

Пантелеев И.А., Баяндин Ю.В., Плехов О.А. Эффект синхронизации статистических свойств непрерывной акустической эмиссии при деформировании структурно-неоднородных материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2022. – № 3. – С. 5–13. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.01

Pantelev I.A., Bayandin Yu.V., Plekhov O.A. Effect of synchronization of continuous acoustic emission statistical properties during structurally heterogeneous materials deformation. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2022, no. 3, pp. 5-13. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.01



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 3, 2022

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.01

УДК 539.3

ЭФФЕКТ СИНХРОНИЗАЦИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕПРЕРЫВНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

И.А. Пантелеев, Ю.В. Баяндин, О.А. Плехов

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 24 августа 2022 г.
Одобрена: 20 сентября 2022 г.
Принята к публикации:
01 ноября 2022 г.

Ключевые слова:

акустическая эмиссия,
мультифрактальный спектр,
синхронизация,
спектральная мера когерентности,
накопление повреждений.

АННОТАЦИЯ

Проведен корреляционный анализ статистических свойств непрерывной акустической эмиссии, зарегистрированной в различных частях образцов мрамора и стекловолоконного ламината при их квазистатическом деформировании. В качестве меры корреляции выбрана спектральная мера когерентности, являющаяся обобщением квадрата модуля спектра когерентности на случай многомерных рядов. Мера когерентности оценивалась для ширины мультифрактального спектра и носителя спектра, реализующего его максимум, вычисленных в скользящем временном окне для сигналов акустической эмиссии. Показано, что подготовка очага макроразрушения сопровождается синхронизацией статистических свойств акустической эмиссии в выделенных частотных интервалах. На основе анализа изменения средней по частотам меры когерентности для обоих типов материалов выделены четыре характерных стадии, границы которых индивидуальны для каждого из материалов. Наступление четвертой стадии, характеризующейся монотонным ростом средней меры когерентности статистических свойств акустической эмиссии, может быть выбрано в качестве возможного критерия перехода материала в предельное состояние.

© ПНИПУ

© Пантелеев Иван Алексеевич – к.ф.-м.н., зав. лаб., e-mail: pia@icmm.ru, ID: 0000-0002-7430-3667

Баяндин Юрий Витальевич – к.ф.-м.н., с.н.с., e-mail: buv@icmm.ru, ID: 0000-0002-1824-1940

Плехов Олег Анатольевич – член-корр. РАН, директор ПФИЦ УрО РАН, e-mail: poa@icmm.ru,

ID: 0000-0002-0378-8249

Ivan A. Pantelev – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Head of laboratory, e-mail: pia@icmm.ru,

ID: 0000-0002-7430-3667

Yuriy V. Bayandin – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, e-mail: buv@icmm.ru,

ID: 0000-0002-1824-1940

Oleg A. Plekhov – Corresponding member of RAS, Director, e-mail: poa@icmm.ru, ID: 0000-0002-0378-8249



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

EFFECT OF SYNCHRONIZATION OF CONTINUOUS ACOUSTIC EMISSION STATISTICAL PROPERTIES DURING STRUCTURALLY HETEROGENEOUS MATERIALS DEFORMATION

I.A. Pantelev, Yu.V. Bayandin, O.A. Plekhov

Institute of continuous media mechanics UB RAS, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 24 August 2022
Approved: 20 September 2022
Accepted for publication:
01 November 2022

Keywords:

acoustic emission, multifractal spectrum, synchronization, spectral measure of coherence, damage accumulation.

ABSTRACT

In this paper, a correlation analysis of the statistical properties of continuous acoustic emission recorded in various parts of marble and glass fiber laminate samples during their quasi-static deformation is carried out. The spectral measure of coherence, which is a generalization of the square modulus of the coherence spectrum to the case of multidimensional series, is chosen as a correlation measure. The measure of coherence was estimated for the width of the multifractal spectrum and the spectrum carrier realizing its maximum, calculated in a sliding time window for acoustic emission signals. It is shown that the preparation of a macrofracture site is accompanied by synchronization of the statistical properties of acoustic emission in the selected frequency intervals. Based on the analysis of changes in the frequency-averaged measure of coherence for both types of materials, four characteristic stages are distinguished, the boundaries of which are individual for each of the materials. The onset of the fourth stage, which is characterized by a monotonic increase in the average measure of the coherence of the statistical properties of the AE, can be chosen as a possible criterion for the transition of the material to the limiting state.

© PNRPU

Введение

Наиболее широко используемым методом неразрушающего контроля для мониторинга природных и техногенных объектов, нагруженных ответственных узлов и агрегатов, в том числе выполненных из структурно-неоднородных материалов, является метод акустической эмиссии (АЭ). Конкурентными преимуществами метода являются: возможность контроля всего объема объекта (независимо от его характерного размера), включая труднодоступные места; возможность осуществления мониторинга состояния объекта контроля в процессе его эксплуатации; возможность не только выявить, но и классифицировать развивающиеся дефекты по степени опасности. Для оценки степени опасности развивающихся дефектов, а как следствие, и для оценки предельного состояния объекта контроля, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима, используются различные критерии, базирующиеся на анализе акустико-эмиссионных данных. По типу анализируемых характеристик критерии могут быть разделены на несколько классов:

1. Критерии, основанные на интегродифференциальных характеристиках акустической эмиссии:

- критерий Иванова – Быкова;
- по величине временных инвариантных соотношений [1; 2];

- по интенсивности потока АЭ.

2. Амплитудно-энергетические критерии:

- по амплитудному признаку (количеству сигналов АЭ с амплитудой выше пороговой);
- по форме энергетического (амплитудного) распределения;

- по наклону энергетического спектра (b-value анализ);
- по величине амплитудных инвариантных соотношений [2];

- технология MONPAC.

3. Критерии, основанные на спектральных характеристиках сигнала АЭ:

- по изменению частотных характеристик (частота максимума спектра, медианная частота) или их распределений [3–5].

