

# Приборы и техника физического эксперимента

Научная статья

УДК 550.343

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18407>

## ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ДАННЫХ МИКРОДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ

**А. С. Лисовицкий<sup>1</sup> □, В. А. Чупин<sup>1</sup>, Л. Г. Московченко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва

Дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток, Россия;

<sup>2</sup> Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

□ lisovitckii.as@poi.dvo.ru

**Аннотация.** В работе исследованы изменения микродеформаций земной коры с использованием методов фрактального и мультифрактального анализов. Основное внимание уделено выявлению закономерностей изменения фрактальной размерности и степенных показателей сингулярности данных, полученных экспериментально, с помощью лазерных деформографов, в периоды, предшествующие землетрясениям. Установлено, что фрактальная размерность возрастает перед сейсмическими событиями, особенно согласно данным с лазерного деформографа, расположенного на скальном основании. Анализ продемонстрировал снижение амплитуды и степенных показателей сингулярности в активные периоды. Полученные результаты подтверждают перспективность применения фрактальных методов для мониторинга микродеформаций земной коры и предсказания землетрясений.

**Ключевые слова:** микродеформация земной коры, самоорганизованная критичность, фрактальный анализ, лазерный деформограф

**Финансирование:** Работа выполнена при финансовой поддержке госбюджетной темы ТОИ ДВО РАН (г. Владивосток, Россия) № 124022100074-9 «Изучение природы линейного и нелинейного взаимодействия геосферных полей переходных зон Мирового океана и их последствий».

**Для цитирования:** Лисовицкий А. С., Чупин В. А., Московченко Л. Г. Применение фрактальных методов для анализа данных микродеформаций земной коры // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2025. Т. 18. № 4. С. 101–113. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18407>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18407>

## APPLICATION OF FRACTAL METHODS FOR ANALYZING THE MICRODEFORMATION DATA OF THE EARTH'S CRUST

**A. S. Lisovitsky<sup>1</sup> □, V. A. Chupin<sup>1</sup>, L. G. Moskovchenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Vladivostok, Russia;

<sup>2</sup> Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

□ lisovitckii.as@poi.dvo.ru

**Abstract.** In the paper, the changes in microdeformations of the Earth's crust have been studied using methods of the fractal and multifractal analyses. Most attention was concentrated on revealing the regularities of the changes in the fractal dimension and singularity power

exponents of the data obtained experimentally using laser strainmeters during periods preceding earthquakes. The fractal dimension was found to increase before seismic events, especially according to the data from the laser strainmeter located on a bedrock base. Our analysis exhibited a decrease in the amplitude and singularity power exponents during active periods. The results obtained confirm the considerable promise of applying the fractal methods for monitoring the microdeformations of the Earth's crust and predicting earthquakes.

**Keywords:** microdeformation of the Earth's crust, self-organized criticality, fractal analysis, laser strainmeter

**Funding:** The research was supported by state budget theme “Study of the nature of linear and nonlinear interactions of geospheric fields of transition zones of the World Ocean and their consequences” (No. 124022100074-9) of V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Vladivostok, Russia).

**For citation:** Lisovitsky A. S., Chupin V. A., Moskovchenko L. G., Application of fractal methods for analyzing the microdeformation data of the Earth's crust, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 18 (4) (2025) 101–113. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18407>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

## Введение

Низкочастотные микросейсмические колебания служат ценным источником данных о геодинамических процессах в земной коре. Такие волнобразные движения представляют собой непрерывные низкоамплитудные колебаниями земной поверхности, вызванные атмосферными и океаническими процессами. Это и «тихие землетрясения», и медленные движения верхних слоев коры, а также значительные колебания атмосферного давления, циклоны, ураганы и воздействие океанских волн на береговую линию и шельф.

Земная кора служит средой, через которую распространяются сейсмические волны. Характеристики сигналов, распространяющихся в земной коре, изменяются в зависимости от ее состояния. Статистические параметры микросейсмического поля могут отражать изменения в ее свойствах, в том числе процессы, предшествующие сильным землетрясениям.

Одним из наиболее перспективных подходов к анализу таких систем следует считать применение фрактальных методов. Эти методы позволяют изучать структуру временных рядов, оценивать их сложность, а также выявлять скрытые закономерности, которые могут предшествовать катастрофическим событиям. Фрактальные характеристики, например фрактальная размерность и мультифрактальные спектры, отражают изменения в динамике системы и чувствительны к нарушениям ее равновесия.

Настоящее исследование посвящено применению методов фрактального и мультифрактального анализов для обработки показаний лазерного деформографа при изучении микродеформаций земной коры.

Основное внимание уделяется выявлению закономерностей динамики фрактальных характеристик, разработке критериев их прогностической способности и оценке их применимости для предсказания землетрясений.

