблоке (структурном элементе) диаметром Δ .

Каноническая структура спектра маятниковых волн (1) естественным образом отражает достаточно универсальный закон “квантования” структурных отдельностей горных пород и геоматериалов [6]:

$$\Delta_j = \Delta_0 (\sqrt{2})^j, \quad (2)$$

$\Delta_0 \approx 2.5 \cdot 10^6$ м, $i \in N$ — целые числа (порядок отдельностей); $\Delta_{j+1} / \Delta_j \approx \sqrt{2}$, $\forall j$.

Действительно, подстановка вместо Δ в формулу (1) для базовой частоты f_0 канонических размеров Δ_j из (2) дает эмпирическое [10, 11] выражение для f_i из (1).

Это обстоятельство является принципиально значимым. Оно не следует из классической теории распространения продольных и поперечных упругих волн в континуальных средах. В рамках нелинейной теории волн маятникового типа соотношения (1) и (2) дают важную методологическую основу для конструктивного “препарирования” амплитудно-периодного спектра внешних физических полей на принципе их обратной связи со спектром структурных отдельностей горных пород и геоматериалов.

Говоря о физических полях, авторы имеют в виду, в первую очередь, нелинейные деформационно-волновые, акустические и электромагнитные. В процессах нагружения горных пород и геоматериалов до разрушения они оказываются сопряженными относительно их амплитудно-периодных спектров к иерархии структурных отдельностей геовещества по типу зависимостей (1) и (2). На заключительной стадии нагружения образцов горных пород перед их разрушением эти физические поля приобретают квазирезонансный вид [6, 12–16].

Третье. Как оказывается [10, 13, 14], энергетические условия возникновения волн маятникового типа и геомеханических квазирезонансов в процессах разрушения горных пород практически совпадают, а **энергетическое условие В. Н. Опарина** \hbar (в безразмерном представлении) возникновения волн маятникового типа в напряженных геосредах (с возможной их энергетической “подпиткой” за счет накопленной упругой энергии массивов горных пород) представляется в следующем виде [16]:

$$\hbar = \frac{W}{Mg_p^2} = \theta \cdot 10^{-9}, \quad \theta \in 1 \div 4; \quad M = \rho V; \quad (3)$$

$$W = \alpha(V)[U_0 + W_k]. \quad (4)$$

Здесь $[U_0 + W_k]$ — сумма потенциальной (упругой) U_0 и кинетической W_k энергии движения структурных элементов горных пород в очаговой зоне; $\alpha(V)$ — коэффициент сейсмического действия взрывов по М. А. Садовскому [17]; V — объем очаговой зоны; ρ — плотность горных пород; g_p — скорость продольной волны.

Используем формулы (3), (4) для случая, когда числитель (3) — энергетический параметр W — представляет собой энергию электромагнитного излучения образца горных пород W_3 в процессе его нагружения до разрушения, а знаменатель — полную упругую энергию в образце непосредственно перед разрушением*. Безразмерную энергетическую характеристику, предложенную В. Н. Опариним,

$$\mathfrak{M} = W_3 / U_0, \quad (5)$$

где W_3 — излученная электромагнитная энергия, а U_0 — накопленная породным образцом упругая энергия, назовем **коэффициентом механо-электромагнитных преобразований** \mathfrak{M} .

Рассмотрим далее имеющиеся в литературе данные по результатам анализа и оценкам энергетических характеристик ЭМИ горных пород и других материалов при разрушении, полученные в экспериментах на образцах и в натуральных условиях (при диагностике землетрясений и динамических проявлений в массивах горных пород).

Так, в [2, 18] даны оценки интенсивности излучения ЭМИ для отдельных участков ионных диэлектриков в предположении, что рост и раскрытие субмикротрещин происходит неравномерными скачками. Здесь мощность излучения ЭМИ при температурах $T_1 = 300$ К и $T_2 = 900$ К оценивается в $W_1 = 6 \cdot 10^{-27}$ Вт и $W_2 = 4.4 \cdot 10^{-22}$ Вт соответственно. Однако в [19] считается, что они будут еще меньше.

В [20] для диапазона частот до 10 МГц по импульсам электрического поля из кристаллов на всех стадиях их деформирования отмечено, что значение среднего дипольного момента P на один импульс на стадии микропластичности находится для KCl в пределах $(0.15 - 0.8) \cdot 10^{-15}$ Кл·м; для кристаллов NaCl и LiF — $0.2 \cdot 10^{-15}$ Кл·м и $1 \cdot 10^{-15}$ Кл·м соответственно.

*Нетрудно это обобщить и на случай общей длительности нагружения образцов горных пород вплоть до их разрушения и соответственно полной энергии сопутствующего электромагнитного излучения.

Установлено, что здесь наиболее характерны импульсы двух типов: по времени нарастания $\tau_{\phi} \leq 0.2$ мкс и $\tau_{\phi} = 10^{-5} - 10^{-2}$ с, т. е. высоко- и низкочастотные импульсы. Получены оценочные значения мощности излучения для образцов ЩГК (щелочно-галоидных кристаллов), которые составили $1.4 \cdot 10^{-15}$ и $1 \cdot 10^{-22}$ Вт соответственно.

Недостатком представленных результатов по оценкам мощностных и энергетических характеристик ЭМИ при разрушении горных пород и других материалов является отсутствие в большинстве публикаций сведений о чувствительности аппаратуры и диапазоне принимаемых частот приемного устройства. Кроме того, часто не оговаривались габариты испытываемых образцов. Это затрудняет оценку мощности излучения ЭМИ при различных объемах разрушения. Следует отметить также, что некоторые исследователи специально загроубляли чувствительность измерительной аппаратуры [2], так как уровни полезного сигнала и помех при экспериментах в лабораторных условиях часто были сопоставимы, а мощность ЭМИ-излучения оценивалась приблизительно. В [21] дана оценка линейной плотности заряда при расколе кристалла LiF ($\tau = (10^{-9} \div 10^{-10})/3$ Кл/м). Отмечено, что с уменьшением скорости раскрытия трещины линейная плотность электрического заряда возрастает до максимальной величины $\tau_{\max} = 5/3(10^{-6} - 10^{-5})$ Кл/м. Мощность ЭМИ, генерируемая движущимся с вершиной трещины зарядом, оценена диапазоном $10^{-9} - 10^{-13}$ Вт. Эти оценки существенно разнятся с данными, приведенными в работе [22] для образца гранита, где дипольный момент $P = 10^{-14}$ Кл·м, а излучаемая мощность находится в пределах 10^{-30} Вт.

В [23] мощность излучения трещины при деформации образцов кварцевой керамики оценивается в $1.25 \cdot 10^{-16}$ Вт (при напряженности электрического поля $E = 10^{-8} - 10^{-4}$ В/м), что на несколько порядков отличается от результатов, полученных ранее другими авторами. Известны также оценки мощности электромагнитного излучения, полученные при разрушении образцов горных пород некоторых ударо- и неудароопасных месторождений [2] по испытаниям на одноосное сжатие образцов мраморизованного известняка, туфа, кварцевого сиенита, магнетитовой руды и др. Мощность ЭМИ-излучения здесь характеризуется диапазоном $10^{-12} - 10^{-18}$ Вт.