4. Физические обоснованные критерии:

- критерии, основанные на гипотезе стационарного пуассоновского потока [2; 6];

- критерии, базирующиеся на оценке характерных масштабов в ансамбле образующихся в процессе эксплуатации дефектов [7–10];

- критерии из 1–3-й групп, использующих в качестве исходной информации результаты кластеризации данных АЭ и их классификации по типу/механизму источника [11–14].

Представленная классификация, безусловно, является не полной. При этом необходимо отметить, что большинство критериев базируется либо на оценке интенсивности генерации акустической эмиссии в объекте контроля, либо на фиксации появления представительной группы импульсов АЭ, отличающихся по своим амплитудно-частотным характеристикам, зачастую игнорируя исходную структуру и/или возможные механизмы деформирования материала. Использование физически обоснованных критериев позволяет учесть эту информацию, но сопряжено с появлением дополнительных ограничений.

Так, результаты кластеризации импульсов АЭ в многомерном пространстве их параметров и классифи-

кации по типу/механизма источника могут быть использованы только для того класса материалов, на которых они валидированы. Сам процесс валидации результатов кластерного анализа данных АЭ трудоемок и в настоящее время завершен для узкого класса материалов [15–16]. Использование частотных характеристик импульсов АЭ в процедуре кластеризации автоматически приводит к зависимости разработанных критериев от приборной базы, т.е. амплитудно-частотных характеристик преобразователей акустической эмиссии и всего измерительного тракта.

Критерии, базирующиеся на оценке характерных масштабов в ансамбле дефектов, опираются на представления о взаимодействии трещин в деформируемом материале как механизме формирования очага макроразрушения. Согласно современным представлениям, момент начала взаимодействия дефектов не зависит от режима нагружения, а определяется лишь отношением среднего размера образующихся микротрещин и характерного расстояния между ними. В работах [17–19] это отношение называется концентрационным параметром, в работах [8; 9; 20] – параметром структурного скейлинга.

Несмотря на значительные успехи в использовании концентрационного параметра (параметра структурного скейлинга) для задач прогнозирования разрушения [19] данный подход имеет ряд недостатков. Результат оценки двух характерных масштабов в ансамбле дефектов зависит от чувствительности используемой системы регистрации акустической эмиссии, уровня шумов в измерительных каналах, степени исходной неоднородности материала. Влияние обозначенных факторов проявляется в существенной вариации критической величины отношения двух масштабов в зависимости от материала и размеров объекта мониторинга, в виде отсутствия явно выраженного порога на зависимости концентрационного параметра (параметра структурного скейлинга) от времени деформирования.

Вышеперечисленные обстоятельства определяют актуальность задачи разработки новых подходов к анализу данных акустической эмиссии, а как следствие, и критериев предельного состояния объекта контроля, имеющих четкую физическую интерпретацию. Активная разработка и внедрение в практику оптоволоконной технологии распределенных виброакустических датчиков (технология DAS) [21], которые могут быть использованы для мониторинга совместно с традиционными пьезокерамическими преобразователями, делает требование независимости результатов обработки данных АЭ от используемой приборной базы критически важным и обязательным к исполнению.

В основе настоящего исследования лежит гипотеза о том, что коррелированное поведение ансамбля микротрещин (их взаимодействие) в структурно-неоднородных материалах при их деформировании должно проявляться в виде корреляции данных акустической эмиссии, зарегистрированной в различных частях образца. При этом чем сильнее степень взаимодействия микро-

трещин и больше масштаб их коррелированного поведения, тем выше степень корреляции данных АЭ. Целью данной работы является поиск частотных корреляций в данных акустической эмиссии, зарегистрированной в процессе квазистатического деформирования образцов двух различных структурно-неоднородных материалов. Ключевая особенность настоящего исследования – переход от исходных временных рядов акустической эмиссии к их статистическим характеристикам, что позволяет освободиться от специфики исходных данных, связанной с их размерностью, аппаратной зависимостью, и, в общем случае, различной физической природой.

1. Материалы и методы экспериментального исследования

Для поиска корреляций во временных рядах статистических свойств акустической эмиссии были испытаны образцы, изготовленные из двух различных структурно-неоднородных материалов: стекловолоконного ламината и мрамора. Образцы тканого стекловолоконного ламината изготавливались методом вакуумной инфузии из стеклоткани Т13П76-100 (количество слоев – 10) с пропиткой эпоксидной смолой «Этал-Инжект SL (М)». Образцы представляли собой прямоугольные пластины с размерами 250×25×3 мм со скругленными боковыми гранями (радиус скругления – 2230 мм). Для исключения проскальзывания образцов в захватах при испытании их концевые части покрывались слоем полиуретана. Образцы мрамора Коелга (Челябинская область) имели форму прямоугольной призмы с размерами 80×40×20 мм. Для обеспечения плоскопараллельности торцов образцы перед испытанием подвергались дополнительной полировке.

Образцы мрамора Коелга и стекловолоконного ламината были испытаны соответственно на квазистатическое одноосное сжатие и растяжение до разрушения на нагружающей машине Shimadzu AG-X Plus (максимальное усилие 300 кН). Скорость деформирования образцов мрамора составила $2,45 \cdot 10^{-4}$ 1/с, образцов ламината – $1,38 \cdot 10^{-4}$ 1/с.

Для регистрации акустической эмиссии была использована система Amsy-5 Vallen (Германия) со следующими широкополосными преобразователями акустической эмиссии: при испытании ламината – SE2MEG-P (рабочий диапазон 200–2000 кГц), при испытании мрамора – AE104 (рабочий диапазон 100–400 кГц) и M31 (300–800 кГц). Использование в испытаниях различных по характеристикам преобразователей акустической эмиссии является осознанным выбором, направленным на проверку зависимости получаемых результатов от задействованной приборной базы. Для усиления сигнала АЭ использовались предусилители АЕР4 (коэффициент усиления 34 дБ). Преобразователи акустической эмиссии крепились на поверхности образцов мрамора и ламината с по-

мощью цианакрилатного клея. При испытании обоих материалов использовалась пара преобразователей АЭ (два канала), расположенных на противоположных торцах на расстоянии 40 и 125 мм для мрамора и ламината соответственно. Регистрация акустической эмиссии осуществлялась каждым из преобразователей в непрерывном (беспороговом режиме) с частотой дискретизации волновых форм 5 МГц.

