

УДК 550.3 + 551 + 622

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОТРЕЩИН ПО СИГНАЛАМ ИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В. Д. Борисов

ООО "Теплоснабжение", 652612 Белово, Россия

E-mail: victor.borisov@ngs.ru

Предложена модель для определения характеристик эволюции поля микротрещин в нагруженном образце горной породы по сигналам электромагнитного излучения. Выполнены расчеты, по которым построены пространственно-временные таблицы. Выявлены особенности, определяющие процессы перестройки иерархии микротрещин. Адекватность модели проверена с использованием концентрационного критерия Журкова. На построенных в логарифмических координатах графиках зависимости концентрации микротрещин от их размеров выявлены участки масштабной инвариантности.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, деформация, спектрально-временной анализ, концентрационный критерий, пространственно-временной анализ, логарифмическая масштабная инвариантность.

DOI: 10.15372/PMTF20180114

Введение. Для решения различных прикладных задач механики горных пород и горной инженерии требуется разработка адекватных прогностических моделей поведения геоматериалов и конструкционных материалов под действием различных сил. В работе [1] отмечается, что основной причиной разрушения объектов и возникновения землетрясений является эволюция поля микротрещин в среде под действием концентрации напряжений. В ходе этой эволюции происходит укрупнение микротрещин, а также появление новых областей повышенной трещиноватости и развитие магистральных трещин. В работе [2] сформулированы три закономерности, которым подчиняется процесс эволюции поля микротрещин.

1. Развитие системы трещин в области зарождения очага землетрясений в результате увеличения объемной плотности числа микротрещин через стадии увеличения размеров трещин и уменьшения их числа, вследствие чего образуются магистральные разрывы.

2. Ступенчатое развитие мелких трещин в более крупные и достижение некоторого критического числа, соответствующего концентрационному критерию Журкова [3]:

$$K^* = N^{-1/3}/L.$$

Здесь N — число трещин размером L ; K^* — критическое среднее расстояние между трещинами; $N^{-1/3}$ — объемная концентрация трещин.

Если среднее расстояние между трещинами становится меньше критического, происходит перестройка всей системы трещин с увеличением их средних размеров и уменьшением средней объемной концентрации. При этом трещины в основном локализируются

в области зарождения макроразрыва. Эта закономерность универсальна для любого масштабного уровня и любого режима нагружения.

3. Изменение некоторых характеристик среды в зарождающемся очаге, а также появление аномалий ряда геофизических полей при перестройке системы трещин.

В данной работе, являющейся продолжением работ [4, 5], предложена модель для определения характеристик эволюции поля микротрещин в нагруженном образце по сигналам электромагнитного излучения (ЭМИ).

1. Модель для определения параметров микротрещин по сигналам ЭМИ.

Известно, что основной вклад (до 90 %) в формирование сигнала ЭМИ вносят заряды, образующиеся на берегах движущихся микротрещин [6]. Следовательно, информация о характерных размерах этих берегов априори присутствует в структуре сигнала ЭМИ. Необходимо выделить эту информацию из структуры сложного сигнала. Заметим, что в простейшем случае колебаний системы с одной степенью свободы механические (продольные, крутильные) и электрические колебания описываются одним и тем же дифференциальным уравнением [7]. В работе [7] рассмотрены случаи возникновения колебаний различной физической природы (механических, акустических, электрических). Преобразование одного вида колебаний в другой происходит в результате взаимодействия элементов среды. В работе [8] экспериментальным путем установлено, что при прохождении через кристалл упругой волны с частотой ν_a возбуждается электромагнитный сигнал, в спектре которого преобладает эта частота. Таким образом, при построении модели будем учитывать, что в спектре сигнала ЭМИ присутствуют составляющие, частоты которых пропорциональны характерным размерам микротрещин. Осциллограмма сигнала ЭМИ, полученная при одноосном нагружении образца из мрамора, приведена на рис. 1 (A — амплитуда исходного сигнала ЭМИ) [4]. Выделены разрушения двух типов: 1) локальное, без потери несущей способности образца; 2) глобальное, сопровождающееся частичным разрушением образца. Построены две спектрально-временные таблицы (СВТ). При регистрации сигналов использована частота дискретизации $f_d = 250$ кГц, которая затем методом прореживания исходных последовательностей была уменьшена до значения $f_d = 25$ кГц. При построении СВТ использовано 512-точечное быстрое преобразование Фурье (БПФ), расстояние между строками СВТ выбрано равным $10t_d$, т. е. 0,4 мс. В работе [5] введено соотношение между частотой i -й спектральной составляющей сигнала ЭМИ и линейным размером i -й неоднородности, обеспечивающим формирование данной спектральной составляющей:

$$f_i = 1/(k_1 L_i) \quad (1)$$

(k_1 — коэффициент пропорциональности; f_i — частота i -й спектральной составляющей

