

Формирование степенных распределений дефектов по размерам в процессе разрушения материалов

© В.Л. Гиляров, М.С. Варкентин, В.Е. Корсуков, М.М. Корсукова, В.С. Куксенко

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Vladimir.Hilarov@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 26 ноября 2009 г.)

Получены экспериментальные данные по изменению рельефа поверхности нагруженных лент аморфного сплава. С помощью методов вейвлет-преобразований и покрытий проведен анализ распределений образующихся под действием нагрузки поверхностных дефектов. Кроме того, проанализированы полученные данные по временному накоплению микротрещин в объеме нагруженного гранитного образца. Показано, что на поверхности и в объеме перед разрушением формируются степенные распределения дефектов по размерам (скейлинг). Установлено, что наличие степенных распределений является одним из признаков формирования состояния самоорганизованной критичности (СОК). Рассмотрено образование СОК в объеме материала и на его поверхности. Установлено, что образование СОК предшествует разрушению твердого тела.

1. Введение

Известно, что скейлинг проявляется вблизи точек фазовых переходов [1,2]. Фазовые переходы происходят в термодинамических системах, когда внешний параметр (обычно температура) достигает критического значения $T = T_c$. Ниже T_c можно определить величины, называемые параметрами порядка, которые представляют собой монотонно убывающие функции температуры, стремящиеся к нулю при $T \rightarrow T_c$. Выше температуры T_c параметры порядка тождественно равны нулю. Вдали от фазовых переходов распределения физических величин в термодинамических равновесных системах удовлетворяют закону больших чисел и являются, как правило, экспоненциальными.

При приближении к критической температуре термодинамические величины (и параметры порядка) меняются по степенному закону с показателями степени, которые называются критическими. По степенному закону меняются также парная пространственная корреляционная функция и радиус корреляций, который стремится к бесконечности, когда температура приближается к критическому значению. Наличие корреляций с бесконечным радиусом означает, что поведение любой подсистемы в рассматриваемой системе определяется всеми составляющими этой системы, даже если взаимодействия в системе являются короткодействующими. Поскольку флуктуации в системе также определяются радиусом корреляции, можно утверждать, что размер флуктуаций в таких системах также бесконечен (в реальности определяется размером системы). Таким образом, вблизи точки фазового перехода в термодинамической системе существуют крупномасштабные флуктуации.

Однако фазовые переходы не единственный случай, когда проявляются степенные распределения. В частности, в диссипативных неравновесных системах было обнаружено самоорганизованное критическое состояние

(СОК) (см., например, [3–5]), которое также характеризуется масштабно инвариантными распределениями физических величин, выражаемых степенными законами. Это является отражением того, что система обладает фрактальными свойствами [6].

Имеются основания предполагать [5], что СОК формируется на заключительных стадиях процесса разрушения материалов. Ранее нами было введено понятие „критического события“ [7,8]. Это не только разрыв образца, но и образование магистральной трещины, а также полосы деформации. При таком подходе формирование СОК предшествует „критическому или катастрофическому событию“. Основной целью настоящей работы является проверка этого предположения.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

2.1. Формирование СОК в объеме материала. Объектами исследования служили цилиндрические гранитные образцы высотой 190.5 mm и диаметром 72.6 mm, которые подвергались гидростатическому давлению и одноосному сжатию. При этом записывались сигналы акустоэмиссии (АЭ), вызванные образованием микротрещин в образце вплоть до разрушения. Запись сигналов производилась во времени от начала нагружения до разрушения образца. Методика эксперимента и связь сигналов АЭ с трещинообразованием подробно описаны в работе [9]. Для нас важно, что число сигналов АЭ равно количеству микротрещин, а амплитуды сигналов являются степенной функцией размеров микротрещин. Представляет интерес исходя из экспериментальных данных провести прямой расчет функции распределения по размерам рождающихся микротрещин, а также временных и пространственных корреляционных функций, описывающих процесс разрушения [5].