2. Методика обработки АЭ-данных и полученные результаты

На рис. 1 представлены характерные сигналы АЭ, зарегистрированные при деформировании мрамора и стекловолоконного ламината в течение всего эксперимента.

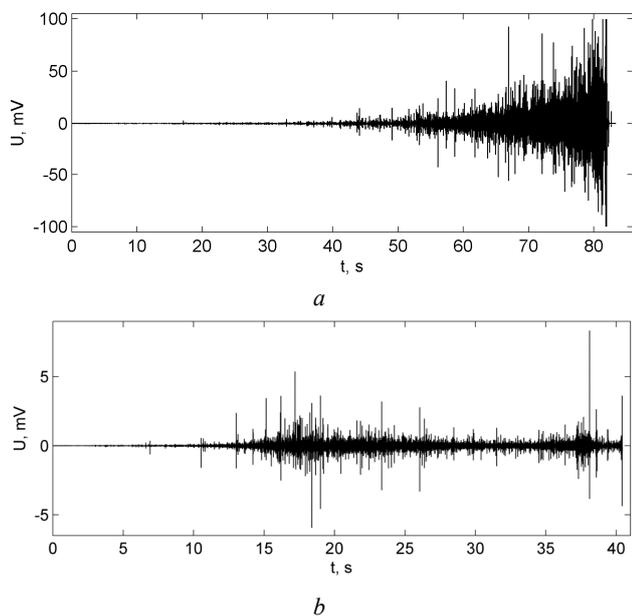


Рис. 1. Сигнал акустической эмиссии, записанный одним из преобразователей АЭ, при деформировании образца стекловолоконного ламината (а) и мрамора (б)

Fig. 1. Acoustic emission signal recorded by one of the AE transducers during deformation of a sample of fiberglass laminate (a) and marble (b)

Характер АЭ при деформировании этих материалов существенно различен, что определяется разными механизмами их деформирования и разрушения. Акустическая эмиссия, зарегистрированная при одноосном растяжении стекловолоконного ламината, характеризуется постепенным нарастанием интенсивности импульсов и их максимальной амплитуды. Тогда как акустико-эмиссионная активность, сопровождающая одноосное сжатие мрамора Коелга, имеет стадийный характер с чередованием интервалов эмиссии высоко- и низкоамплитудных сигналов (см. рис. 1, б).

Корреляционный анализ данных АЭ, зарегистрированных парой преобразователей в экспериментах с образцами ламината и мрамора, показал отсутствие корреляции между временными рядами акустической эмиссии, зарегистрированной в разных частях испытан-

ных образцов. Коэффициент корреляции временных рядов акустической эмиссии при деформировании мрамора составил 0,008, при деформировании ламината – 0,014. Полученный результат закономерен, так как регистрируемый в экспериментах сигнал акустической эмиссии представляет собой суперпозицию сигналов, обусловленных появлением и развитием системы микротрещин в деформированном материале, сигналов, вызванных множественными переотражениями, механических шумов испытательной машины, шумов измерительного тракта и электромагнитных наводок.

Основываясь на результатах анализа геофизических полей различной природы при мониторинге подготовки крупных сейсмических событий [22], авторами была принята гипотеза, что коррелированное поведение в ансамбле микротрещин должно проявляться не в целом для всего регистрируемого волнового поля, а на определенных частотах, связанных с характерными масштабами исследуемого процесса. При этом для избавления от отрицательного влияния масштабного (размерного) эффекта характеристик используемой аппаратуры и измерительного тракта необходимо перейти от поиска коррелиций в исходных данных к поиску синхронного, коррелированного поведения параметров, описывающих статистические свойства исходных сигналов. В качестве статистических свойств сигналов акустической эмиссии были выбраны параметры их мультифрактальных спектров: ширина спектра ΔH и величина носителя спектра сингулярности H_{max} , реализующего его максимум, отражающих статистическое самоподобие исходных сигналов [23].

Для построения мультифрактального спектра временных сигналов акустической эмиссии был использован алгоритм MF-DFA (мультифрактальный метод на основе анализа флуктуаций анализируемых данных с исключенным наклоном), широко используемый для исследования временных рядов различной природы [24–27]. В отличие от методов, использующих быстрое преобразование Фурье и вейвлет-преобразование, в методе MF-DFA [28] используется прямой метод построения частичных функций $Z(q, s)$. Частичные функции для различных значений q вычисляются как

$$Z(q, s) = \begin{cases} \left\{ \frac{1}{N_s} \sum_{v=1}^{N_s} [F^2(v, s)]^{q/2} \right\}^{1/q}, & q \neq 0 \\ \text{Exp} \left\{ \frac{1}{2N_s} \sum_{v=1}^{N_s} \ln [F^2(v, s)] \right\}, & q = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $F^2(v, s)$ – среднеквадратичные отклонения исследуемой функции от линейного тренда на v -ом интервале длиной s .

В выражении (1) q является степенью, отражающей влияние вклада крупномасштабных флуктуаций при $q > 0$ и мелкомасштабных флуктуаций – при $q < 0$ [29]. По полученным частичным функциям $Z(q, s)$, где s

играет роль масштаба, в диапазоне $s_{\min} \leq s \leq s_{\max}$, на котором справедлива степенная зависимость $Z(q, s) \sim s^{\alpha(q)}$, строятся обобщенные показатели $\alpha(q)$.

С использованием преобразования Лежандра определяется мультифрактальный спектр (спектр сингулярностей) $D(H)$

$$\begin{cases} H = \alpha(q) + \frac{q \partial \alpha(q)}{\partial q} \\ D(H) = q^2 \frac{\partial \alpha(q)}{\partial q} + 1. \end{cases} \quad (2)$$

Ширина спектра $\Delta H = |H(q = -\infty) - H(q = +\infty)|$ определяет степень мультифрактальности исследуемого сигнала, а характерные значения функции спектра сингулярностей $D(H)$ и ее производной при различных положительных значениях $q = 0, 1, 2$ и т.д. характеризуют соответствующие фрактальные размерности [29]. При $q = 0$ достигается максимальное значение функции $D(H_{\max}) = D_0 = 1$, где $H_{\max} = H_{q=0}$, которое совпадает с фрактальной размерностью Хаусдорфа и является размерностью вложения пространства – области задания анализируемой функции.