Ключевым моментом данного подхода является использование данных микродеформаций земной коры, в отличие от большинства предшествующих исследований, основанных на анализе традиционных сейсмограмм или GPS-наблюдений.

Комбинированное использование метода мультифрактального детрендированного флюктуационного анализа (MF-DFA) и метода Хигuchi для оценки фрактальной размерности позволило детально проанализировать структуру временных рядов и выявить закономерности, предшествующие землетрясениям.

## Самоорганизованная критичность и фрактальность земной коры

Литосфера, состоящая из множества блоков, подвергается упругим напряжениям, поглощая дополнительную энергию из внешней среды и передавая ее между блоками. Когда уровень накопленной упругой энергии в литосферном блоке достигает критического значения, этот блок становится неустойчивым, что может приводить к его смещению или разрушению. Эта нестабильность характеризуется состоянием, в котором малые внешние воздействия могут вызвать значительные изменения, а система продолжает развиваться без достижения равновесия, оставаясь в состоянии, близком к критическому. Описанное поведение свойственно системам с самоорганизованной критичностью: такая система достигает состояния, в котором происходят масштабные процессы на различных уровнях, независимо от внешнего воздействия. При этом взаимодействия между элементами системы становятся чувствительными к малым изменениям, что приводит к появлению сложных и непредсказуемых событий.

Для объяснения этих явлений П. Бак, Ч. Танг и К. Визенфельд [1] предложили концепцию самоорганизованной критичности. Эта концепция описывает систему, которая в процессе своего развития приходит к состоянию, где ее поведение характеризуется фрактальностью, критической устойчивостью и масштабируемостью на различных уровнях [1].

Для дальнейшего изложения необходимо дать определения сейсмических периодов.

*Сейсмически активный период* – это временной интервал, включающий землетрясения с магнитудой, равной 7 и выше (по шкале Рихтера), а также несколько месяцев формирования состояния земной коры перед этим событием.

*Сейсмически спокойный период* – это временной интервал, в течение которого не происходят землетрясения с магнитудой выше 6 (при этом учитываются особенности расположения региона).

## Фрактальные методы анализа временных рядов

Одним из основных методов фрактального анализа геофизических рядов данных является метод фрактальных длин  $L$ . Существует несколько вариантов реализации алгоритма расчета  $L(n)$ , где  $n$  – количество вычислений.

В частности, метод Хигuchi подразумевает, что при рассмотрении ряда  $Y(j)$ , где  $j = 1, 2, \dots, N$ , для каждого  $L(n)$  вычисление выполняется  $n$  раз.

Длина кривой рассчитывается по точкам, относящимся к моментам

$$m, m + n, m + 2n,$$

где  $m = 1, 2, \dots, n$  ( $m$  – начальное смещение);

$$L_m(n) = \left( \sum_{i=1}^{\frac{N-m}{n}} Y(m+i \cdot n) - Y(m+(i-1) \cdot n) \right) \cdot \left[ \frac{N-1}{\frac{N-m}{n} \cdot n} \right], \quad (1)$$

где  $(N-1)/\{[(N-m)/n]n\}$  – нормализующий множитель;  $[(N-m)/n]$  – наибольшее целое значение, не превышающее отношение  $(N-m)/n$ .

Окончательно длина кривой определяется как арифметическое среднее по  $n$  значениям, каждое из которых есть  $L_m(n)$ .

Далее вычисляется среднее значение  $\langle L(n) \rangle$  по всем  $m$  и строится зависимость  $\log(L(n))$  от  $\log(n)$ . Затем эта зависимость аппроксимируется прямой линией методом наименьших квадратов.

Полученная прямая описывается уравнением

$$y = -D \cdot x + b, \quad (2)$$

где  $D$  – искомая фрактальная размерность.

Уравнение (2) мы получаем после линейной аппроксимации графика [2].

Анализ временных рядов также проводится с помощью метода MF-DFA, включающего несколько этапов [3].

*I этап.* Вычисляется флюктуационный профиль вида

$$Y(k) = \sum_{i=1}^k (z(i) - \bar{z}),$$

где  $z(i)$  — исходный временной ряд

*II этап.* Профиль  $Y(k)$  следует разделить на непересекающиеся сегменты  $s$  равной длины. Аналогичная процедура повторяется с противоположного конца для учета всего флюктуационного профиля.

*III этап.* Вычисляется локальный тренд для каждого из  $2N_s$  сегментов с помощью метода наименьших квадратов. Затем определяется дисперсия  $F^2(v, s)$ :

$$F^2(v, s) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \left\{ Y[(v-1) \cdot s + i] - y_v(i) \right\}^2$$

для каждого сегмента  $v$  ( $v = 1, 2, \dots, N_s$ ) и

$$F^2(v, s) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \left\{ Y[N - (v - N_s) \cdot s + i] - y_v(i) \right\}^2$$

для  $v = N_s + 1, N_s + 2, \dots, 2N_s$ , где  $y_v(i)$  — аппроксимирующий полином в сегменте  $v$ .