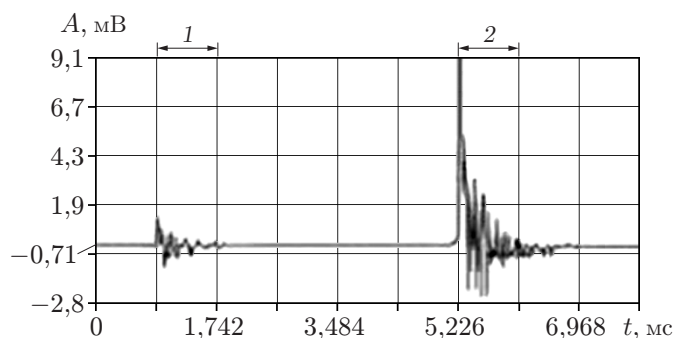


Рис. 1. Осциллограмма сигнала ЭМИ, полученная при нагружении образца из мрамора:

1 — локальное разрушение, 2 — глобальное разрушение

сигнала ЭМИ; L_i — длина i -й неоднородности), а также зависимость между амплитудой i -й спектральной составляющей A_{f_i} и количеством микротрещин, имеющих характерный размер L_i :

$$A_{f_i} = k_2 N_{L_i} \quad (2)$$

(k_2 — коэффициент пропорциональности; A_{f_i} — амплитуда i -й спектральной составляющей; N_{L_i} — количество микротрещин L_i -й длины, соответствующих i -й спектральной составляющей).

Приведем значения коэффициентов k_1 , k_2 , а также их единицы измерения. Из (1) получаем зависимость характерной длины L_i i -й неоднородности от частоты i -й спектральной составляющей

$$L_i = 1/(f_i k_1), \quad (3)$$

где k_1 — коэффициент пропорциональности, принятый равным единице и имеющий размерность, обратную размерности скорости: [с/м]. Для удобства сравнения с данными работы [9] расчетные характерные размеры неоднородностей представлены в сантиметрах, при этом в правую часть (3) добавлен множитель 10^2 .

Рассмотрим зависимость (2). Следуя принципу линейной суперпозиции [10], получаем зависимость между амплитудой A_{f_i} i -й спектральной составляющей и количеством неоднородностей N_i характерной длины L_i . При этом вводится коэффициент пропорциональности k_2 , представляющий собой произведение коэффициентов $k_{2.1}$, $k_{2.2}$, k_{2N} . Рассмотрим эти коэффициенты подробнее.

Коэффициент $k_{2.1}$ [1/м] компенсирует зависимость амплитуды A_i от размеров неоднородностей L_i . Введение этого коэффициента обусловлено тем, что сигнал ЭМИ формируется зарядами, движущимися вместе с вершиной и берегами микротрещины. Чем больше характерный размер микротрещины, тем больше протяженность ее берегов и тем больше суммарная величина заряда на них. Таким образом, микротрещина большего размера формирует сигнал ЭМИ большей амплитуды.

Коэффициент $k_{2.2}$ [1/м] вводится для компенсации частотной зависимости скорости распространения сигнала ЭМИ, а также для учета ограниченности полосы пропускания в частотном диапазоне и уменьшения степени усиления сигнала на высоких частотах приемно-усилительного тракта регистрирующей аппаратуры.

Как известно, распространение электромагнитных волн происходит с затуханием, зависящим как от расстояния до источника излучения, так и от параметров среды (диэлектрической проницаемости, влажности и т. д.), в которой эти волны распространяются [11]. В общем случае чем больше частота сигнала, тем быстрее он затухает при распространении над поверхностью Земли. Аналогичное влияние на амплитуду сигнала ЭМИ оказывает частотная характеристика приемно-усилительного тракта регистрирующей аппаратуры, уменьшающаяся на высоких частотах. Таким образом, чем больше размер микротрещины, тем больше амплитуда сигнала ЭМИ при ее движении. В спектре этого сигнала преобладают более низкие частоты, которые медленнее затухают при распространении и меньше подавляются в приемно-усилительном тракте аппаратуры.