Ширина мультифрактального спектра ΔH и величина H_{\max} были оценены в скользящем временном окне отдельно для каждого из двух сигналов АЭ, зарегистрированных в различных частях образца ламината и мрамора. В случае одноосного растяжения ламината размер окна составил 81,4 мс с шагом 2,05 мс, в случае мрамора – 39,5 и 3,28 мс соответственно. Характерные временные зависимости этих параметров для сигнала АЭ, зарегистрированного при одноосном сжатии мрамора, представлены на рис. 2.

Для исследования степени коррелированности временных рядов статистических свойств сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных в различных частях образцов мрамора и стекловолоконного ламината, использовалась частотно-зависимая мера когерентного поведения компонент многомерных временных рядов $k(v, t)$, введенная в работах [22; 30; 31]. Спектральная мера когерентности $k(t, v)$ строится как произведение модулей покомпонентных канонических когерентностей

$$k(t, v) = \prod_{j=1}^m |\mu_j(t, v)|, \quad (3)$$

где $m \geq 2$ – общее число совместно анализируемых временных рядов (размерность многомерного временного ряда), v – частота, t – временная координата правого конца скользящего временного окна, состоящего из определенного числа смежных отсчетов, $\mu_j(t, v)$ – каноническая когерентность j -го скалярного временного ряда, которая описывает силу связанности этого ряда со

всеми прочими рядами. Величина $|\mu_j(t, v)|^2$ является обобщением традиционного квадратичного спектра когерентности между двумя сигналами на случай, когда второй сигнал является не скалярным, а векторным. Выполняется неравенство $0 \leq |\mu_j(t, v)| \leq 1$, и чем ближе значение $|\mu_j(t, v)|$ к единице, тем сильнее линейно связаны вариации на частоте v во временном окне с координатой t -го ряда с аналогичными вариациями во всех прочих рядах. Соответственно, величина $0 \leq k(t, v) \leq 1$ в силу своего построения описывает эффект совокупного когерентного (синхронного, коллективного) поведения всех сигналов.

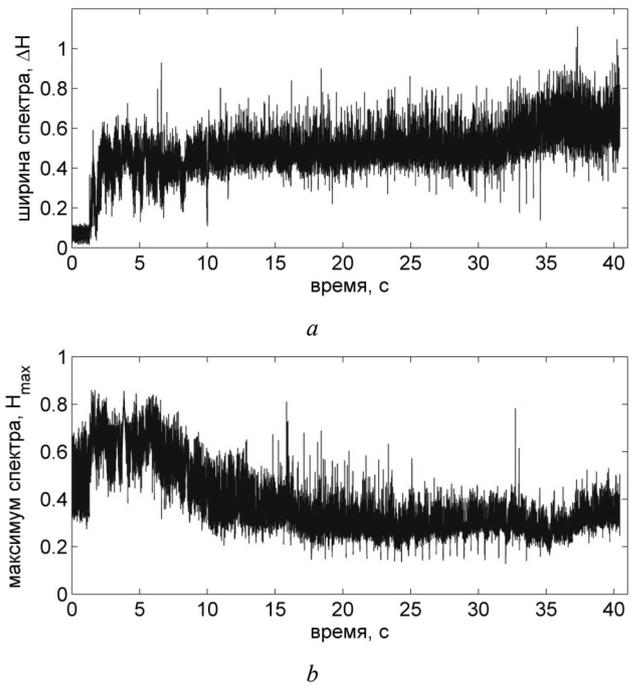


Рис. 2. Изменение ширины спектра ΔH (a) и величины H_{\max} (b) с течением времени, оцененное для сигнала АЭ, зарегистрированного одним из двух преобразователей при испытании мрамора

Fig. 2. Change in the width of the spectrum ΔH (a) and the value of H_{\max} (b) over time, estimated for the AE signal recorded by one of the two transducers during testing marble

Частотно-зависимые канонические когерентности $\mu_j(v)$ для временного многомерного ряда заданного размера (фиксированного размера временного окна) определяются как

$$\mu_j^2(v) = S_j^H(v) \left(S^{(j)}(v) \right)^{-1} S_j(v) / P_j(v), \quad (4)$$

где $S^{(j)}(v)$ – эрмитова матрица размером $(m-1) \times (m-1)$, которая получается из полной спектральной матрицы $S(v)$ размером $m \times m$ многомерного временного ряда путем удаления j -го столбца и j -й стро-

ки; $S_j(v)$ – $(m - 1)$ -мерный вектор, состоящий из кросс-спектров между j -й компонентой временного ряда и всеми прочими компонентами. Вектор $S_j(v)$ состоит из элементов j -го столбца полной спектральной матрицы $S(v)$, за исключением элемента в j -й строке, $S_j^H(v)$ – эрмитово сопряжение вектора $S_j(v)$. Наконец, $P_j(v)$ является спектром мощности j -й компоненты многомерного временного ряда, т.е. j -м элементом на главной диагонали полной спектральной матрицы $S(v)$. Поскольку матрица $S_j(v)$ является эрмитовой и положительно-определенной, то квадратичная форма $S_j^H(v)(S^{(j)}(v))^{-1}S_j(v)$ вещественна и неотрицательна.

Для анализа степени корреляции статистических свойств акустической эмиссии в процессе деформирования образцов мрамора и стекловолоконного ламината мера когерентного поведения оценивалась в скользящих окнах 9,86 и 39 с с шагом 0,03 и 1,26 с соответственно. При этом для каждого из материалов в качестве анализируемого многомерного временного ряда был выбран ряд, составленный из двух временных рядов ширины максимума спектра сингулярности и двух рядов величины носителя спектра сингулярности, реализующего его максимум, т.е. статистических свойств акустической эмиссии, зарегистрированной каждым из двух преобразователей акустической эмиссии.