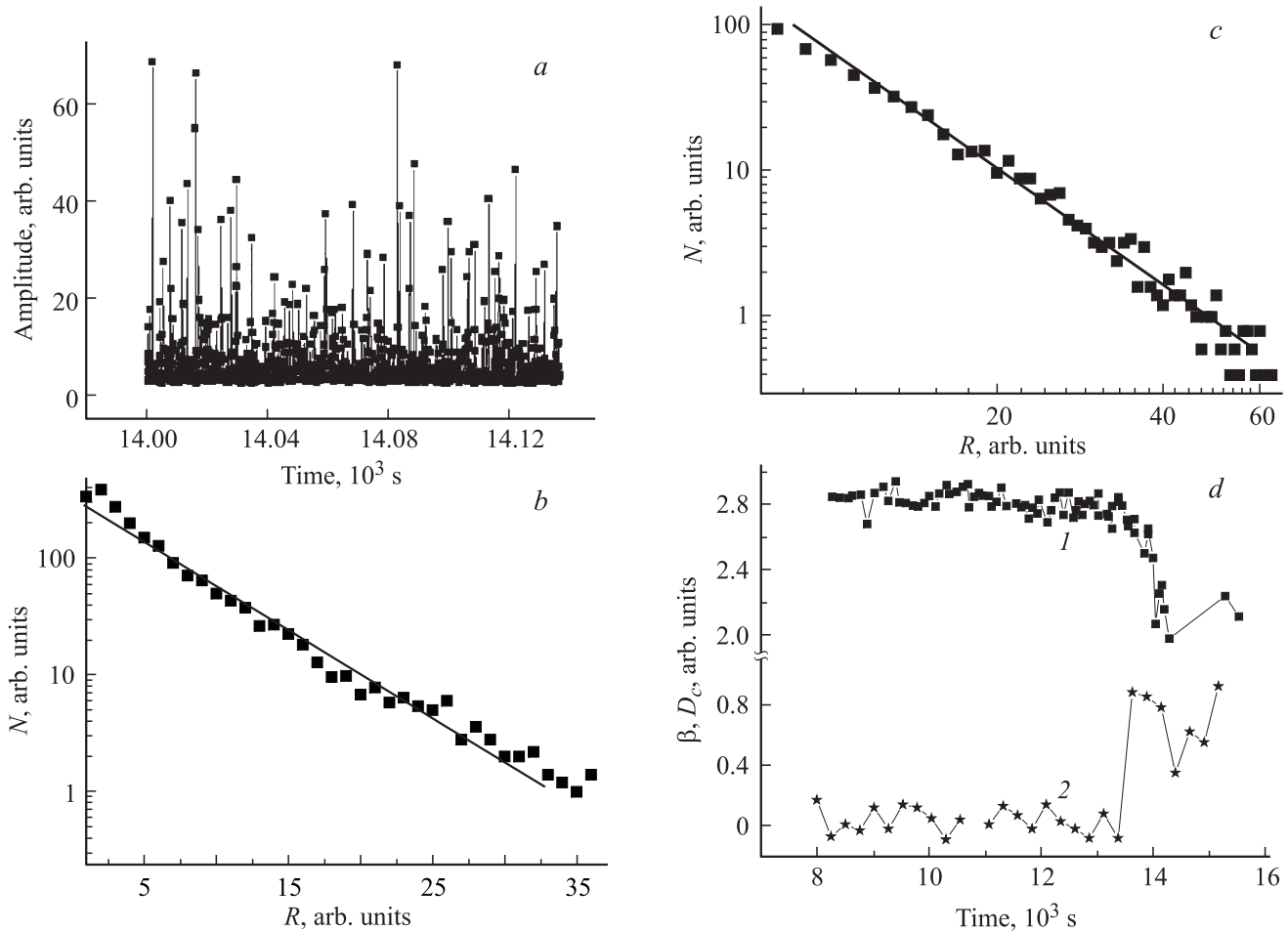


Рис. 1. Экспериментальные данные по АЭ (*a*) и их обработка (*b–d*). *a* — амплитудная зависимость сигналов АЭ на одном из участков временного диапазона; *b, c* — распределения микротрещин по размерам R на начальной и конечной стадиях процесса разрушения соответственно, N — число дефектов (трещин); *d* — временные зависимости корреляционной фрактальной размерности D_c (1) и временного скейлингового показателя β (2).

На рис. 1, *a–d* представлены результаты эксперимента и его обработки. Рис. 1, *a* показывает зависимость амплитуды сигналов АЭ от времени на одном из выбранных диапазонов, близком ко времени разрушения. К выбору величины временного интервала необходимо подходить достаточно осторожно. Если выбрать большой временной интервал, то мы получим надежную статистику событий. Однако различия в характере накопления трещин на начальном, срединном и конечном участках утрачиваются. Поэтому выбор величины временного интервала являлся компромиссным.