Согласно [24], напряженность электромагнитного поля при крупномасштабном землетрясении в Карпатах составила $10^{-5} - 10^{-2}$ В/м, а дипольный момент источника тока P крупномасштабного процесса деформирования (в очаговой зоне этого землетрясения) с размерами $L = 10^4 - 10^5$ м, глубиной 100 м, шириной 100 м (объемом $10^8 - 10^9$ м³) достигал значений $10^2 - 10^5$ Кл·м. При этом мощность ЭМИ при единичном акте разрушения с периодом $\tau = 10^{-3} - 10^{-5}$ с крупномасштабного процесса деформирования составила $10 - 10^{-6}$ Вт.

В природных условиях подземных горных выработок напряженность ЭМИ E при стрельании сиенитов, согласно [25], равна 1 мВ/м.

В [26] при регистрации сигналов ЭМИ магнитной антенной с чувствительностью 10^{-2} мкА/м напряженность магнитного поля в зонах шелушения горных пород составила $(7 - 10) \cdot 10^{-2}$ мкА/м, заколообразования — $(15 - 20) \cdot 10^{-2}$ мкА/м; стрельания — $(25 - 45) \cdot 10^{-2}$ мкА/м.

Цель настоящей работы — попытка оценить склонность горных пород к хрупкому разрушению по коэффициенту механо-электромагнитных преобразований (5) на стадии, предшествующей нарушению сплошности образцов горных пород.

Для этого было необходимо:

— выполнить анализ литературных данных по оценке мощности сигналов ЭМИ в очаге разрушения для горных пород и определить их энергетические характеристики применительно к конкретным образцам;

- провести лабораторные эксперименты на различных по размерам, структуре, составу и физико-механическим свойствам образцах горных пород с синхронной регистрацией сигналов ЭМИ на стадии их разрушения;
- сопоставить данные по механическим и электромагнитным энергетическим параметрам образцов горных пород на стадии нарушения сплошности;
- вычислить коэффициент механо-электромагнитных преобразований и сопоставить его со склонностью различных по структуре и составу образцов горных пород к хрупкому разрушению.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились на специальной установке для измерения сопутствующего ЭМИ при деформировании породных образцов в случае их одноосного нагружения до разрушения. Максимальное усилие пресса 1000 кН. При этом регистрировались (рис. 1): нагрузка (канал К1), сигналы ЭМИ (канал К2) и токовые импульсы (по двум каналам К3 и К4). Датчик нагрузки установлен на прессе. Привязка каналов по времени осуществлялась кварцевым синхронметром с точностью не хуже 100 мкс. Скорость нагружения задавалась в зависимости от площади поперечного сечения образцов (3.66–6.02 МПа/с). Для регистрации сигналов ЭМИ применялась магнитная антенна с ферритовым сердечником [27], установленная на расстоянии 0.2 м от боковой поверхности образца. В качестве токовой антенны использовался “пояс Роговского”, представляющий собой тороидальный диэлектрический каркас (из пенопласта) с наружным и внутренним диаметром соответственно 0.3 и 0.26 м и с намотанными на него 500 витками медного провода [27–29].

Электромагнитные сигналы измерялись в частотном диапазоне 70 Гц–20 кГц. Сигналы с датчиков через усилители подавались на компьютер со встроенным многоканальным АЦП (рис. 1).

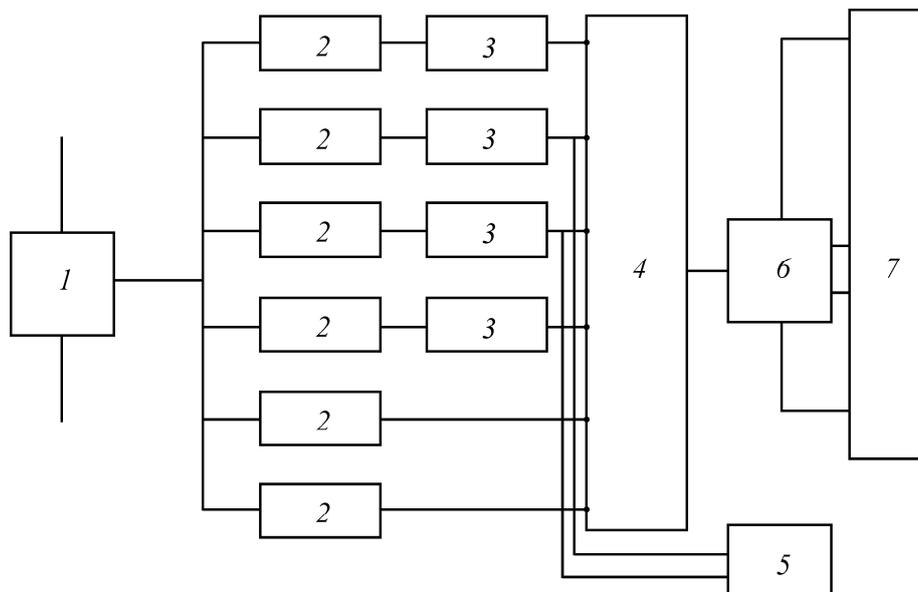


Рис. 1. Структурная схема системы регистрации нагрузки, токовых сигналов и ЭМИ: 1 — испытываемый образец, помещенный между плитами пресса; 2 — датчики ЭМИ, токов, нагрузки P (силоизмеритель и перемещения Пуансона); 3 — усилители; 4 — магнитный регистратор; 5 — двухканальный осциллограф С1-82; 6 — микроЭВМ ДВК-2М; 7 — самописец

В экспериментах использовались образцы горных пород, представляющих гранит, известняк, мрамор, песчаник, мелкозернистый кварцевый сиенит, мелкоигльчатый мелкоблочный туф, мраморизованный известняк, эпидот-гранатовый скарн, массивный мелкозернистый сиенит, мелкозернистый сиенит с прожилками карбоната, магнетитовые руды с различным содержанием руды. Всего испытано свыше 70 образцов, которые изготавливались прямоугольной и цилиндрической формы высотой 0.06–0.17 м и поперечным размером 0.03–0.06 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При исследовании рудных и породных кернов Таштагольского удароопасного железорудного месторождения отмечено следующее. Породные образцы разрушались в основном с хлопающим (иногда стреляющим) звуком; при разрушении образовывались несколько разлетающихся больших кусков и мелкая крошка. Породные керны Зырянского месторождения разрушались с хлопающим звуком на большие куски с образованием крошки.