Коэффициент k_{2N} [м²/В] определяет зависимость между амплитудой i -й спектральной составляющей и количеством микротрещин соответствующего размера, которая в свою очередь зависит от параметров геосреды. Таким образом, предлагаемую модель можно настроить на характеристики реальной горной породы, например используя ее эталонный образец.

В результате получаем зависимость количества неоднородностей N_i размером L_i от амплитуды i -й спектральной составляющей

$$N_i = k_{2.1} k_{2.2} k_{2N} A_{f_i}, \quad (4)$$

где $k_{2.1} = k_{2.2} = 1/L_i$; $k_{2N} = 1/\max(k_{2.1} k_{2.2} A_{f_i})|_{L_i=L_{\max}}$.

Выражение для k_{2N} получено в предположении, что микротрещина наибольшего размера является магистральной трещиной или ее фрагментом и количество таких микротрещин не превышает единицы. Заметим, что в СВТ амплитуды A_{f_i} спектральных составляющих отнесены к напряжению на входе измерительного датчика. В формуле (4) соответствующие множители 10^{-6} в числителе и знаменателе взаимно компенсируются. Граничные условия модели определяются параметрами регистрирующей аппаратуры и выбранного алгоритма БПФ. После выполнения расчетов по формулам (3), (4) СВТ были преобразованы в пространственно-временные таблицы (ПВТ), представляющие зависимость размеров микротрещин L_i и их количества N_i от времени t_j .

2. Особенности поведения спектральных амплитуд на определенных временных интервалах. На некоторых интервалах времени с увеличением частоты амплитуды спектральных составляющих в СВТ уменьшаются медленнее, чем на соседних интервалах. При достижении наибольшей частоты в СВТ ($F = 12451$ Гц) амплитуды спектральных составляющих на этих интервалах времени на $3 \div 4$ дБ превышают уровень окружающего шума (на других интервалах времени амплитуды спектральных составляющих для этих частот соизмеримы с уровнем шума). В табл. 1, 2 выделены фрагменты СВТ, соответствующие участкам 1 и 2 на рис. 1. При использовании других параметров БПФ получаем верхнюю частоту в СВТ $F = 124512$ Гц, при которой указанное выше явление также имеет место. По-видимому, это явление имеет место и в мегагерцевом диапазоне, но в данном случае оно рассматривается только в диапазоне, ограниченном параметрами регистрирующей аппаратуры и применяемого БПФ. В случае локального разрушения (участок 1 на рис. 1) имеют место два характерных момента времени: $t = 10,4$ мс и $t = 29,0$ мс. В случае глобального разрушения (участок 2 на рис. 1) эти моменты времени разделены интервалом, равным шагу дискретизации: $t = 13,2; 13,6; 14,0$ мс. Это явление называется высокочастотным (ВЧ) следом. На рис. 2,а для мрамора представлен графический образ табл. 1 для участка 1, на рис. 2,б — графический образ табл. 2 для участка 2. Следует отметить, что после преобразования СВТ в ПВТ было обнаружено практически линейное увеличение количества микротрещин по мере уменьшения их характерного размера. В табл. 1, 2 помимо основных имеется несколько менее четко выраженных ВЧ-следов, амплитуда которых приблизительно на порядок меньше.

3. Проверка адекватности предлагаемой модели с использованием концентрационного критерия Журкова. Проведены расчеты зависимости объемной концентрации трещин $N^{-1/3}$ от их характерных размеров L и построены ее графики в логарифмических координатах $\lg(N^{-1/3}) - \lg L$ для характерных времен в ПВТ. Идея использования концентрационного критерия разрушения в сейсмологии для прогноза землетрясений принадлежит А. Д. Завьялову [9]. В работе [9] приведен график зависимости среднего расстояния между трещинами, которое в данной работе обозначено $c^{-1/3}$, от их характерной длины L для объектов различного масштаба.

Зависимости объемной концентрации микротрещин $N^{-1/3}$ от их характерных размеров L , построенные с использованием предлагаемой модели (рис. 3, 4) для моментов времени, в которые наблюдается ВЧ-след, хорошо согласуются с зависимостью, полученной в лабораторных экспериментах и приведенной на рис. 1 в работе [9].