На рис. 3 представлена эволюция спектральной меры $k(t, v)$ когерентного поведения статистических свойств непрерывной акустической эмиссии, зарегистрированной при квазистатическом одноосном сжатии образца мрамора и одноосном растяжении образца ламината. Полученные временные зависимости спектральной меры когерентности имеют сходную структуру.

На начальном этапе деформирования образцов наблюдается коррелированное поведение статистических свойств непрерывной акустической эмиссии в одном или нескольких интервалах частот. Для образца мрамора это интервалы 1–53; 113–159; 174–232 Гц, для образца ламината – 7,3–18 Гц. Синхронное изменение статистических свойств на начальном этапе деформирования образцов, по-видимому, связано с тем, что в исходном анализируемом сигнале по обоим каналам преобладает шумовая составляющая одинакового происхождения. Далее, начиная с 16-й с для образца мрамора и 53-й с для образца ламината, наступает стадия отсутствия явно выраженных корреляций во всем диапазоне частот. Следующий этап деформирования образцов структурно-неоднородных материалов характеризуется появлением коррелированного изменения статистических свойств непрерывной акустической эмиссии в узких интервалах частот: для мрамора – 82,43–98,22; 155,4–178,2; 232–253,8 Гц, для образца ламината – 15,79–19,41; 33,45–39,29 Гц. При приближении к моменту разрушения степень когерентного (синхронного) поведения статистических свойств не-

прерывной АЭ возрастает при существенном расширении границ частотных интервалов, на котором это поведение наблюдается.

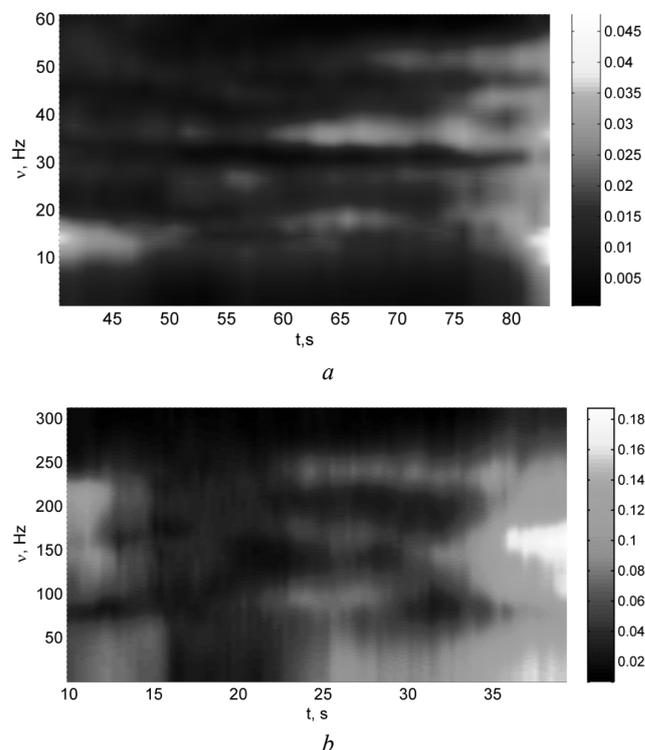


Рис. 3. Эволюция спектральной меры когерентного поведения многомерного временного ряда статистических свойств акустической эмиссии, зарегистрированной при деформировании стекловолоконного ламината (a) и мрамора (b)

Fig. 3. Evolution of the spectral measure of the coherent behavior of a multidimensional time series of statistical properties of acoustic emission recorded during the deformation of a fiberglass laminate (a) and marble (b)

Подобие в изменении спектральной меры когерентности с ростом приложенного усилия для образцов мрамора и стекловолоконного ламината явно прослеживается на временных зависимостях меры когерентности, усреднённой по всему частотному диапазону (рис. 4).

На каждой из зависимостей можно выделить четыре характерных стадии, описанные ранее: стадия I – уменьшение когерентного поведения статистических свойств непрерывной АЭ, обусловленное переходом от чисто шумового сигнала к полезному сигналу, соизмеримым с уровнем шума; стадия II – отсутствие явно выраженных корреляций в изменении статистических свойств АЭ; стадия III – появление коррелированного изменения статистических свойств АЭ в одном или нескольких частотных интервалах; стадия IV – монотонный рост средней по частотам спектральной меры когерентности при приближении к моменту разрушения. Интервалы приложенной к образцу нагрузки, соответствующие стадиям изменения меры когерентности, представлены в таблице.

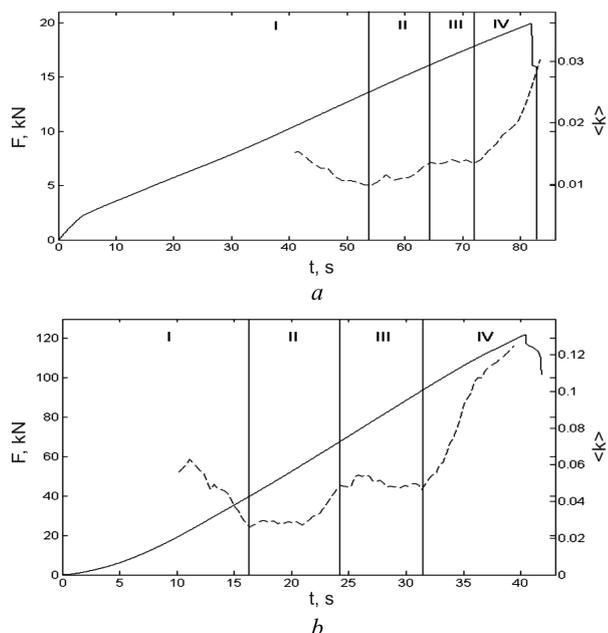


Рис. 4. Совмещенные зависимости приложенной нагрузки (сплошная линия) и средней по частотам меры когерентности (пунктирная линия) от времени для образцов ламината (а) и мрамора (b)

Fig. 4. Combined dependences of the applied load (solid line) and the average frequency coherence measure (dashed line) on time for samples of laminate (a) and marble (b)