*IV этап.* Усреднение всех сегментов для получения  $q$ -го порядка функций флюктуаций

$$F_q(s) = \left\{ \frac{1}{S} \sum_{v=1}^{2N_s} [F^2(v, s)]^{\frac{q}{2}} \right\}^2, \quad (6)$$

где  $q$  — порядок момента флюктуационного анализа (может принимать только действительные значения).

Значение обобщенного показателя Хёрста  $h(0)$  соответствует логарифмическому среднему функции флюктуаций и не может быть вычислено напрямую из-за особенности в уравнении (6). В этом случае используется логарифмическая усредняющая процедура, которая имеет вид

$$F_0(s) = \exp \left[ \frac{1}{4N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} \ln F^2(v, s) \right].$$

*V этап.* Определение скейлингового поведения функций флюктуаций путем анализа графиков каждого из значений  $q$ , отложенных по осям  $F_q(s)$  и  $s$  в логарифмическом масштабе. Определяются основные мультифрактальные характеристики: обобщенный показатель Хёрста  $h(q)$ , отражающий степень долгосрочной коррелированности сигнала, и степенной показатель сингулярности данных  $\alpha(q)$ , характеризующий степень сингулярности сигнала.

$$F_q(s) \sim s^{h(q)}, \tau(q) = h(q) \cdot q - 1, \alpha(q) = d\tau(q)/dq.$$

### Экспериментальная установка

Для исследований использовались лазерные деформографы на основе интерферометра Майкельсона.

Принцип их работы следующий: луч лазера попадает в интерференционный узел. Там он разделяется с помощью полупрозрачного стекла на два луча: отраженный и прямой. Оба луча, отражаясь от плоских зеркал, возвращаются на полупрозрачное стекло и образуют интерференционную картину, изменения в которой регистрируются.

В работе используются лазерные деформографы однокоординатного типа, созданные на основе неравноплечего принципа.

Для исследования мы использовали экспериментальные данные, полученные во время четырех крупных землетрясений, чтобы изучить их фрактальные характеристики, которые могли бы указать на предстоящие сейсмические события. Эти данные представляют собой информацию, полученную с деформографов, измерявших микродеформации земной коры в течение четырех сейсмически активных периодов, во время которых произошло одно или несколько землетрясений.



Спокойным сейсмическим периодом, в течение которого не происходило землетрясений с магнитудой, превышающей 6 баллов, является временной интервал с 1 апреля по 31 июня 2017 года. Географическое расположение землетрясений и их ключевые характеристики представлены в таблице (см. также рис. 1).

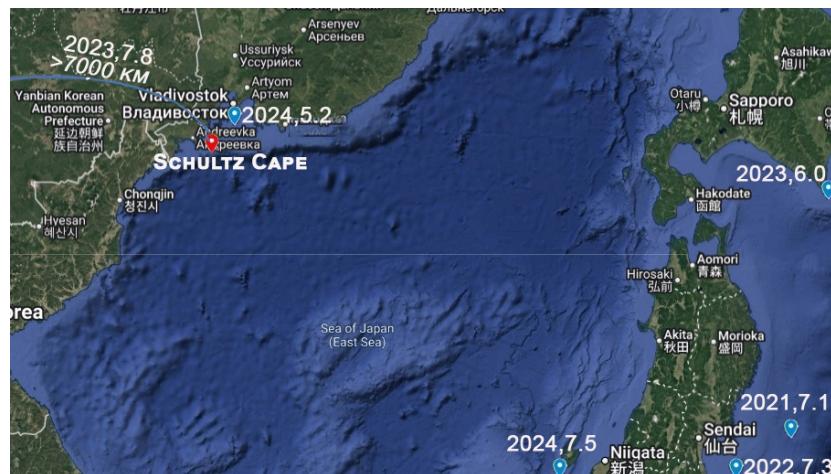


Рис. 1. Расположение, год события и магнитуда изучаемых землетрясений. Красная отметка указывает положение российского полигона «Мыс Шульца», где расположены лазерные деформографы, регистрирующие данные микродеформаций земной коры в периоды землетрясений