Подобные зависимости были получены во всем временном интервале наблюдений. Из данных, приведенных на рис. 1, *a*, можно получить количество и размеры образующихся микротрещин в данном временном интервале. На рис. 1, *b, c* приведены зависимости распределений числа дефектов (трещин) N по размерам R на начальной и конечной стадиях процесса разрушения соответственно. Эти зависимости представлены в полулогарифмических (рис. 1, *b*) и логарифмических (рис. 1, *c*) коор-

динатах, которые удобны для выявления скейлинговых закономерностей. Так, можно заметить, что на начальной стадии процесса функция распределения дефектов по размерам носит экспоненциальный характер. Однако на конечной стадии процесса распределение становится степенным в полном согласии с концепцией о появлении СОК и фрактализации системы на этой стадии процесса разрушения [4,5,10,11].

Ранее нами было обнаружено [5], что поведение спектра мощности временной автокорреляционной функции для различных параметров сигнала АЭ, связанной с трещинообразованием, перед разрушением гетерогенных материалов носит характер $1/f$ шума, где f — частота шума. В то же время меняется и характер скейлинга пространственного коррелятора Грассбергера–Прокаччи (корреляционного интеграла), который на заключительной стадии разрушения становится степенным, с показателем степени, примерно равным фрактальной размерности [5,11] будущей поверхности разрушения.