Характерные стадии изменения спектральной меры когерентности

Characteristic stages of change in the spectral measure of coherence

Образец	I стадия	II стадия	III стадия	IV стадия
	Уровень нагрузки по отношению к предельной величине, %			
Ламинат	0 – 68,2	68,2 – 80,7	80,7 – 89,6	89,6 – 100
Мрамор	0 – 32,6	32,6–55,4	55,4–76,8	76,8–100

Необходимо отметить, что стадия III, связанная с появлением когерентного поведения статистических свойств непрерывной АЭ на выделенных частотах, начинается задолго до приближения к предельному уровню приложенной нагрузки. При этом условии монотонного роста средней по частотам спектральной меры когерентности временных

Библиографический список

1. Буйло С.И. Об информативности метода инвариантов при анализе прореженных потоков акустической эмиссии // Дефектоскопия. – 2009. – № 11. – С. 41–45.
2. Буйло С.И. Об информативности метода инвариантов сигналов акустической эмиссии в задачах диагностики предразрушающего состояния материалов // Дефектоскопия. – 2018. – № 4. – С. 18–23.
3. Arumugam V., Saravanakumar K., Santulli C. Damage characterization of stiffened glass-epoxy laminates under tensile loading with acoustic emission monitoring // Composites Part B: Engineering. – 2018. – V. 147. – P. 22–32.
4. Monitoring of acoustic emission damage during tensile loading of 3D woven carbon/epoxy composites / S.V. Lomov, M. Kara-

рядов статистических свойств непрерывной акустической эмиссии может служить критерием перехода деформируемого материала (в общем случае объекта контроля) в критическое состояние, предшествующее макроразрушению.

Качественное совпадение полученных зависимостей для образца мрамора и ламината, по мнению авторов, указывает на фундаментальность обнаруженного эффекта синхронизации статистических свойств акустической эмиссии при деформировании структурно-неоднородных материалов, не зависящего от характера нагружения и типа использованных преобразователей акустической эмиссии.

Заключение

В работе приведены результаты исследования закономерностей непрерывной акустической эмиссии, зарегистрированной в экспериментах на квазистатическое одноосное деформирование образцов структурно-неоднородных материалов: стекловолоконного ламината и мрамора Коелга. В рамках гипотезы о том, что коррелированное поведение ансамбля микротрещин (их взаимодействие) в структурно-неоднородных материалах при их деформировании должно проявляться в виде корреляции данных акустической эмиссии, зарегистрированной в различных частях образца, проведен корреляционный анализ временных рядов статистических свойств непрерывной акустической эмиссии.

С использованием частотно-зависимой меры когерентного поведения компонент многомерных временных рядов установлено, что процесс подготовки макроразрушения сопровождается синхронизацией статистических свойств (ширины мультифрактального спектра и параметра, реализующего его максимум) непрерывной акустической эмиссии в выделенных частотных интервалах, ширина которых растет по мере приближения к моменту разрушения. Физической причиной такой синхронизации, по мнению авторов, является взаимодействие микротрещин в материале при постепенном росте пространственного масштаба такого взаимодействия. Показано, что на основе анализа изменения средней по частотам меры когерентности для обоих типов материалов можно выделить четыре характерных стадии, границы которых индивидуальны для каждого из материалов.

- han, A.E. Bogdanovich, I. Verpoest // Textile Research Journal. – 2014. – V. 84, N. 13. – P. 1373–1384.

5. Применение метода акустической эмиссии к исследованию процесса накопления повреждений функционального керамического покрытия / Е.М. Лунегова, Д.С. Лобанов, Е.М. Струнгарь, В.Э. Вильдеман, Ю.Б. Лямин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 38–48.

6. Буйло С.И., Орлов С.В. Корреляционный анализ и метод инвариантов сигналов акустической эмиссии в диагностике предразрушающего состояния материалов // Дефектоскопия. – 2014. – № 8. – С. 36–41.