## Таблица

### Землетрясения, произошедшие в сейсмически активные периоды

Период	Дата	Расположение	Магнитуда, баллы	Глубина, км
01.10.2020 – 31.03.2021	20.03.2021	30 км от г. Исиномаки (Япония)	7,0	43
	13.02.2021	34 км от пос. Намиэ (Япония)	7,1	44
15.01 – 16.03.2022	21.01.2022	27 км от пос. Намиэ (Япония)	6,3	39
	16.03.2022	57 км от пос. Намиэ (Япония)	7,3	41
01.12.2022 – 15.02.2023	06.02.2023	г. Пазарджик (Турция)	7,8	10
	16.01.2023	о. Хоккайдо (Япония)	6,0	55
01.12.2023 – 29.02.2024	27.12.2023	залив Петра Великого (Россия, Приморский край)	5,2	410
	20.03.2021	п-ов Нoto (Япония)	7,5	10

На базе Тихоокеанского океанологического института имени В. И. Ильинова Дальневосточного отделения РАН (г. Владивосток, Россия) создана Морская экспериментальная база «Мыс Шульца» (см. рис. 1), где находится аппаратно-программный комплекс, который состоит из следующих основных структурных элементов.

I. Лазерный деформограф неравноплечего варианта классического типа, который предназначен для регистрации изменения смещений участка земной коры, равного длине измерительного плеча деформографа (52,5 м), в частотном диапазоне от  $10^{-3}$  Гц до 1 кГц с точностью до 0,01 нм.

II. Классический лазерный деформограф неравноплечего типа с длиной измерительно-го плеча 17,5 м.

III. Деформограф маятникового типа с длиной измерительного плеча 52,5 м, выполненный по неравноплечной схеме.

Описания других аппаратных элементов измерительного комплекса здесь не приведено, поскольку они второстепенны для данного исследования.

I и III деформографы расположены в направлении, близком к направлению север → юг, под углом 18° к меридиану, но размещены на разных параллельных площадках: I находится на песчаной поверхности, а III – на скальной. Деформограф II расположен перпендикулярно к I и III и установлен на суглинке большой плотности.

Экспериментальные данные в цифровой и аналоговой формах поступают в лабораторное помещение, где они подвергаются первичной обработке и сохраняются с созданием банка данных. Все системы, оснащенные четырьмя компьютерами, объединены в единую сеть и используют часы точного времени, обеспечивающие синхронизацию данных с точностью от 100 до 10 нс [4].

Анализ полученных данных проводился с использованием среды MatLab. В качестве выходных данных были построены графики, отражающие динамику фрактальных характеристик в исследуемые периоды. Анализ связи между искомой фрактальной размерностью  $D$  и функцией  $a(q)$ , характеризующей степень сингулярности сигнала, выходит за рамки настоящей работы, поэтому он не проведен и будет предметом дальнейших исследований.

### Результаты фрактального анализа

Анализ обработанных экспериментальных данных, полученных с деформографов I – III, привел нас к формулированию следующих результатов.

**Результаты по фрактальным переменным.** Во-первых, значения фрактальной размерности  $D$  повышаются перед землетрясениями; особенно ярко это выражено у данных с III деформографа (рис. 2).

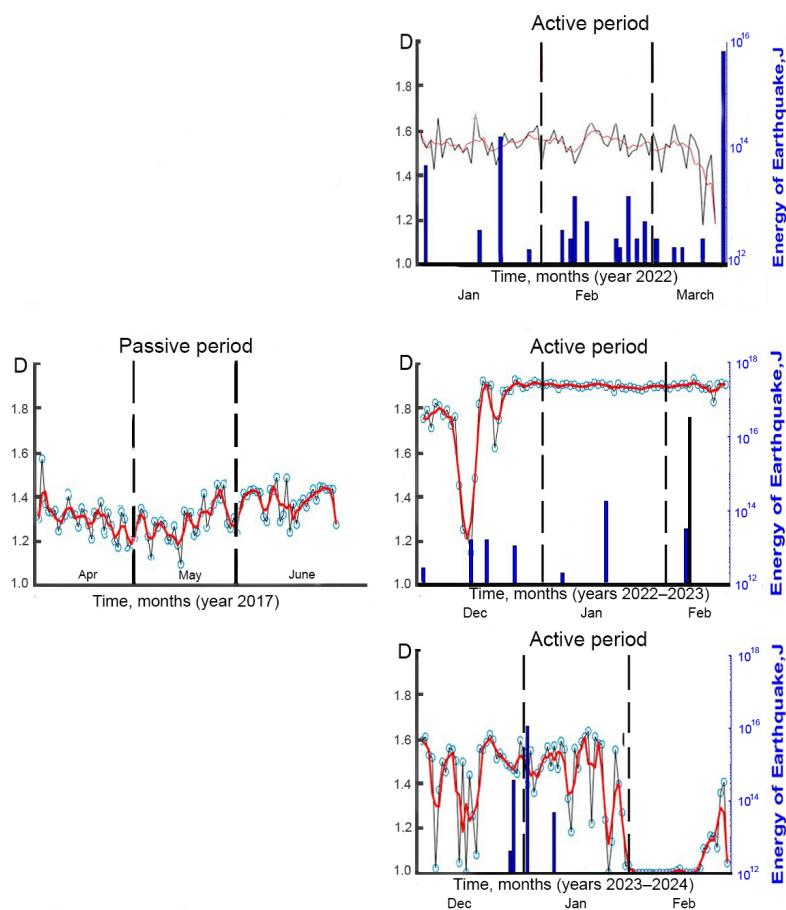
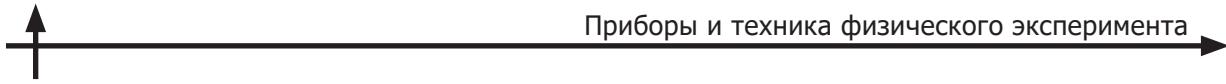