При проведении экспериментов выделено несколько видов разрушения с характерными признаками:

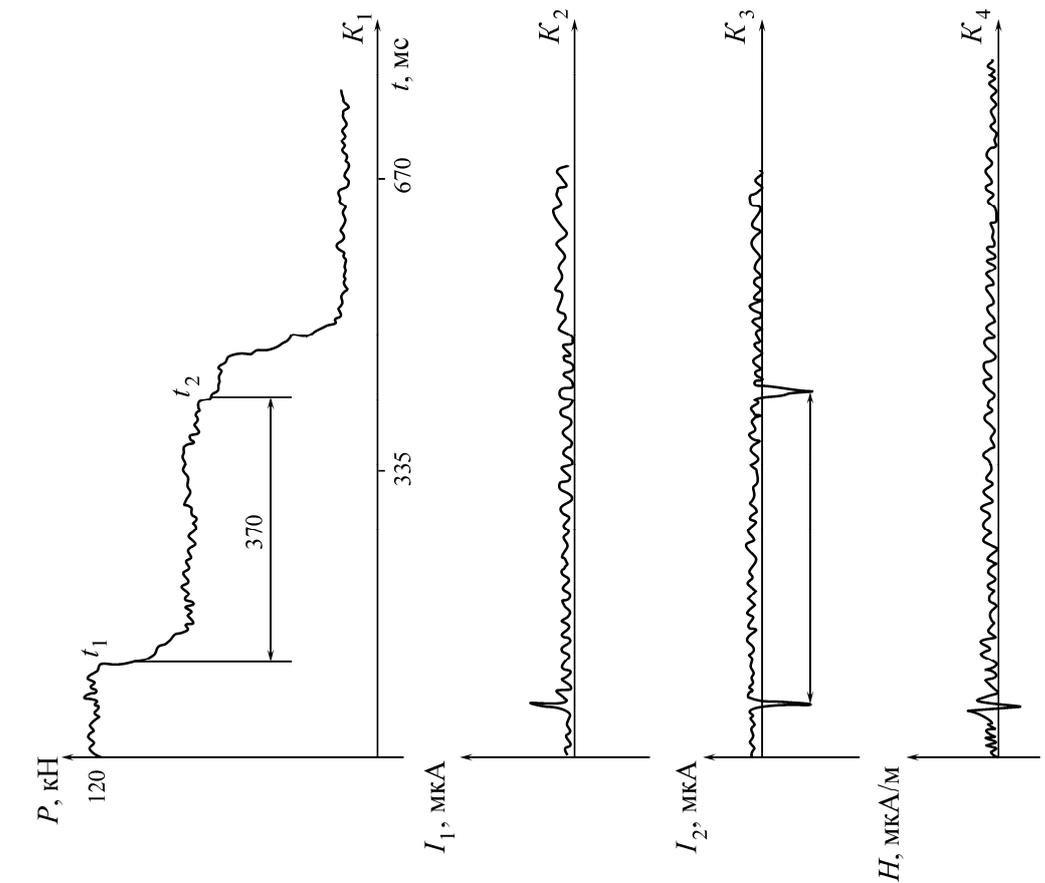
- “плавным” спадом нагрузки — мраморизованный известняк (рис. 2а);
- многоступенчатым падением нагрузки — мелкоигльчатый мелкоблочный туф (рис. 2б);
- резким одноступенчатым падением нагрузки — массивный мелкозернистый сиенит (рис. 3).

Так, для образцов мраморизованного известняка, принадлежащих к “пластичным” породам ($\sigma^* = 14.6$ МПа, где σ^* — предел прочности на одноосное сжатие), характерно “спокойное” развитие процесса разрушения с достаточно плавным падением нагрузки (рис. 2а). Сигналы ЭМИ регистрировались уже на стадии нагружения $(0.4 - 0.6)\sigma^*$. Более прочные горные породы, например образцы мелкоблочного мелкоигльчатого туфа и магнетитовой руды, начинали излучать импульсы ЭМИ только при нагрузке, достигающей $(0.6 - 0.8)\sigma^*$, при этом амплитуды сигналов увеличивались и падение нагрузки (разрушение образца) происходило несколькими ступенями (рис. 2б). Резкое одноступенчатое падение нагрузки (разрушение) у прочных и хрупких образцов кварцита и кварцевого сиенита (рис. 3) наблюдалось лишь при $(0.8 - 0.9)\sigma^*$, при этом регистрируемые токи ЭМИ достигали значений в несколько десятков и даже сотен микроампер. Этот факт отражает способность прочных и хрупких пород накапливать упругую энергию без интенсивного трещинообразования, что может свидетельствовать о склонности этих типов пород к удароопасности.

При проведении лабораторных экспериментов для каждого исследуемого образца получены необходимые записи, в том числе и электромагнитных сигналов, анализ которых позволил воспользоваться формулой (5). В табл. 1 приведены экспериментальные данные по типам, геометрическим размерам исследуемых образцов горных пород, их объемам, а также по деформациям от начальной нагрузки до разрушения.

В табл. 2 представлены механические характеристики этих образцов: максимальная нагрузка, при которой начиналось разрушение; модули упругости и пределы прочности; коэффициент Пуассона и др. Из анализа данных этих таблиц следует, что имеет место достаточно хорошее соответствие полученных результатов для подобных экспериментов других авторов. Правда, такое соответствие достигается не всегда, так как значение предела прочности при эксперименте для данного конкретного образца зависит, например, от исходного уровня трещиноватости и может снижаться при увеличении давления.

б



а

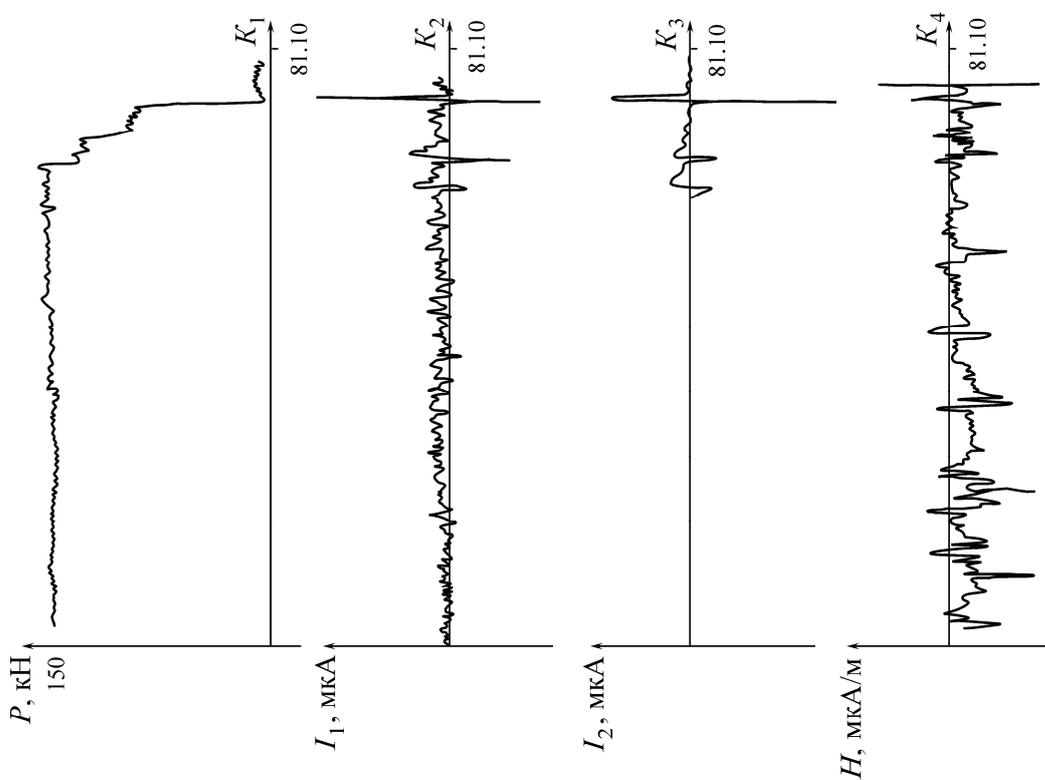


Рис. 2. Записи электромагнитных и токовых сигналов при разрушении образцов мраморизованного известняка (а) и мелкокристаллического мелкоблочного туфа (б)