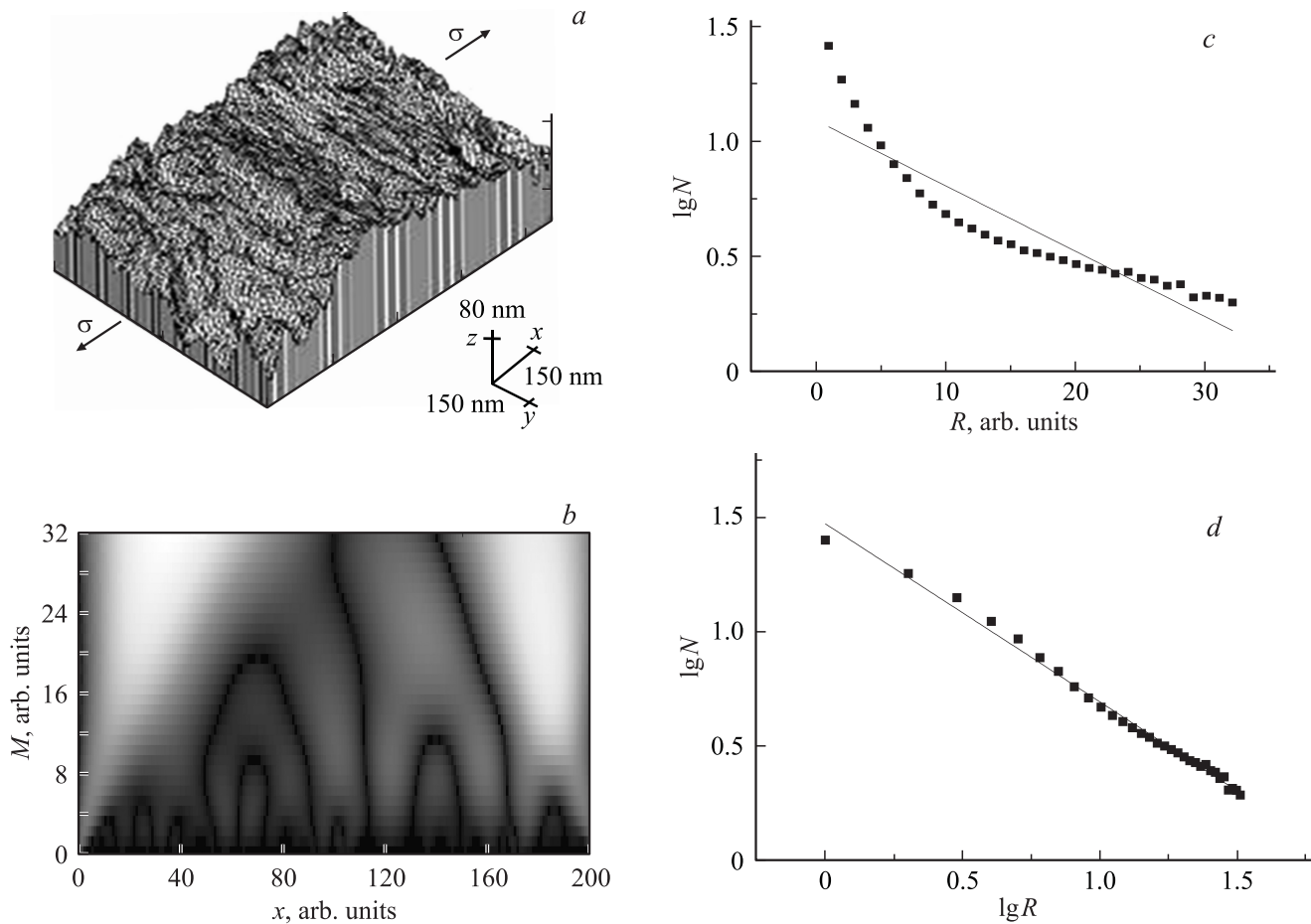


Рис. 2. Поверхность АС при одноосном растяжении $\sigma \approx 0.01$ ГПа. *a* — топограмма поверхности; *b* — вейвлет-преобразование поверхностного рельефа (X — координата вдоль скана топограммы, M — характерный масштаб, пропорциональный размеру дефекта); *c, d* — распределения числа дефектов на боковой поверхности образца по размерам в полулогарифмических и логарифмических координатах соответственно.

Были рассчитаны временная $K(t_1, t_2)$ и пространственная $C(r)$ корреляционные функции. Для этого весь интервал процесса разрушения был разбит на квазистационарные участки

$$K(t_1, t_2) = \langle x(t_1)x(t_2) \rangle,$$

$$C(r) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{j=1}^N \sum_{i=j+1}^N H(r - r_{ij}).$$

Для функции $K(t_1, t_2) = K(t_1 - t_2) = K(\Delta t)$ в области стационарности вычисляли Фурье-спектр $S(\omega)$:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} K(\Delta t) \exp(i\omega t) dt.$$

Здесь t — время, $x(t)$ — исследуемый сигнал (амплитуда сигнала или пауза между двумя соседними сигналами). Для функции $C(r)$ корреляционного интеграла r_{ij} — расстояние между парой трещин i и j , H — функция Хевисайда.

Было обнаружено, что функция $S(\omega) \propto \omega^{-\beta}$, а функция $C(r) \propto r^{D_c}$, т.е. они являются степенными функциями. Функция β называется временным скейлинговым показателем, связанным со спектральной фрактальной размерностью сигнала [4]. Показатель степени D_c называется корреляционной фрактальной размерностью.

На рис. 1, *d* показаны зависимости D_c и β от времени. Из рисунка видно, что β и D_c на разных участках временного процесса разрушения не одинаковы. Так, на начальной стадии процесса разрушения $D_c \approx 3$, $\beta \approx 0$. Последнее означает, что накопление трещин происходит однородно по объему, а $S(\omega)$ представляет собой белый шум Найквиста [12]. На заключительной стадии процесса $D_c \approx 2.2-2.4$, $\beta \approx 1$. Это свидетельствует о локализованном характере накопления трещин со спектром $S(\omega)$, характерным для $1/f$ шума. На этой стадии процесса трещины, образующиеся в очаге разрушения, подготавливают будущую поверхность разрушения материала [5]. Именно этот процесс перехода от однородного процесса накопления микротрещин к локализованному процессу иллюстрирует зависимости, приведенные на рис. 1.