7. Куксенко В.С. Диагностика и прогнозирование разрушения крупномасштабных объектов // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47. – № 5. – С. 788–792.
8. Наймарк О.Б., Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения // Физическая мезомеханика. – 2003. – Т. 6. – № 4. – С. 45–72.
9. Структурно-скейлинговые переходы и некоторые термодинамические и кинетические эффекты в материалах в объемном субмикро-(нано-)кристаллическом состоянии / О.Б. Наймарк, Ю.В. Баяндин, В.А. Леонтьев, И.А. Пантелеев, О.А. Плехов // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12. – № 4. – С. 47–60.
10. Пантелеев И.А., Наймарк О.Б. Современные тенденции в области механики тектонических землетрясений // Вестник ПНЦ. – 2014. – № 3. – С. 44–62.
11. Deformation mechanisms in austenitic TRIP/TWIP steels at room and elevated temperature investigated by acoustic emission and scanning electron microscopy / M. Linderov, C. Segel, A. Weidner, H. Biermann, A. Vinogradov // Materials science and Engineering: A. – 2014. – Vol. 597. – P. 183–193.
12. Deformation mechanisms underlying tension-compression asymmetry in magnesium alloy Zk60 revealed by acoustic emission monitoring / A. Vinogradov, A. Danyuk, D. Orlov, Y. Estrin // Materials science and Engineering: A. – 2015. – Vol. 621. – P. 243–251.
13. Критериальные параметры для оценки степени деградации композитных материалов при акустико-эмиссионном мониторинге изделий / Ю.Г. Матвиенко, И.Е. Васильев, Д.В. Чернов, С.В. Елизаров // Дефектоскопия. – 2018. – № 12. – С. 3–11.
14. Применение методики ранней диагностики поврежденных при исследовании авиационной панели / И.Е. Васильев, Ю.Г. Матвиенко, А.В. Панков, А.Г. Калинин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2019. – Т. 85, № 6. – С. 53–63.
15. Li L., Lomov S.V., Yan X. Correlation of acoustic emission with optically observed damage in a glass/epoxy woven laminate under tensile loading // Composite Structures. – 2014. – Vol. 123. – P. 45–53.
16. Данюк А.В. Идентификация деформационных процессов в кристаллических материалах с применением современных методов обработки сигнала акустической эмиссии: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. – Тольятти, 2015. – 156 с.
17. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вестник АН СССР. – 1968. – Вып. 3. – С. 46–52.
18. Куксенко В.С. Диагностика и прогнозирование разрушения крупномасштабных объектов // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47, № 5. – С. 788–792.
19. Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф., Манжиков Б.Ц. Концентрационная модель разрушения твердых тел и прогнозирование катастрофических ситуаций крупномасштабных объектов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. – № 4. – С. 29–40.
20. Pantelev I.A., Plekhov O.A., Naimark O.B. Model of geomechanics containing defects: collective effects of defects evolution during formation of potential earthquake foci // Geodynamics & Tectonophysics. – 2013. – Vol. 4 (1). – P. 37–51.
21. Review of a Specialty Fiber for Distributed Acoustic Sensing Technology / Y. Sun, H. Li, C. Fan, B. Yan, J. Chen, Z. Yan, Q. Sun // Photonics. – 2022. – Vol. 9. – P. 277–300.
22. Любушин А.А. Статистика временных фрагментов низкочастотных микросейсм: их тренды и синхронизация // Физика Земли. – 2010. – Т. 6. – С. 86–96.
23. Пантелеев И.А., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Пространственно-временные закономерности развития поврежденности при деформировании стекловолоконного тканого ламината по данным акустической эмиссии // Физическая мезомеханика. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 64–73.
24. Biswas A., Zeleke T.B., Si B.C. Multifractal detrended fluctuation analysis in examining scaling properties of the spatial patterns of soil water storage // Nonlin. Processes Geophys. – 2012. – Vol. 19. – P. 227–238.
25. Multifractal Detrended Fluctuation Analysis of Sunspot Time Series / M.S. Movahed, G.R. Jafari, F. Ghasemi, S. Rahvar, M. Reza Rahimi Taber // Journal of Statistical Mechanics Theory and Experiment. – 2005. – Vol. 2, no. 02. – P02003.
26. Pedron I.T. Correlation and multifractality in climatological time series // Journal of Physics: Conference Series. – 2010. – Vol. 246. – P. 012034.
27. Vernède S., Ponsou L., Bouchaud J.-P. Turbulent Fracture Surfaces: A Footprint of Damage Percolation? // Phys. Rev. Lett. – 2015. – Vol. 114. – P. 215501.
28. Multifractal Detrended Fluctuation Analysis / J.W. Kantelhardt [et al.] // Physica A. – 2002. – Vol. 316. – P. 87–114.
29. Божокин С.В., Паршин Д.А. Фракталы и мультифракталы. – Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика". – 2001. – 128 с.
30. Любушин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с.
31. Любушин А.А. Тренды и ритмы синхронизации мультифрактальных параметров поля низкочастотных микросейсм // Физика Земли. – 2009. – № 5. – С. 15–28.

References

1. Bujlo S.I. Ob informativnosti metoda invariantov pri analize prorzhenykh potokov akusticheskoy emissii [On the informative value of the invariant method in the analysis of thinned acoustic emission fluxes]. *Defektoskopiya* (Defectoscopy), 2009, no. 11, pp. 41–45.
2. Bujlo S.I. Ob informativnosti metoda invariantov signalov akusticheskoy emissii v zadachah diagnostiki predrazrushayushchego sostoyaniya materialov [On the informativeness of the method of invariants of acoustic emission signals in problems of diagnostics of the pre-fracture state of materials]. *Defektoskopiya* (Defectoscopy), 2018, no. 4, pp. 18–23.
3. Arumugam V., Saravanakumar K., Santulli C. Damage characterization of stiffened glass-epoxy laminates under tensile loading with acoustic emission monitoring. *Composites Part B: Engineering*, 2018, V. 147, pp. 22–32.
4. Lomov S.V., Karahan M., Bogdanovich A.E., Verpoest I. Monitoring of acoustic emission damage during tensile loading of 3D woven carbon/epoxy composites. *Textile Research Journal*, 2014, V. 84, N. 13, pp. 1373–1384.
5. Lunegova E.M., Lobanov D.S., Strungar' E.M., Vil'deman V.E., Lyamin Yu.B. Primenenie metoda akusticheskoy emissii k issledovaniyu processa nakopleniya povrezhdenij funkcional'nogo keramicheskogo pokrytiya [Application of the acoustic emission method to the study of damage accumulation in a functional ceramic coating]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, no. 1, pp. 38–48.
6. Bujlo S.I., Orlov S.V. Korrelyatsionnyy analiz i metod invariantov signalov akusticheskoy emissii v diagnostike predrazrushayushchego sostoyaniya materialov [Correlation analysis and the method of invariants of acoustic emission signals in the diagnostics of the pre-fracture state of materials]. *Defektoskopiya* (Defectoscopy), 2014, no. 8, pp. 36–41.
7. Kuxsenko V.S. Diagnostika i prognozirovanie razrusheniya krupnomasshtabnykh ob"ektov [Diagnostics and prediction of the destruction of large-scale objects]. *Fizika tverdogo tela* (Solid state physics), 2005, vol. 47, no. 5, pp. 788–792.
8. Najmark O.B. Kollektivnye svoystva ansamblej defektov i nekotorye nelinejnye problemy plastichnosti i razrusheniya [Collective properties of ensembles of defects and some nonlinear problems of

plasticity and fracture]. *Fizicheskaya mezomekhanika* (Physical mesomechanics), 2003, V. 6, no. 4, pp. 45-72.

9. Najmark O.B., Bayandin YU.V., Leont'ev V.A., Pantelev I.A., Plekhov O.A. Strukturno-skejl'ingovye perekhody i nekotorye termodinamicheskie i kineticheskie effekty v materialah v ob'emnom submikro-(nano)-kristallicheskom sostoyanii [Structural-scaling transitions and some thermodynamic and kinetic effects in materials in a generalized submicro-(nano)-crystalline state]. *Fizicheskaya mezomekhanika* (Physical mesomechanics), 2009, V. 12, no. 4, pp. 47-60.

10. Pantelev I.A., Najmark O.B. Sovremennye tendencii v oblasti mekhaniki tektonicheskikh zemletryasenij [Current trends in the mechanics of tectonic earthquakes]. *Vestnik PNC* (Bulletin of the PSC), 2014, no. 3, pp. 44-62.