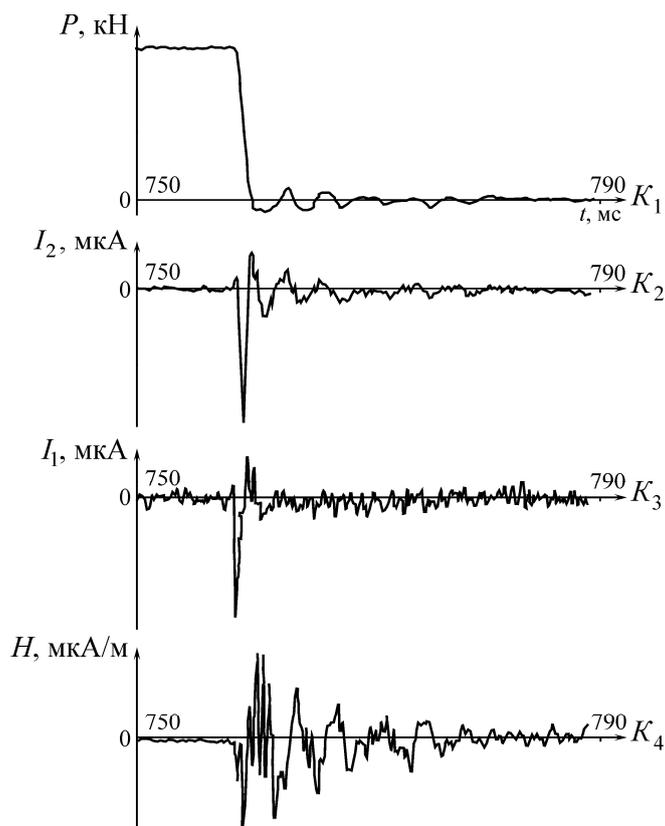


Рис. 3. Записи электромагнитных и токовых сигналов при разрушении образца массивного мелкозернистого сиенита

ТАБЛИЦА 1. Геометрические и деформационные характеристики исследуемых образцов горных пород Таштагольского (Т) и Зырянского (З) месторождений

Номер образца	Тип горной породы	Длина образца H , мм	Диаметр образца d , мм	Площадь образца S , см ²	Деформация от начальной нагрузки до разрушения ΔH , мм	Относительная деформация $\Delta H/H$, 10 ⁻²	Отношение H/d	Объем образца χ , 10 ⁻⁴ м ³
1	Светлосерый массивный мраморизованный известняк — Т	90	59	27.32	0.3	0.33	1.52	2.45
2	Туф мелкоблочный мелкоигольчатый — З	80	46	16.61	1.25	1.56	1.74	1.32
3	Массивная магнетитовая руда с сульфидами (30 %) — Т	180	59	27.32	2.5	1.4(1.38)	3.05	4.91
4	Магнетитовая руда с высоким содержанием сульфидов (60 %) — Т	180	46	16.61	0.6	0.33	3.91	2.98
5	Мелкозернистый кварцевый сиенит с прожилками карбоната — Т	172	59	27.32	0.2	0.11	2.91	4.64
6	Розовый массивный мелкозернистый сиенит — Т	90	59	27.32	1.0	0.11	1.52	2.45
7	Мелкозернистый кварцит — З	70	46	16.61	0.25	0.36	1.52	1.16
8	Мелкозернистый сиенит с прожилками карбоната — Т	93	59	27.32	2.0	2.15	1.57	2.54

ТАБЛИЦА 2. Механические характеристики исследуемых образцов горных пород Таштагольского (Т) и Зырянского (З) месторождений

Номер образца	Тип горной породы	Максимальная нагрузка P , кН	Предел прочности на одноосное сжатие σ^* , МПа	Модуль Юнга E , 10^4 МПа	Коэффициент Пуассона γ	Плотность ρ , 10^3 кг/м ³	Скорость продольной волны V , 10^3 м/с
1	Мраморизованный известняк — Т	4	14.6 26.9 [40]	4.6	0.17	2.5–3.8	1.7 [31–33]*
2	Туф мелкоблочный — З	12	72.2 87 [40]	8.7	0.34	4.4–5.2	3.6 [31–33]
3	Магнетитовая руда (30 %) — Т	9	32.2 32.7 [40]	7.8	0.19	4.4–5.2	2.7 [31–33]
4	Магнетитовая руда (60 %) — Т	15	90.3 58.4 [40]	6.6	0.22	4.4–5.2	3.1 [29–31]
5	Кварцевый сиенит с прожилками карбоната — Т	8	29.2	4.7	0.25	2.6	1.1 [31–33]
6	Массивный мелкозернистый сиенит — Т	24	87.8 73–169 [40]	4.7	0.25	2.6	1.4 [31–33]
7	Мелкозернистый кварцит — З	14	84.2	2.3	—	2.6	1.0 [31–33]
8	Мелкозернистый сиенит с прожилками карбоната — Т	14	51.2 73–169 [40]	4.7	0.25	2.6	0.68 [31–33]

*Цитируемая литература.

В табл. 3 приведены результаты экспериментов для исследуемых образцов по уровню регистрации ЭМИ при “критических” нагрузках (где σ^* — уровень предельных напряжений), а также количество и длительность регистрируемых импульсов электроэмиссионных сигналов.

Из анализа табл. 1–3 и осциллограмм, приведенных на рис. 2, 3, следует, что наиболее информативными для диагностики приближения момента нарушения сплошности образцов по параметрам сигналов ЭМИ в рассматриваемых случаях оказались осциллограммы на участках нагружения, предшествующих разрушению образцов. Сигналы ЭМИ во всех случаях регистрировались в виде одиночных одно- и разнополярных импульсов или их пакетов с длительностью $\tau_{\text{имп}} = 0.45–1.0$ мс для образцов мраморизованного известняка и 2–5 мс — для образцов сиенита и магнетитовой руды соответственно. Длительность между одиночными сигналами или их пакетами ($T_{\text{скв}}$) изменялась в диапазоне 400–470 мс для образцов мраморизованного известняка и 350–420 мс — для образцов магнетитовой руды. Непосредственно на стадии, предшествующей нарушению сплошности — $(0.8–0.95)\sigma^*$, она во всех случаях уменьшалась и составляла в среднем для рассматриваемых образцов 250 и 180 мс соответственно. При приближении к моменту нарушения сплошности у некоторых из испытываемых образцов (например, мраморизованного известняка, магнетитовой руды с 60 % содержанием руды) структура ЭМИ свидетельствует о том, что такие образцы практически не накапливают упругую энергию, расходуя ее на работу по возникновению и развитию трещин (см. табл. 1, образцы 1, 3). Эти образцы пород можно отнести к категории слабосклонных к удароопасности. Отсутствие импульсов ЭМИ при приближении к моменту нарушения сплошности для других образцов (например, кварциты,

кварцевые сиениты, разновидности сиенитов) указывает на то, что передаваемая упругая энергия в процессе нагружения накапливается в них, а затем динамически высвобождается. Это сопровождается громким треском или хлопающим звуком, свидетельствующим о практически мгновенном возникновении значительного количества трещин (см. табл. 1, образцы 2, 5–7). Такие типы горных пород можно отнести весьма склонным к удароопасности.