Рис. 2. Сравнение изменений фрактальной размерности  $D$  и энергии землетрясений (правые шкалы) по данным с III деформографа.

Слева – график спокойного периода, справа – графики активного.

Красные кривые относятся к данным, усредненным методом скользящего окна  
(его размер – 5 измерений)



Во-вторых, следует отметить поведение величины  $\Delta\alpha$  — разницы между максимальным и минимальным значениями показателя сингулярности. В сейсмически активные периоды наблюдается снижение разброса этой величины и снижение ее амплитуды, по сравнению со спокойными периодами, что делает графики более гладкими. В период с 01.12.2022 по 15.02.2023 гг. были зафиксированы значительные изменения амплитуды и высокие значения величин, полученных со II и III деформографов (рис. 3).

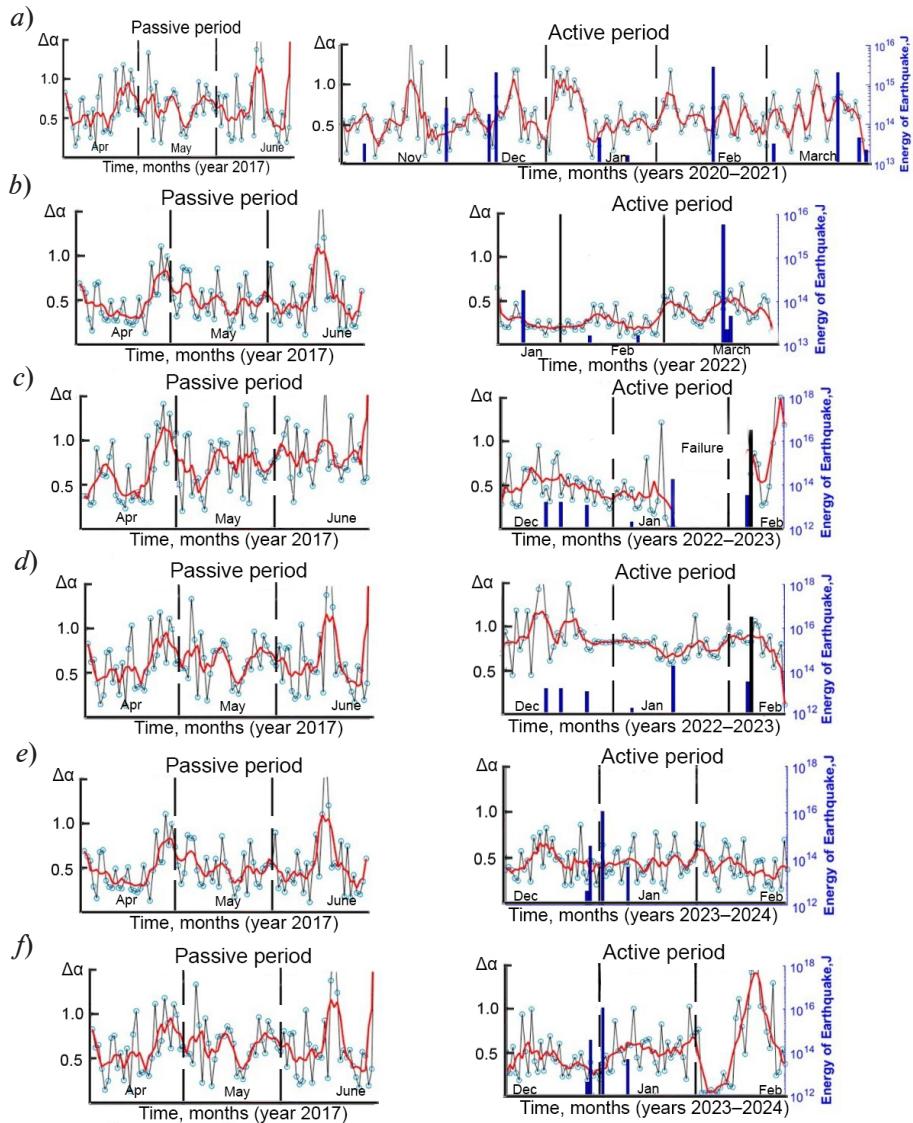


Рис. 3. Изменения ширины мультифрактального спектра  $\Delta\alpha$  по всем выбранным периодам (см. таблицу) и по данным с I (a, c), II (b, e) и III (d, f) деформографов.