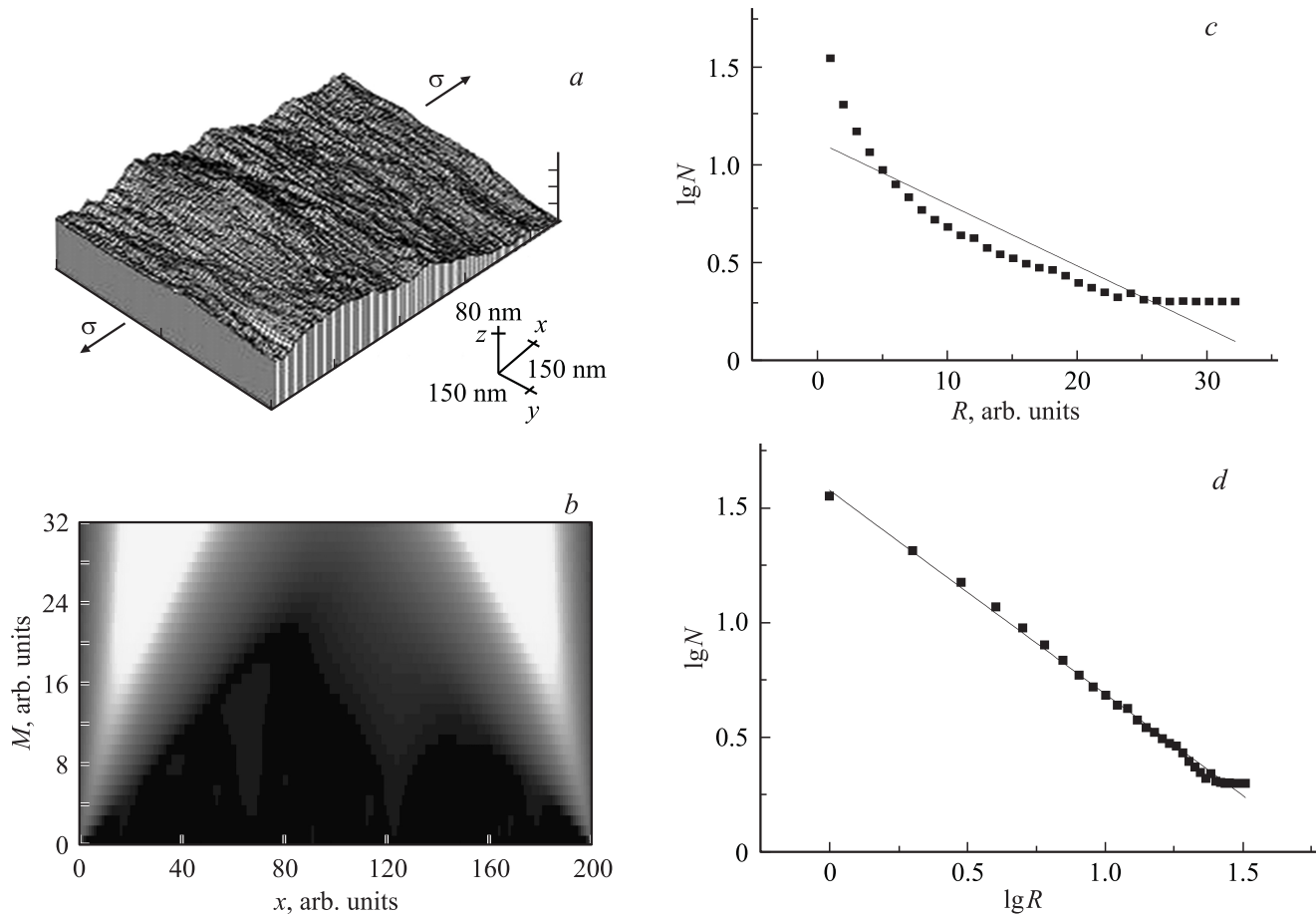


Рис. 3. Поверхность АС при одноосном растяжении $\sigma = 1.7$ ГПа. Обозначения те же, что на рис. 2.

2.2. Формирование фрактальных структур на боковых поверхностях твердых тел. Тенденция к формированию фрактальных структур на заключительной стадии процесса разрушения была обнаружена недавно рядом авторов при изучении трансформации поверхностного профиля латеральной поверхности механически нагруженных образцов в широком диапазоне масштабов [7,8,13–15].

Нами изучался аморфный сплав (АС) $\text{Fe}_{77}\text{Ni}_1\text{Si}_9\text{B}_{13}$ (промышленная марка 2НСП), полученный путем сверхбыстрой закалки из жидкой фазы методом одновалкового спиннингования [16]. Сплав представлял собой ленту толщиной $20\ \mu\text{m}$, из которой вырезались образцы длиной $20\ \text{mm}$, шириной $3\text{--}5\ \text{mm}$. Механическое напряжение σ при растяжении прикладывалось вдоль направления спиннингования. Исследовались топограммы боковой поверхности при нагружении образцов по мере увеличения нагрузки. Топограммы поверхности содержали матрицу чисел z (200×200), сканирование поверхности производилось вдоль оси x .

На рис. 2 и 3 приведены топограммы поверхности нагруженных образцов, результаты их вейвлет-преобразований (усредненные по сканам топограммы), а также распределения дефектов на поверхности

по их высотным размерам. Коэффициенты вейвлет-преобразования, изображенные оттенками серого цвета на рис. 2, *b* и 3, *b*, позволяют нам рассчитать и построить зависимость числа дефектов N от их размера R . Это число $N(R)$ рассчитывалось по числу локальных максимумов вейвлет-преобразования на каждом масштабном уровне M , который прямо пропорционален размеру дефектов.