ТАБЛИЦА 3. Длительность токовых импульсов ($\tau_{импj}$, $j \in 1 \div 4$) и сигналов ЭМИ на стадии предразрушения для исследуемых образцов Таштагольского (Т) и Зырянского (Т) месторождений*

Номер образца	Тип горной породы	Канал регистрации	Момент регистрации при значении σ^*	Длительность $\tau_{имп1}$, с	Длительность $\tau_{имп2}$, с	Длительность $\tau_{имп3}$, с	Длительность $\tau_{имп4}$, с
1	Мраморизованный известняк — Т	К2	0.8–0.85	0	0.54	1.0	0.95
		К3		0.45	0.45	0.9	1.05
		К4		4.85	5.10	4.0	0
2	Туф мелкоблочный мелко-игольчатый — З	К2	0.85–0.90	0	0	0.5	0
		К3		0	0	0.5	0.45
		К4		0	0	7.0	0
3	Магнетитовая руда (с 30 % содержанием железа) — Т	К2	0.85–0.95	0	0	0	5.0
		К3		0.15	0	0.15	5.3
		К4		3.0	0	3.0	1.3
4	Магнетитовая руда (с 60 % содержанием железа) — Т	К2	0.8–0.9	0.6	0.6	0	0.6
		К3		0.6	0.6	0	0.6
		К4		2.0	2.0	0	1.2
5	Кварцевый сиенит — Т	К2	0.95–0.97	0	0	0	1.8
		К3		0	0	0	1.8
		К4		0	0	0	12.7
6	Мелкозернистый сиенит — Т	К2	0.95–0.98	0	0	0	0.3
		К3		0	0	0	0.3
		К4		0	0	0	6.0
7	Мелкозернистый кварцит — З	К2	0.9–0.95	0	0	0.8	0
		К3		0	0	1.2	0.45
		К4		0	0	10	0
8	Мелкозернистый сиенит с прожилками карбоната — Т	К2	0.9–0.95	1	0	2.1	2.3
		К3		0	0	18	2.5
		К4		7	0	19.7	0

*0 — сигнал не зарегистрирован.

Скважность или периоды времени между пакетами импульсов ЭМИ ($T_{СКВ}$), а также одиночными импульсами $\tau_{СКВ}$ на стадии предразрушения для некоторых из исследуемых образцов имеют следующие значения: для мраморизованного известняка — от 470 до 405–250 мс, для туфов — 350 мс, для обедненной магнетитовой руды — 350–180 мс, для сиенитов — 220 мс.

Периоды следования между одиночными импульсами $\tau_{СКВ}$ в акте разрушения для магнетитовой руды и кварцитов составляли 8 и 7 мс соответственно.

В ряде экспериментов удалось определить электромагнитные характеристики источников излучения (табл. 4): токов (от 100 до 5000 мкА) и напряженности магнитного поля (от 20 до

75 мкА /м). Установлено, что амплитуды излучаемых электромагнитных импульсов увеличивались по мере приближения к моменту нарушения сплошности и достигали максимальных значений в момент разрушения образцов. Их длительность на различных этапах нагружения изменялась от 10^{-1} до $5 \cdot 10^{-4}$ с, а частотный диапазон при росте трещин на различных стадиях нагружения образцов от $0.4\sigma^*$ до $0.95\sigma^*$ (от начала их нагружения до стадии предразрушения) изменялся от сотен герц до первых десятков килогерц.

ТАБЛИЦА 4. Значение тока от источников излучения в момент разрушения образцов горных пород

Характеристики токов \mathfrak{I} для ЭМИ	Номер образца							
	1	2	3	4	5	6	7	8
K2, мкА	155	104	270	40	3500	100	5100	220
K4, мкА/м	—	—	50	20	—	—	30	75

МЕТОД ОЦЕНКИ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ РАЗРУШЕНИИ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Для оценки мощности W (Вт), излучаемой источниками ЭМИ (трещинами) за период возбуждения тока, использовалось выражение, приведенное в [30]:

$$W_{\Sigma} = \frac{1}{2\epsilon\epsilon_0} \frac{(2\pi)^3 \omega^4 P^2}{3C^2}, \quad (6)$$

где P — общий для источника дипольный момент, Кл·м; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость в вакууме ($1/36\pi \cdot 10^{-9}$) Ф/м; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость, принятая равной 4 отн. ед.; C — скорость света в вакууме ($3 \cdot 10^8$) м/с; ω — регистрируемая частота излучения электромагнитного сигнала, Гц.

Для одиночной трещины излучаемая энергия \mathfrak{E}_1 (Дж) может быть определена по формуле

$$\mathfrak{E}_1 = W_1 \tau, \quad (7)$$

где W_1 — мощность электромагнитного поля, излучаемая единичной трещиной.

Ее дипольный момент оценивается по выражению [31]:

$$P_1 = \mathfrak{I}_1 \tau_1 \ell_0, \quad (8)$$

где ℓ_0 — начальный размер возникающей трещины в образце; τ_1 — длительность и \mathfrak{I}_1 — амплитуда токового импульса соответственно.

В эксперименте для испытываемых образцов горных пород зарегистрированы амплитудные значения для токов от $4.0 \cdot 10^{-5}$ до $5.1 \cdot 10^{-3}$ А с длительностями от $0.5 \cdot 10^{-3}$ до $5.3 \cdot 10^{-3}$ с соответственно.

Начальные размеры трещин оценивались, согласно [32], по формуле

$$\ell_0 = \frac{\Delta \mathfrak{I}_{\max} l^2}{2\Delta t V}, \quad (9)$$

где \mathfrak{I}_{\max} — максимальная амплитуда токового сигнала; $\Delta \mathfrak{I}_{\max}$ — приращение амплитуды тока на линейном участке токовой диаграммы с \mathfrak{I}_{\max} ; $\Delta t = \tau = l/V$ — время приращения амплитуды сигнала на линейном участке токовой диаграммы с \mathfrak{I}_{\max} ; l — размер трещины раскола (м), оцениваемый как $h/2$, равный половине поперечного размера диаметра образца; V — скорость

прорастания трещины, оцениваемая величиной $\sim (1.4 \div 2.4) \cdot 10^3$ м/с. Она определялась следующим образом. С использованием измеренного в результате экспериментов времени нарастания фронта сигнала ЭМИ (τ_{ϕ}) рассчитывали по известной формуле $V_{\text{экс. макс}} = H / \tau_{\phi}$.

Далее проводились дополнительные расчеты. Согласно экспериментальным данным и [33], определялись:

— модуль упругости (Юнга)

$$E \cong \frac{\sigma^*}{\Delta h / h}, \quad (10)$$

где σ^* — предел прочности испытываемого образца на одноосное сжатие; $\Delta h / h$ — его продольная деформация;

— средняя скорость распространения трещины в испытываемых горных породах

$$V = 0.38 \sqrt{E / S}, \quad (11)$$

где S — площадь раскрытия трещины, определяемая расчетно.

Конечный размер трещины раскола оценивался как $\ell = h / 2$, а начальный размер трещины принимался равным $\ell_0 \sim 10^{-2}$ м, согласно экспериментальным данным, полученным в [34].