4. Логарифмическая масштабная инвариантность зависимости концентрации трещин от их размеров. На рис. 3 приведены зависимости объемной концентрации трещин $N^{-1/3}$ от их линейных размеров L в логарифмических координатах при локальном разрушении, полученные с использованием предлагаемой модели. На графике, соответствующем ВЧ-следу 1 ($t = 10,8$ мс), имеется достаточно протяженный линейный участок А, обладающий свойством масштабной инвариантности: каждому размеру микротрещин соответствует определенная их концентрация. При изучении с помощью микроскопа

Таблица 1

Отнесенные к напряжению на входе измерительного датчика амплитуды i -й спектральной составляющей, соответствующие локальному разрушению

$t, \text{мс}$	A_i								
	$F = 12061$ Гц	$F = 12109$ Гц	$F = 12158$ Гц	$F = 12207$ Гц	$F = 12256$ Гц	$F = 12305$ Гц	$F = 12354$ Гц	$F = 12402$ Гц	$F = 12451$ Гц
0	0	1	1	1	1	0	1	1	0
0,4	0	1	1	1	1	1	1	0	0
0,8	0	1	1	1	1	1	1	0	0
1,2	0	1	1	1	1	1	1	0	0
1,6	0	1	1	1	1	1	1	0	0
2,0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
2,4	0	0	1	1	1	1	1	1	0
2,8	0	0	1	1	1	1	1	1	0
3,2	0	0	1	1	1	1	1	1	0
3,6	0	0	1	1	1	1	1	1	0
4,0	0	0	0	1	2	1	1	1	0
4,4	0	0	0	1	2	1	1	1	0
4,8	0	0	0	1	2	1	1	1	0
5,2	0	0	0	1	2	1	1	1	0
5,6	0	0	0	1	2	1	1	1	0
6,0	0	0	0	1	2	1	1	1	0
6,4	0	0	0	1	2	1	1	1	0
6,8	0	0	0	1	2	1	1	1	0
7,2	0	0	0	1	2	1	1	1	0
7,6	0	0	0	1	2	1	1	0	0
8,0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
8,4	0	0	1	1	2	1	1	0	0
8,8	0	0	0	1	1	1	1	0	0
9,2	0	1	0	1	1	1	1	0	0
9,6	0	1	0	1	1	1	1	0	0
10,0	1	1	0	2	1	2	0	1	1
10,4	4	3	4	4	3	5	4	4	4
10,8	3	3	3	2	3	3	2	3	3
11,2	3	3	3	2	3	3	3	3	3
11,6	2	2	2	1	3	2	2	2	3
12,0	4	3	3	3	1	3	2	2	1
12,4	3	3	3	3	2	3	1	2	1
12,8	1	1	1	1	2	1	1	1	1
13,2	2	3	3	2	4	4	3	3	2
13,6	1	1	1	1	3	3	2	2	1

фрагмента образца в этот момент времени независимо от степени увеличения будет видно одно и то же количество микротрещин приблизительно одинакового размера. Уравнение прямой для этого участка имеет вид

$$Y = 0,6439X + 0,002628.$$

Аналогичным свойством обладает менее протяженный участок B , соответствующий ВЧ-следу 2, несмотря на то что на нем имеется незначительный излом. Уравнение прямой для этого участка записывается в виде

$$Y = 0,6618X - 0,1986.$$

На рис. 4 приведены зависимости объемной концентрации микротрещин от их размеров в различные моменты времени при глобальном разрушении. На рис. 4 имеется

Таблица 2

Отнесенные к напряжению на входе измерительного датчика амплитуды i -й спектральной составляющей, соответствующие глобальному разрушению