Графики спокойных периодов представлены рядом для удобства сравнения

Анализ взаимосвязи фрактальной размерности  $D$  и ширины мультифрактального спектра  $\Delta\alpha$ , выполненный на основе экспериментальных данных, показал наличие лишь слабой линейной корреляции между этими параметрами (рис. 4). Аппроксимация зависимости  $D(\Delta\alpha)$  методом наименьших квадратов позволила оценить коэффициент детерминации  $R^2 \approx 0,30$ , что свидетельствует о том, что линейная модель объясняет лишь около 30% дисперсии фрактальной размерности за счет изменений ширины мультифрактального спектра. Такое наблюдение говорит о том, что изменения этих параметров отражают разные аспекты мультифрактальной структуры временных рядов микродеформаций и не всегда изменения происходят синхронно.

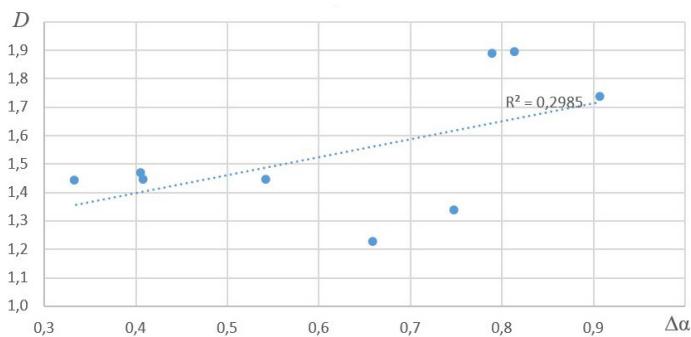


Рис. 4. Экспериментальная (точки) и аппроксимирующая (пунктирная прямая) зависимость фрактальной размерности  $D$  от ширины мультифрактального спектра  $\Delta\alpha$  ( $R^2$  – коэффициент детерминации)

**Результаты по данным с деформографов.** I деформограф: наблюдаются небольшие различия в поведении всех исследуемых параметров относительно спокойного периода. Средние величины параметров различаются незначительно. Однако в спокойный период наблюдается больший разброс значений параметров.

II деформограф: изменения поведения параметров выражены ярче, особенно показателя фрактальной размерности  $D$  в периоды с 01.12.2022 по 15.02.2023 и с 01.12.2023 по 29.02.2024 гг.

III деформограф: происходят значительные изменения, особенно в период с 01.12.2022 по 15.02.2023 гг. (рис. 5).

**Результаты по выбранным периодам.** В течение сейсмически активных периодов с 01.10.2020 по 31.03.2021 гг. и с 15.01 по 16.03.2022 г. произошло по два близко расположенных землетрясения значительной магнитуды (см. таблицу). Следует отметить близкие значения показателей фрактальной размерности  $D$  и ширины мультифрактального спектра  $\Delta\alpha$  в эти периоды (рис. 6).

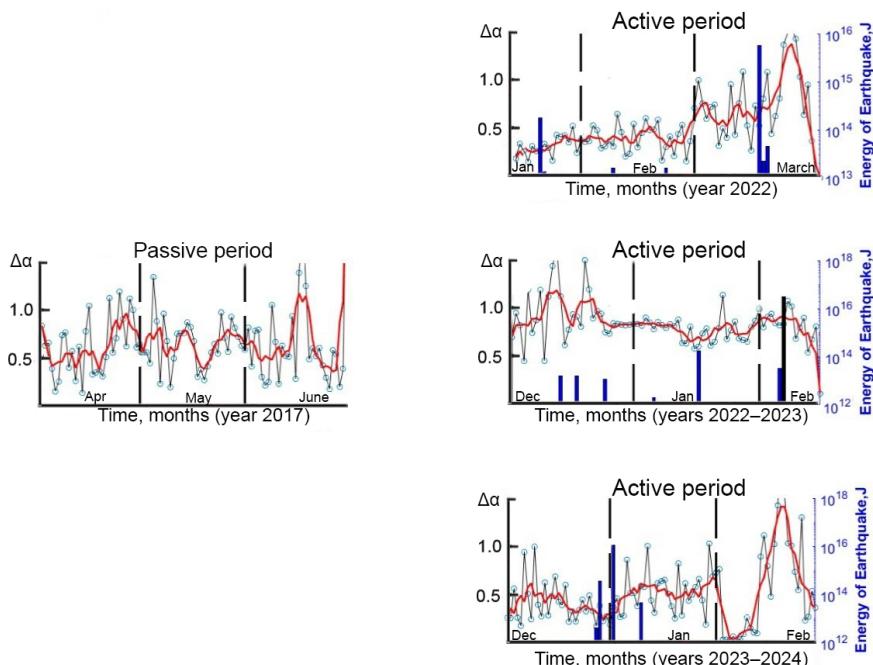


Рис. 5. Изменения ширины мультифрактального спектра  $\Delta\alpha$ , полученные по данным с III деформографа