На базе концентрационного критерия С. Н. Журкова [35] определялось значение параметра

$$K = \frac{N_{\text{max}}^{-1/3}}{l}, \quad (12)$$

где N_{max} — концентрация зародышевых трещин на критической стадии деформирования образца объемом χ (согласно табл. 1); определялось количество трещин n длиной $\ell_0 = 10^{-2}$ м в объеме каждого образца при условии, что все трещины являются раскрывшимися, а их концентрация в исследуемом объеме не превышает N_{max} . Так, при трещинах начальной длиной $\ell_0 = 10^{-2}$ м для испытываемых образцов горных пород объемом $(1 \div 5) \cdot 10^{-4}$ м³ (см. табл. 1) величина n изменяется в пределах 10–50. Данные расчета указанных параметров для испытываемых образцов представлены в табл. 5.

ТАБЛИЦА 5. Оценочные значения начальных и конечных размеров трещин в исследуемых образцах горных пород при их нагружении, а также параметров n и τ_{ϕ}

Номер образца	Тип горной породы	Начальный размер трещины $\ell_0, 10^{-2}$ м	Конечный размер трещины раскола при разрушении $\ell_{\text{max}}, 10^{-2}$ м	Количество трещин в образце на стадии разрушения n	Длительность переднего фронта токового импульса $\tau_{\phi}, 10^{-4}$ с
1	Мраморизованный известняк	2.1	4.5	28	0.24
2	Туф мелкоблочный	1.2	4.0	18	2.2
3	Магнетитовая руда (30 %)	3.5	9.0	50	3.2
4	Магнетитовая руда (60 %)	1.1	9.0	19	0.9
5	Кварцевый сиенит с прожилками карбоната	3.3	8.6	42	0.78
6	Массивный мелкозернистый сиенит	2.0	4.5	11	0.92
7	Мелкозернистый кварцит	1.3	3.5	11	0.34
8	Мелкозернистый сиенит с прожилками карбоната	2.3	4.7	25	0.8

Полагая в первом приближении, что в точку измерения сигналы ЭМИ от различных трещин в образце на этапе нагружения $(0.8 - 0.9)\sigma^*$ приходят практически в один и тот же момент времени (с идентичными амплитудами и фазами), применим принцип суперпозиции для описания регистрируемых сигналов.

В этом случае общая энергия ЭМИ-излучения W_3 (Дж) для породного образца может быть оценена по формуле

$$W_3 = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i, \quad (13)$$

где \mathcal{E}_i — электромагнитная энергия, излучаемая i -й трещиной. При $\mathcal{E}_i = \text{const}$ имеем

$$W_3 = n\mathcal{E}_1. \quad (14)$$

Данные расчета электромагнитных характеристик W_1 , \mathcal{E}_1 , W_Σ , W_3 приведены в табл. 6. Из анализа представленных данных следует, что мощность ЭМИ-излучения для испытываемых образцов изменяется в диапазоне $3.2 \cdot 10^{-12} - 4.7 \cdot 10^{-16}$ Вт. Это существенно отличается от оценок, полученных в [36]: $\sim 10^{-27}$ Вт — для ионных диэлектриков, $10^{-20} - 10^{-25}$ Вт — для субмикротрещин. Однако в [19] отмечается ошибочность этих результатов из-за неучета расположения датчика ЭМИ-антенны в ближней зоне источника излучения. Тем не менее авторы [19] не приводят конкретных мощностных оценок электромагнитного излучения, полученных для горных пород. Следует добавить, что используемые в [36] образцы не относятся к горным породам.

ТАБЛИЦА 6. Экспериментальные оценки токовых, мощностных и энергетических характеристик сигналов ЭМИ для образцов горных пород в момент нарушения их сплошности

Номер образца	Тип горной породы	$\mathcal{I}_{\text{эксп.}}$ 10^{-4} А	$\tau_{\text{эксп.}}$ 10^{-3} с	Расчетная мощность ЭМИ при образовании одиночной трещины W_1 , 10^{-14} Вт	Суммарная мощность ЭМИ-излучения W_Σ , 10^{-14} Вт	Расчетная энергия одиночной трещины ЭМИ \mathcal{E}_1 , 10^{-18} Дж	Суммарная энергия излучения ЭМИ W_3 , 10^{-18} Дж
1	Мраморизованный известняк	1.5	1	0.0784	0.78	0.284	1.81
2	Мелкоблочный мелко-игольчатый туф	1.0	0.5	0.00652	0.129	0.0326	1.52
3	Магнетитовая руда (30 %)	2.7	5.3	84.4	0.464	0.447	24.6
4	Магнетитовая руда (60 %)	0.4	0.6	0.00143	0.0469	0.00862	28360
5	Кварцевый сиенит с прожилками карбоната	35	1.8	3.81	176	45.8	551
6	Массивный мелкозернистый сиенит	1.0	2.5	6.74	42.1	7.43	1221
7	Мелкозернистый кварцит	51	1.2	27.1	325	484	22610
8	Мелкозернистый сиенит с прожилками карбоната	2.2	0.5	2.68	7.39	1.34	72000

Значения \mathcal{E}_0 — энергии ЭМИ, полученные при разрушении исследуемых образцов горных пород, находятся в диапазоне $2.8 \cdot 10^{-14} - 1.5 \cdot 10^{-18}$ Дж, что несколько ниже оценок (от 10^{-11} до 10^{-13} Дж), полученных в [32, 37–40].

Эту разницу в оценках можно объяснить влиянием ряда факторов. Так, в нашем случае исследования проводились при отсутствии в экспериментах экранирования как системы нагружения, так и самих образцов, что заведомо предопределяло снижение чувствительности приемной аппаратуры по сравнению с максимально возможной для регистрации сигналов ЭМИ в условиях существенной помехошумовой обстановки проведения экспериментов. В [32] отсутствовала калибровка антенны. Кроме того, и это существенно, размеры и вещественный состав образцов у различных исследователей часто оказывались различными. Например, в [34] испытывались образцы горных пород в виде дисков высотой $\sim 3 - 5$ мм, а в [2] высота их составляла 90–180 мм.

Отметим, что при проведении лабораторных экспериментов не зарегистрировано случаев существенного изменения скорости роста сжимающей нагрузки, действующей на образец, и скорости уменьшения высоты образца. Поэтому в первом приближении изменение нагрузки и высоты образца можно считать пропорциональным одному параметру. В данном случае энергия, передаваемая внешними устройствами образцу, может быть вычислена по формуле

$$U_0 = (P\Delta H) / 2, \quad (15)$$

где P и ΔH — величины внешней сжимающей нагрузки и уменьшения высоты сжимаемого образца перед разрушением.

Оба этих значения достаточно точно определяются в ходе ведения экспериментов и могут непосредственно использоваться при вычислениях. Результаты расчетов по формуле (15) приведены в третьем столбце табл. 7.