$t, \text{ мс}$	A_i							
	$F =$ 12 109 Гц	$F =$ 12 158 Гц	$F =$ 12 207 Гц	$F =$ 12 256 Гц	$F =$ 12 305 Гц	$F =$ 12 354 Гц	$F =$ 12 402 Гц	$F =$ 12 451 Гц
0,0	4	5	2	3	3	2	2	2
0,4	1	1	1	0	1	1	2	2
0,8	4	3	3	2	3	3	4	4
1,2	3	3	1	1	1	1	2	2
1,6	1	1	2	1	2	2	1	2
2,0	2	2	1	0	1	1	1	2
2,4	2	4	3	4	3	2	3	4
2,8	1	1	1	2	1	0	1	2
3,2	2	4	1	1	2	3	2	3
3,6	4	2	3	3	3	2	2	3
4,0	2	3	1	1	1	1	1	2
4,4	3	1	2	3	2	3	3	3
4,8	1	2	0	1	1	1	1	2
5,2	2	4	2	2	3	3	1	2
5,6	2	3	2	2	2	1	3	4
6,0	2	1	1	1	1	2	1	1
6,4	3	1	2	2	1	2	1	1
6,8	2	2	2	2	1	2	2	1
7,2	2	1	1	1	1	1	2	3
7,6	1	3	1	1	1	2	2	1
8,0	2	3	1	1	1	2	2	1
8,4	1	2	1	1	0	1	1	2
8,8	1	2	0	1	0	1	1	2
9,2	3	1	3	2	3	2	4	1
9,6	1	2	1	1	1	1	2	2
10,0	1	2	1	1	1	1	2	2
10,4	2	3	1	2	2	0	3	2
10,8	3	3	1	2	2	1	3	2
11,2	1	1	1	0	1	2	1	2
11,6	2	1	1	1	0	1	2	2
12,0	2	0	2	1	1	2	2	2
12,4	1	1	2	1	1	2	1	2
12,8	2	4	4	3	3	4	2	3
13,2	28	30	29	28	29	29	27	28
13,6	31	32	31	31	31	32	29	31
14,0	24	23	22	23	23	24	21	23

участок C , на котором практически рядом расположены две кривые, соответствующие моментам времени $t = 12,8$ мс и $t = 13,2$ мс (кривые 2, 3) и являющиеся частью ВЧ-следа 3. Участок C также обладает свойством масштабной инвариантности. Уравнение прямой для этого участка имеет вид

$$Y = 0,6559X - 0,1756.$$

Кривая, являющаяся частью ВЧ-следа 3 и соответствующая моменту времени $t = 13,6$ мс (кривая 4), также обладает свойством масштабной инвариантности. Эта кривая расположена несколько выше и практически параллельна участку C . На кривых, соответствующих другим моментам времени, на участке C появляются изломы. Эти точки соответствуют повышенной и пониженной концентрации микротрещин.

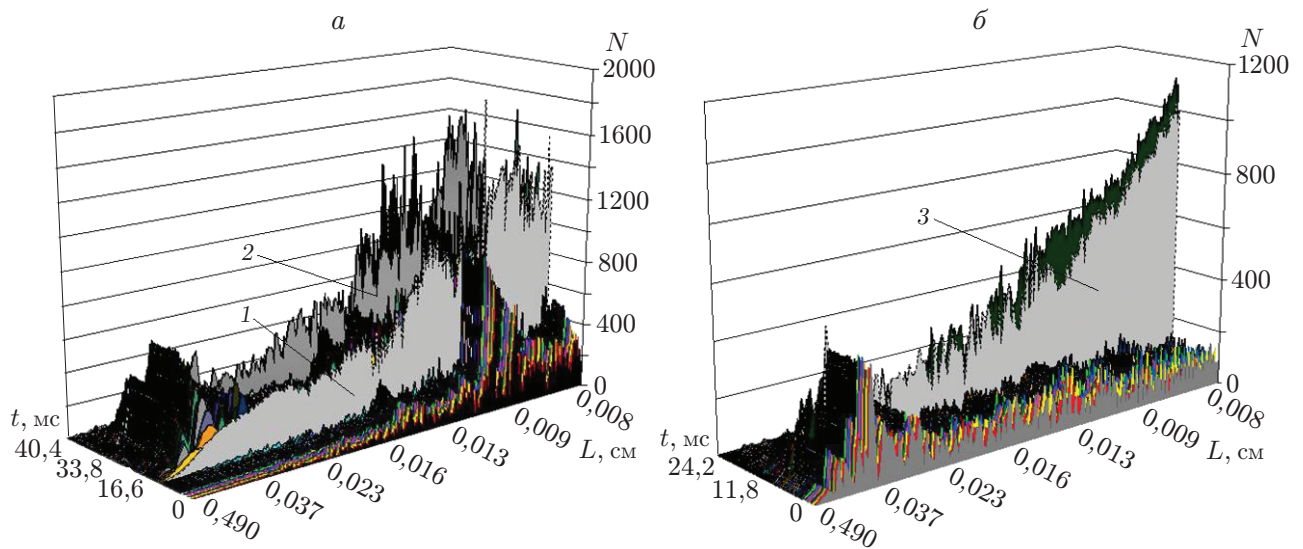


Рис. 2. Графические образы ПВТ, построенных для участка 1 на рис. 1 (локальное разрушение образца из мрамора) (а) и участка 2 на рис. 1 (глобальное разрушение образца из мрамора) (б):