В-третьих, величина минимального значения показателя сингулярности  $\alpha_{\min}$  демонстрирует падение в периоды с 01.12.2022 по 15.02.2023 гг. и с 01.12.2023 по 29.02.2024 гг. С 15.01 по 16.03.2022 г.  $\alpha_{\min}$  показывает разное поведение для данных с трех деформографов, аналогично рассчитанному для периода с 01.10.2020 по 31.03.2021 гг., хотя эта разница выражена не столь ярко.

В-четвертых, величина максимального значения степени сингулярности  $\alpha_{\max}$  ведет себя по-разному для каждого деформографа.

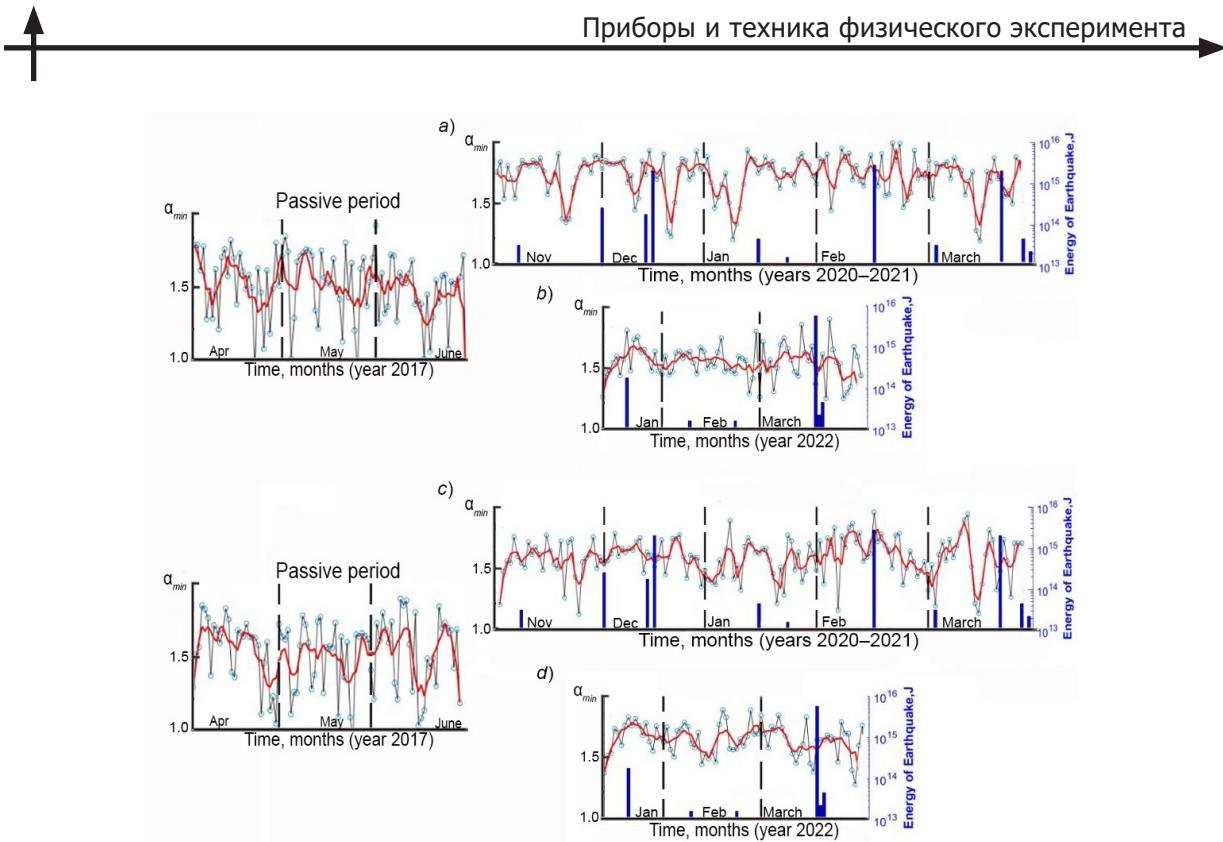


Рис. 6. Изменения  $\alpha_{min}$  по данным I (a, b) и II (c, d) деформографов в течение двух периодов: 01.10.2020 – 31.03.2021 и 15.01 – 16.03.2022