11. Linderov M., Segel C., Weidner A., Biermann H., Vinogradov A. Deformation mechanisms in austenitic TRIP/TWIP steels at room and elevated temperature investigated by acoustic emission and scanning electron microscopy. *Materials science and Engineering: A*, 2014, V. 597, pp. 183-193.

12. Vinogradov A., Danyuk A., Orlov D., Estrin Y. Deformation mechanisms underlying tension-compression asymmetry in magnesium alloy Zk60 revealed by acoustic emission monitoring. *Materials science and Engineering: A*, 2015, Vol. 621, pp. 243-251.

13. Matvienko YU.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V., Elizarov S.V. Kriterial'nye parametry dlya ocenki stepeni degradacii kompozitnykh materialov pri akustiko-emissionnom monitoringe izdelij [Criteria parameters for assessing the degree of degradation of composite materials during acoustic emission monitoring of products]// *Defektoskopiya* (Defectoscopy), 2018, no. 12, pp. 3-11.

14. Vasil'ev I.E., Matvienko YU.G., Pankov A.V., Kalinin A.G. Primenenie metodiki rannej diagnostiki povrezhdenij pri issledovanii aviacionnoj paneli [Application of the method of early damage diagnostics in the study of an aircraft panel]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* (Factory laboratory. Material diagnostics), 2019, Vol. 85, no. 6, pp. 53-63.

15. Li L., Lomov S.V., Yan X., Correlation of acoustic emission with optically observed damage in a glass/epoxy woven laminate under tensile loading. *Composite Structures*, 2014, Vol. 123, pp. 45-53.

16. Danyuk A.V. Identifikaciya deformacionnykh processov v kristallicheskih materialah s primeneniem sovremennykh metodov obrabotki signala akusticheskoy emissii [Identification of deformation processes in crystalline materials using modern methods of acoustic emission signal processing]: dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk, Tol'yatti, 2015, 156 p.

17. Zhurkov S.N. Kineticheskaya koncepciya prochnosti tverdykh tel [Kinetic concept of strength of solids]. *Vestnik AN. SSSR* (Bulletin of AS USSR). –1968, V. 3, pp. 46-52.

18. Kuksenko V.S. Diagnostika i prognozirovanie razrusheniya krupnomasshtabnykh ob'ektov [Diagnostics and prediction of the destruction of large-scale objects]. *Fizika tverdogo tela* (Solid state physics), 2005, V. 47, no. 5, pp. 788-792.

19. Kuksenko V.S., Mahmudov H.F., Manzhikov B.C. Koncentracionnaya model' razrusheniya tverdykh tel i prognozirovanie katastroficheskikh situacij krupnomasshtabnykh ob'ektov [Concentration model of destruction of solids and prediction of catastrophic situations of large-scale objects]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* (Physical and technical problems of mining), 2010, no. 4, pp. 29-40.

20. Pantelev I.A., Plekhov O.A., Najmark O.B. Model of geomechanics containing defects: collective effects of defects evolution during formation of potential earthquake foci. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2013, V. 4 (1), pp. 37–51.

21. Sun Y., Li H., Fan C., Yan B., Chen J., Yan Z., Sun Q. Review of a Specialty Fiber for Distributed Acoustic Sensing Technology. *Photonics*, 2022, V. 9, pp. 277-300.

22. Lyubushin A.A. Statistika vremennykh fragmentov nizkочастотnykh mikrosejsm: ih trendy i sinhronizaciya [Statistics of time fragments of low-frequency microseisms: their trends and synchronization]. *Fizika Zemli* (Physics of the Earth), 2010, V. 6, pp. 86-96.

23. Pantelev I.A., Bayandin YU.V., Najmark O.B. Prostranstvenno-vremennye zakonomernosti razvitiya povrezhdennosti pri deformirovani steklovolokonno go tkanogo laminata po dannym akusticheskoy emissii [Spatial and temporal patterns of damage development during deformation of a glass fiber woven laminate according to acoustic emission data]. *Fizicheskaya mezomekhanika* (Physical mesomechanics), 2016, V. 19, no. 4, pp. 64-73.

24. Biswas A., Zeleke T.B., Si B.C. Multifractal detrended fluctuation analysis in examining scaling properties of the spatial patterns of soil water storage. *Nonlin. Processes Geophys.*, 2012, V. 19, pp. 227–238.

25. Movahed M.S., Jafari G.R., Ghasemi F., Rahvar S., Reza Rahimi Taber M. Multifractal Detrended Fluctuation Analysis of Sunspot Time Series. *Journal of Statistical Mechanics Theory and Experiment*, 2005, V. 2, No. 02, P02003.

26. Pedron I.T. Correlation and multifractality in climatological time series. *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, V. 246, pp. 012034.

27. Vernè S., Ponsón L., Bouchaud J.-P. Turbulent Fracture Surfaces: A Footprint of Damage Percolation?. *Phys. Rev. Lett*, 2015, Vol. 114, pp. 215501.

28. Kantelhardt J.W. et al., Multifractal Detrended Fluctuation Analysis. *Physica A*, 2002, V. 316, pp. 87-114.

29. Bozhokin S.V., Parshin D.A. Fraktaly i multifraktaly [Fractals and multifractals], Izhevsk: NIC "Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika", 2001, 128 p.

30. Lyubushin A.A. Analiz dannykh sistem geofizicheskogo i ekologicheskogo monitoring [Analysis of data from geophysical and environmental monitoring systems]. M.: Nauka, 2007. 228 p.

31. Lyubushin A.A. Trendy i ritmy sinhronizacii multifraktal'nykh parametrov polya nizkочастотnykh mikrosejsm [Trends and synchronization rhythms of multifractal parameters of the field of low-frequency microseisms]. *Fizika Zemli* (Physics of the Earth), 2009, no. 5, pp. 15-28.

Финансирование. Публикация подготовлена в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020–2025 гг. при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение от 21 апреля № 075-15-2022-329).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Financing. This paper was prepared in the framework of the program for the creation and development of the world-class scientific center “Supersonic” for 2020–2025, with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (agreement No. 075-15-2022-329 dated April 21, 2022).

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.