ТАБЛИЦА 7. Энергетические характеристики образцов горных пород и значения коэффициента механо-электромагнитных преобразований \mathfrak{M} по формуле (5)

Номер образца	Тип горной породы	Механическая энергия нагружения в момент разрушения образца U_0 , Дж	Энергия ЭМИ при разрушении образца \mathcal{E}_0 , 10^{-16} Дж	Коэффициент \mathfrak{M} , 10^{-16}
1	Мраморизованный известняк	0.5	0.018	0.036
2	Туф мелкоблочный	7.5	0.0157	0.00209
3	Магнетитовая руда (30 %)	11.25	0.246	0.0218
4	Магнетитовая руда 60 %)	4.5	283.6	63.02
5	Кварцевый сиенит с прожилками карбоната	0.8	5.51	6.88
6	Массивный мелкозернистый сиенит	12	12.21	1.01
7	Мелкозернистый кварцит	1.75	226.1	129.2
8	Мелкозернистый сиенит с прожилками карбоната	14	72.0	5.14

Заметим, что такую же величину энергии, запасенную в образце, можно получить, если воспользоваться выражением

$$U_0 = \int_V \frac{\sigma_x \varepsilon_x}{2} dV = \frac{\sigma_x^2}{2E}, \quad (16)$$

представляющим собой упругую энергию образца в случае одноосного сжатия.

Представленные в табл. 6 значения энергетических характеристик образцов позволяют количественно оценить склонность горных пород к хрупкому разрушению на основе коэффициента механо-электромагнитных преобразований \mathfrak{M} (см. табл. 7).

Видно, что разные по виду энергетические характеристики испытанных образцов горных пород изменяются весьма существенно. Однако по величине коэффициента механо-электромагнитных преобразований \mathfrak{M} можно количественно оценить склонности горных пород к удароопасности. Так, из исследуемых образцов к слабосклонным относятся туф мелкоблочный, мраморизованный известняк и магнетитовая руда с 30 % содержанием железа (характеристика \mathfrak{M} изменяется от $2.1 \cdot 10^{-19}$ до $3.6 \cdot 10^{-18}$). Склонным к удароопасности является массивный мелкозернистый сиенит с величиной \mathfrak{M} , достигающей значения $1.01 \cdot 10^{-16}$. Весьма склонны к удароопасности кварцевый сиенит с прожилками карбоната со значением $\mathfrak{M} \cong 6.88 \cdot 10^{-16}$, мелкозернистый сиенит с прожилками карбоната с $\mathfrak{M} \cong 5.14 \cdot 10^{-16}$, магнетитовая руда с 60 % содержанием железа с $\mathfrak{M} \sim 6.3 \cdot 10^{-15}$ и мелкозернистый кварцит с $\mathfrak{M} \cong 1.29 \cdot 10^{-14}$.

На рис. 4а, б приведены соответствующие этим породам данные изменения параметров W_3 и U_0 для коэффициента электромеханических преобразований \mathfrak{M} (5).

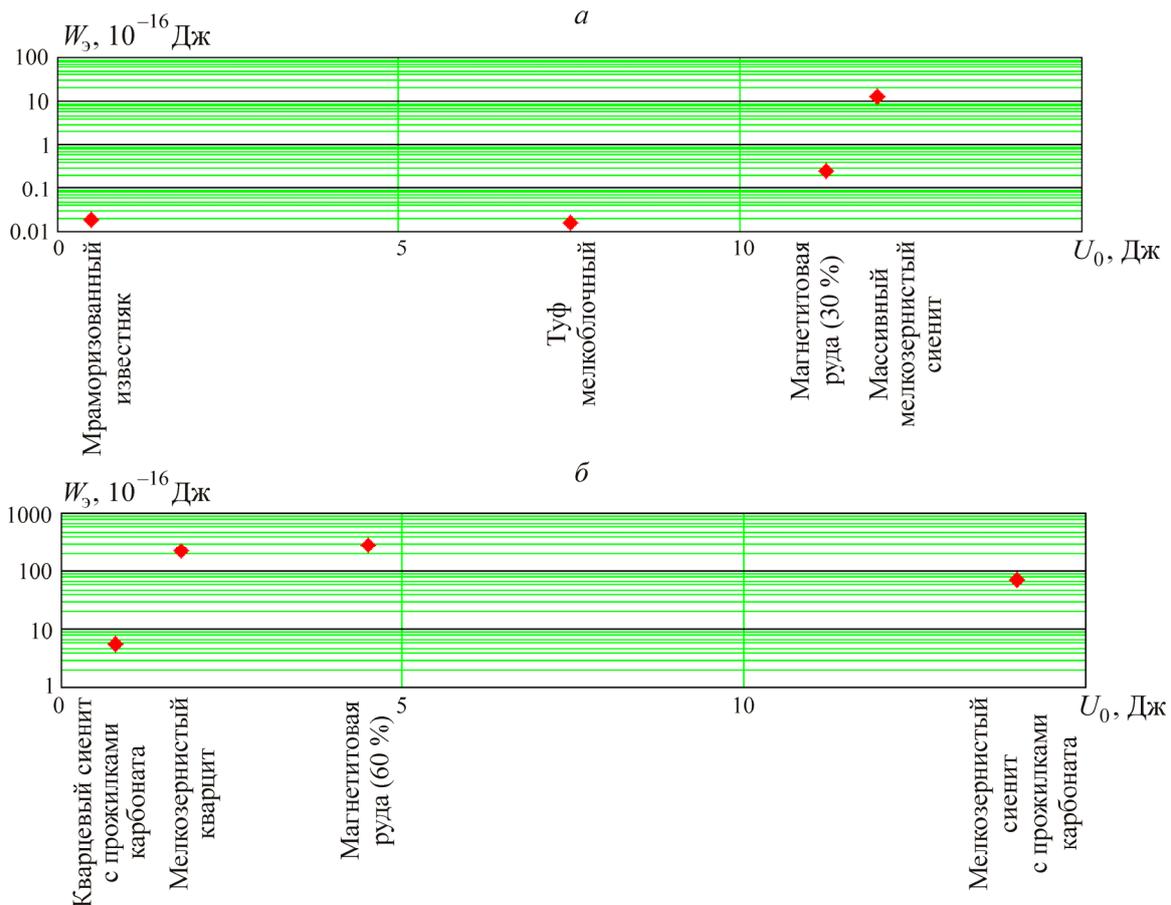


Рис. 4. Изменение параметров W_3 и U_0 для коэффициента механо-электромагнитных преобразований \mathfrak{M} в момент нарушения сплошности породных образцов для низкоэнергетических (а) и высокоэнергетических (б) по W_3 случаев

Видно, что все экспериментальные точки могут быть поделены на две группы: первая — с “низкоэнергетическими” электромагнитными характеристиками, которые относятся к слабо-склонным к удароопасности (туфы мелкоблочные, мраморизованные известняки и магнетитовые руды с 30 % содержанием железа). К этим же породам можно отнести и массивный мелкозернистый сиенит. Ко второй группе — с “высокоэнергетическими” параметрами (рис. 4б) — относится мелкозернистый сиенит с прожилками карбоната, кварцевый сиенит с прожилками карбоната, магнетитовая руда с 60 % содержанием железа, мелкозернистый кварцит. Они считаются весьма склонными к удароопасности.

ВЫВОДЫ

1. Даны численные оценки энергии излучения сигналов ЭМИ на стадии нарушения сплошности различных по структуре и свойствам образцов горных пород.

2. Установлено, что в качестве количественного критерия оценки склонности образцов горных пород к разрушению (удароопасности) может использоваться коэффициент \mathfrak{M} — механо-электромагнитных преобразований, представляющий собой отношение энергии электромагнитного излучения W_e к механической (потенциальной) U_0 энергии нагружения испытуемого объекта.