1 — ВЧ-след 1 ($t \approx 10,4$ мс), 2 — ВЧ-след 2 ($t \approx 29,0$ мс), 3 — ВЧ-след 3 ($t \approx 13,2 \div 14,0$ мс)

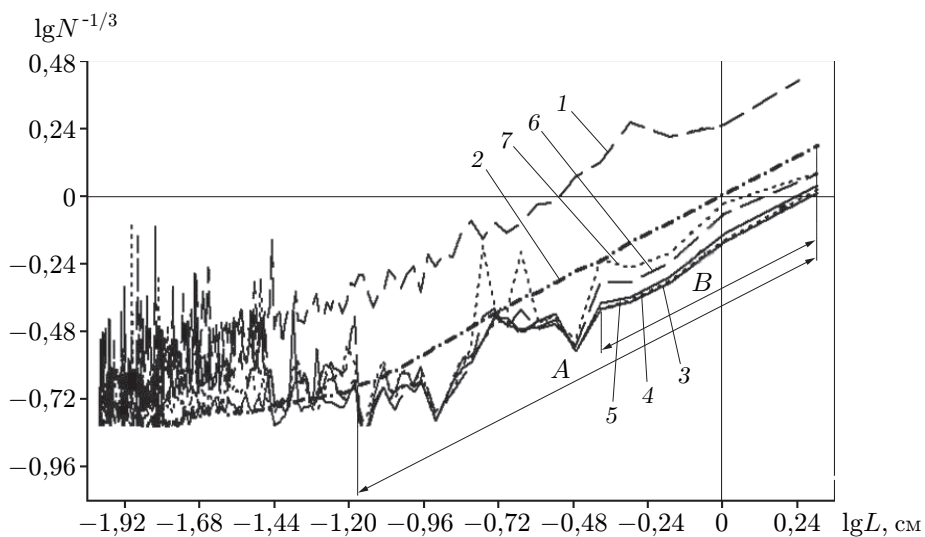


Рис. 3. Зависимость объемной концентрации микротрещин от их характерных размеров в логарифмических координатах для участка 1 (см. рис. 1):

A — ВЧ-след 1, B — ВЧ-след 2; 1 — $t = 10,4$ мс, 2 — $t = 10,8$ мс, 3 — $t = 28,6$ мс, 4 — $t = 29,0$ мс, 5 — $t = 29,4$ мс, 6 — $t = 29,8$ мс, 7 — $t = 30,2$ мс

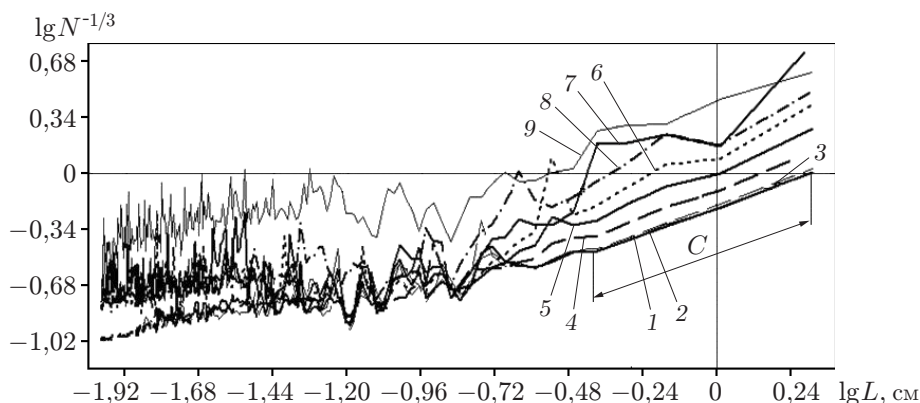


Рис. 4. Зависимость объемной концентрации микротрещин от их характерных размеров в логарифмических координатах для участка 2 (см. рис. 1): C — ВЧ-след 3; 1 — $t = 1,2$ мс, 2 — $t = 12,8$ мс, 3 — $t = 13,2$ мс, 4 — $t = 13,6$ мс, 5 — $t = 14,0$ мс, 6 — $t = 14,4$ мс, 7 — $t = 15,6$ мс, 8 — $t = 19,6$ мс, 9 — $t = 31,6$ мс