На рис. 2, *c* и 3, *c* изображено распределение дефектов по размерам в полулогарифмических координатах. Видно, что точки на графиках не ложатся на прямую линию. Это означает, что данные распределения не являются экспоненциальными.

На рис. 2, *d* и 3, *d* показано распределение дефектов по размерам в логарифмических координатах. На данном графике точки хорошо ложатся на прямую линию, из чего можно сделать вывод, что распределения носят степенной характер. Сравнивая рис. 2, *d* и 3, *d*, заметим, что скейлинговые закономерности при больших нагрузках выражены более четко, чем при малых нагрузках.

Следует отметить, что на поверхности АС при нагрузках, близких к нулевым, не наблюдается экспоненциальных распределений дефектов по размерам. По нашему мнению, это связано с тем, что на поверхности

АС „заморожены“ остаточные напряжения, вызванные быстрым стеклованием ленты АС. По мере увеличения нагрузки исходная фрактальная структура разрушается и формируются новые фрактальные структуры на поверхности [7,8,13]. Это должно находить отражение и в распределении дефектов по их размерам.

Фрактальная размерность D боковой поверхности образца АС изменяется в пределах от 2.2 до 2.4 при различных нагрузках, как было показано ранее [7,8,13]. Образование скейлинга и фрактализация поверхности являются признаками формирования СОК, что в свою очередь является условием разрушения образца. Можно предположить, что магистральная трещина, зародясь на поверхности, распространяется в полосе сдвига [7,17], объединяя расположенные в ней микропоры.

3. Заключение

Таким образом, под действием механической нагрузки как в объеме материала, так и на его поверхности при приближении к разрушению формируются самоподобные структуры дефектов, распределение которых по размерам носит степенной характер, что отражает образование СОК и является характерным признаком наступающего разрушения. Формирование СОК перед разрушением образца отражает физическую закономерность проявления степенных законов в преддверии критических событий (типа фазовых переходов разрушения и др.) [4,7,8]. При этом происходит нарушение закона больших чисел, характерного для экспоненциальных и гауссовых распределений, и существенно возрастает роль крупномасштабных флуктуаций, приводящих к катастрофам. По нашему мнению, эти признаки могут быть использованы в прогностических целях.

Список литературы

- [1] Р. Балеску. Равновесная и неравновесная статистическая механика. Мир, М. (1978). Т. 1. 406 с.
- [2] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Статистическая физика. Наука, М. (1976). Ч. 1. 584 с.
- [3] D.L. Turcotte. Rep. Prog. Phys. **62**, 1377 (1999).
- [4] А.Н. Павлов, В.С. Анищенко. УФН **177**, 859 (2007).
- [5] В.Л. Гиляров. ФТТ **47**, 808 (2005).
- [6] В.В. Mandelbrot. Int. J. Fracture **138**, 13 (2006).
- [7] В.И. Бетехтин, П.Н. Бутенко, В.Л. Гиляров, А.Г. Кадомцев, В.Е. Корсуков, М.М. Корсукова, Б.А. Обидов. ФТТ **50**, 1800 (2008).
- [8] В.И. Бетехтин, В.Л. Гиляров, А.Г. Кадомцев, В.Е. Корсуков, М.М. Корсукова, Б.А. Обидов. Изв. РАН. Сер. физ. **73**, 1506 (2009).
- [9] D.A. Lockner, J.D. Byerlee, V. Kuksenko, A. Ponomarev, A. Sidorin. In: Fault mechanics and transport properties of rocks / Eds B. Evans, T-F. Wong. Academic Press, London (1992). P. 3.
- [10] A. Arneodo, E. Bacry, J.F. Muzy. Physica A **213**, 232 (1995).
- [11] Г.Г. Малинецкий, С.П. Курдюмов. Вестн. РАН **71**, 210 (2001).
- [12] А. ван дер Зил. Шум (источники, описание, измерение). Сов. радио, М. (1973). 227 с.
- [13] В.Л. Гиляров, В.Е. Корсуков, П.Н. Бутенко, В.Н. Светлов. ФТТ **46**, 1806 (2004).
- [14] С.Н. Кульков, Ю.П. Миронов. ЖТФ **74**, 4, 129 (2004).
- [15] И.Н. Севостьянова, С.Н. Кульков. ЖТФ **73**, 2, 81 (2003).
- [16] К. Судзуки, Х. Фудзимори, К. Хасимото. Аморфные металлы. Металлургия, М. (1987). 328 с.
- [17] А.М. Глезер, В.И. Бетехтин. ФТТ **38**, 1784 (1996).