3. Для корректного сравнения и более точного количественного описания горных пород с позиций склонности их к удароопасности необходима стандартизация лабораторных экспериментов с введением референц-сферы контроля электромагнитно-эмиссионных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев А. А., Завадовская Е. К., Сальников В. Н. Изменение электропроводимости и радиоизлучения горных пород и минералов при физико-химических процессах в них // ДАН. — 1975. — Т. 220. — № 1.
2. Поиск электромагнитных предвестников землетрясений / под ред. М. Б. Гохберга. — М.: ИФЗ АН СССР, 1988.
3. Опарин В. Н. Научные открытия межтысячелетия в геомеханике и перспективы их применения / Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: тр. науч. конф. с участием иностр. ученых. — Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 2008.
4. Опарин В. Н., Симонов Б. Ф. О нелинейных деформационно-волновых процессах в виброволновых геотехнологиях освоения нефтегазовых месторождений // ФТПРПИ. — 2010. — № 2.
5. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. I. // ФТПРПИ. — 2012. — № 2.
6. Опарин В. Н., Танайно А. С. Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. — Новосибирск: Наука, 2011.
7. Курленя М. В., Опарин В. Н., Ревуженко А. Ф., Шемякин Е. И. О некоторых особенностях реакции горных пород на взрывные воздействия в ближней зоне // ДАН. — 1987. — Т. 293. — № 1.
8. Курленя М. В., Адушкин В. В., Гарнов В. В., Опарин В. Н., Спивак А. А. Знакопеременная реакция горных пород на динамическое воздействие // ДАН. — 1992. — Т. 323. — № 2.
9. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа v_μ // ДАН. — 1993. — Т. 333. — № 4.

10. **Опарин В. Н.** Энергетический критерий объемного разрушения горных пород / Тр. науч. семинара “Неделя горняка-2009”. — М.: МГГУ, 2009.
11. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И.** Волны маятникового типа. Ч. II: Методика экспериментов и основные результаты физического моделирования // ФТПРПИ. — 1996. — № 4.
12. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И.** Волны маятникового типа. Ч. III: Данные натуральных измерений // ФТПРПИ. — 1996. — № 5.
13. **Яковицкая Г. Е.** Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии / под ред. В. Н. Опарина. — Новосибирск: Параллель, 2008.
14. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И.** О геомеханических условиях возникновения квазирезонансов в геоматериалах и блочных средах // ФТПРПИ. — 1998. — № 5.
15. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Акинин А. А., Юшкин В. Ф. и др.** О некоторых особенностях эволюции гармонических акустических сигналов при нагружении блочных сред с цилиндрической полостью // ФТПРПИ. — 1999. — № 6.
16. **Опарин В. Н.** Волны маятникового типа и “геомеханическая температура” / Тр. 2-й Рос.-Кит. конф. “Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах” — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.
17. **Садовский М. А., Кедров О. К., Пасечник И. П.** О сейсмической энергии в объеме очагов при коровых землетрясениях и подземных взрывах // ДАН. — 1985. — Т. 283. — № 5.
18. **Хатиашвили Н. Г., Перельман М. Е.** Генерация электромагнитного излучения при колебаниях двойных электрических слоев и его проявления при землетрясениях // ДАН. — 1983. — Т. 211. — № 1.
19. **Гохберг М. Б., Моргунов В. А., Похотелов О. А.** Сейсмoeлектромагнитные явления. — М.: Наука, 1988.
20. **Головин Ю. И., Шибков А. А.** Быстропротекающие электрические процессы в пластически деформируемых щелочно-галоидных кристаллах // ФТТ. — 1987. — Т. 28. — Вып. 11.
21. **Гершензон Н. И., Зилпимиани Д. О., Манджгаладзе П. В. и др.** Электромагнитное излучение вершины трещины при разрушении ионных кристаллов // ДАН. — 1986. — Т. 228. — № 1.
22. **Ogawa T.** Analysis of Measurement techniques of electric fields and currents in the atmosphere, Contributions Geophysical Institute, Kyoto University, 1973, No. 13.
23. **Боровиков А. К., Ритгер Ю. А.** Влияние НДС на спектры электромагнитного излучения пьезокompозитов // Процессы электропереноса и электрофизика неоднородных тел: тез. докл. — М., 1988.
24. **Садовский М. А., Соболев Г. А., Мигунов М. И.** Изменение естественного излучения радиоволн при сильном землетрясении в Карпатах // ДАН. — 1979. — Т. 224. — № 2.
25. **Кузнецов С. В.** Совместная регистрация электромагнитных и сейсмоакустических сигналов / Геофизические способы контроля напряжений и деформаций: сб. науч. тр. ИГД СО АН СССР. — Новосибирск, 1985.
26. **Корнейчиков В. П.** Исследование механизма формирования электромагнитного излучения горных пород в связи с прогнозированием землетрясений: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — М., 1984.
27. **Гуфельд И. Л., Никифорова Н. Н., Рожной А. А., Яковицкая Г. Е. и др.** Характеристики источников электромагнитного излучения в массиве горных пород / Напряженно-деформированное состояние массивов горных пород: сб. науч. тр. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1988.
28. **Указания по бесконтактным геофизическим методам прогноза степени удароопасности участков угольных пластов и рудных залежей.** — Л.: Изд-во ВНИМИ, 1981.

29. **Инструкция** по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях, склонных к горным ударам. — Л.: Изд-во ВНИМИ, 1981.
30. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. Д.** Электродинамика сплошных сред. — М.: Изд-во ТЭЛ, 1957.
31. **Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г.** Справочник по элементарной физике. — М.: Наука, 1975.
32. **Егоров П. В., Иванов В. В., Колпакова Л. А.** О некоторых закономерностях импульсного электромагнитного излучения щелочно-галоидных кристаллов и горных пород // ФТПРПИ. — 1988. — № 1.
33. **Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г.** Пластичность горных пород. — М.: Недра, 1979.
34. **Колпакова Л. А.** Кинетика и оценка параметров электромагнитного излучения при изменении напряженного состояния горных пород: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1988.
35. **Журков С. Н., Куксенко В. С., Петров В. А.** Физические основы прогнозирования механического разрушения // ДАН. — 1981. — Т. 259. — № 6.
36. **Перельман М. Е., Хатиашвили Н. Г.** О радиоизлучении при хрупком разрушении диэлектриков // ДАН. — 1981. — Т. 256. — № 4.
37. **Курленя М. В., Вострецов А. Г., Кулаков Г. И., Яковицкая Г. Е.** Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения горных пород. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
38. **Гохберг М. Б., Моргунов В. А., Герасимович Е. А., Матвеев И. В.** Оперативные электромагнитные предвестники землетрясений. — М.: Наука, 1985.
39. **Яковицкая Г. Е.** Метод электромагнитного излучения для диагностики, контроля и прогноза горных ударов и микроземлетрясений в массивах горных пород. — Saarbrücken, Germany: Изд-во LAP (Lambert Academic Publishing), 2011.
40. **Шрепп Б. В.** Управление геомеханическими процессами при разработке мощных удароопасных железорудных месторождений изменением геометрии и формы выработанного пространства: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 1996.

Поступила в редакцию 10/IV 2013