Исследованию масштабной инвариантности в геофизике посвящен ряд работ (см., например, [12]). Закон Гутенберга — Рихтера устанавливает логарифмически инвариантную зависимость между количеством и магнитудами (энергией) землетрясений [13]. В работе [14] отмечено, что масштабная инвариантность — свойство не только аналитическое, это свойство самоподобного фрактального кластера.

С использованием предложенного в работе метода были обработаны также сигналы ЭМИ, полученные при разрушении образца из диабазы. В ПВТ, построенных для этого материала, обнаружены явления, подобные ВЧ-следу, а также нелинейные колебания и волны, уединенные волны, солитоноподобные колебания, в частности кинк (топологический солитон, дислокация в модели Френкеля — Конторовой [15]).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Алексеев А. С., Глинский Б. М., Ковалевский В. В., Хайретдинов М. С.** Теоретические и экспериментальные основы изучения дилатантных зон вибросейсмическими методами // Материалы Междунар. конф. по математическим методам в геофизике “ММГ – 2008”, Новосибирск, 13–15 окт. 2008 г. Новосибирск: Ин-т вычисл. математики и мат. геофизики СО РАН, 2008. С. 10–15.
2. **Соболев Г. А.** Изучение образования и предвестников разрыва сдвигового типа в лабораторных условиях // Поиск предвестников землетрясений. М.: Ин-т физики Земли, 1978. С. 86–99.
3. **Журков С. Н., Куксенко В. С., Петров В. А.** К вопросу о прогнозировании разрушения горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. № 8. С. 11–18.
4. **Борисов В. Д.** Спектрально-временной анализ в исследовании динамики разрушения горных пород // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 2005. № 4. С. 49–59.
5. **Борисов В. Д.** Фрактальные свойства спектральных характеристик электромагнитного излучения при разрушении горных пород и конструкционных материалов // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 2007. № 2. С. 55–69.
6. **Алексеев Д. В., Егоров П. В.** О форме импульса электромагнитной эмиссии, генерируемого движущейся трещиной // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1993. № 6. С. 3–5.

7. **Ден-Гартог Дж. П.** Теория колебаний. М.; Л.: ОГИЗ, 1942.
8. **Беспалько А. А., Яворович Л. В., Федотов П. И.** Связь параметров электромагнитных сигналов с электрическими характеристиками горных пород при акустическом и квазистатическом воздействиях // Изв. Том. гос. политехн. ун-та. 2005. Т. 308, № 7. С. 1–6.
9. **Завьялов А. Д.** От кинетической теории прочности и концентрационного критерия разрушения к плотности сейсмогенных разрывов и прогнозу землетрясений // Физика твердого тела. 2005. Т. 47, № 8. С. 1000–1007.
10. **Клаербоут Дж. Ф.** Теоретические основы обработки геофизической информации с приложением к разведке нефти. М.: Недра, 1981.
11. **Ротхаммель К.** Антенны. М.: Энергия, 1969.
12. **Рязанцев Н. А., Рязанцева Н. А.** Причины инвариантности в механизме деформирования горных пород // Сучасні аспекти механізації та автоматизації енергоємних виробництв: Збірник матеріалів I регіональної науково-практичної конференції, Красноармейск, 28 апр. 2011 г. Красноармейск: Красноарм. индустр. ин-т Донец. нац. техн. ун-та, 2011. С. 1–6.
13. **Петухов А. В., Шелепов И. В., Петухов А. А., Куклин А. И.** Степенной закон и принцип самоподобия при изучении трещиноватых нефтегазоносных коллекторов и гидродинамическом моделировании процесса разработки // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2012. Т. 7, № 2. С. 1–21.
14. **Mandelbrot В. В.** The fractal geometry of nature. N. Y.: W. H. Freeman, 1983.
15. **Френель Я., Конторова Т.** О теории пластической деформации и двойникования // Физ. журн. 1939. № 1. С. 137–139.

*Поступила в редакцию 13/VII 2016 г.,
в окончательном варианте — 11/XI 2016 г.*