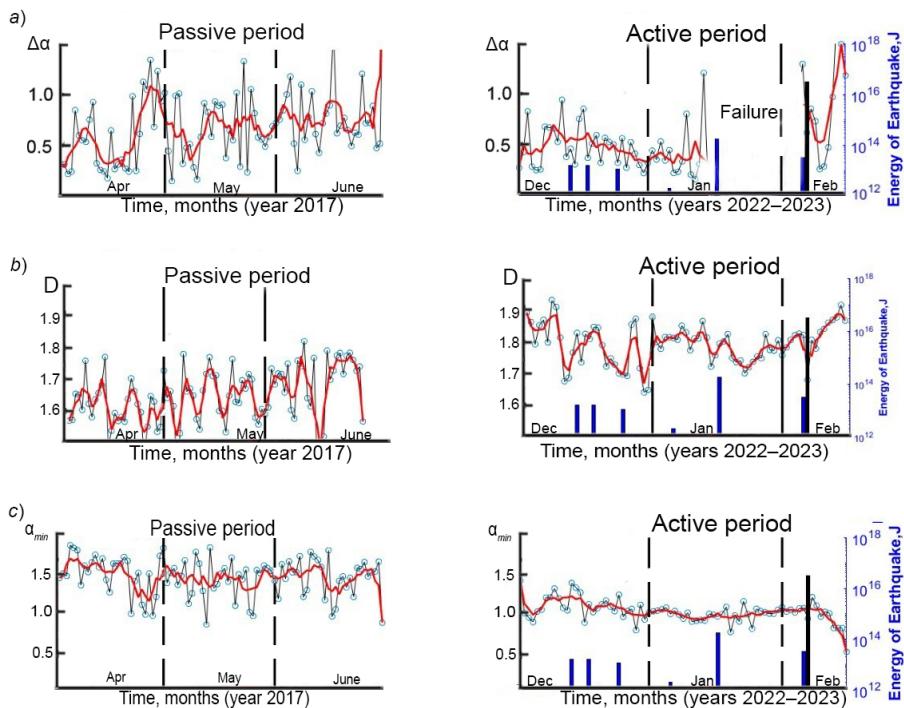


Рис. 7. Изменение параметров  $\Delta\alpha$ ,  $\alpha_{min}$  и  $D$  с 01.12.2022 по 15.02.2023 гг. по данным с I (a), II (b) и III (c) деформографов

Функция  $\alpha(q)$  вычислялась в диапазоне значений  $q$  от  $-5$  до  $+5$ , с шагом  $0,5$ . Выбор этого диапазона позволил учесть как сильные, так и слабые флюктуации и выявить особенности мультифрактальной структуры временных рядов.

Временной период с 01.12.2022 по 15.02.2023 гг. характеризуется существенным изменением величин фрактальных характеристик, по сравнению со спокойным периодом и другими активными периодами. Данный факт сложно объяснить землетрясениями этого периода, которые отмечены в таблице. Предполагается, что на данные с деформографов повлияли другие сейсмические события (рис. 7).

Сейсмически активный период с 01.12.2023 по 29.02.2024 гг. интересен тем обстоятельством, что два землетрясения произошли на небольших расстояниях, близких от деформографов. Отметим, что данные, полученные во время этого периода по всем деформографам, демонстрируют одни и те же закономерности поведения.

В заключение остановимся подробнее на поведении фрактальной размерности  $D$ . В целом наблюдается тенденция к повышению фрактальной размерности  $D$  в те периоды времени, когда землетрясения «созревают». Однако точность определения величины  $D$  зависит от степени разброса точек на графиках логарифмического масштаба, которая не получила в данной работе явной оценки.

Для III деформографа (был установлен на скальном основании) изменения величины  $D$  выражены ярче: в активные периоды его значения лежат в диапазоне  $1,0 < D < 1,7$ , тогда как в спокойные периоды – в диапазоне  $1,0 < D < 1,4$ . Пики на кривых временной динамики величины  $D$ , расположенные до значения  $D \approx 1,6$  и выше, могут служить индикаторами нелинейности и возможной готовности системы к качественному переходу. Значения  $D$ , близкие к единице, могут указывать на завершение текущего тренда, но такая интерпретация требует дополнительной проверки.

На рис. 8 представлена зависимость показателя  $D$  от месяца исследуемого периода в хронологическом порядке. Видно, что величина  $D$  демонстрирует разброс в пределах доверительного интервала. Представленные результаты подтверждают устойчивость изменений  $D$  в разные сейсмические периоды.

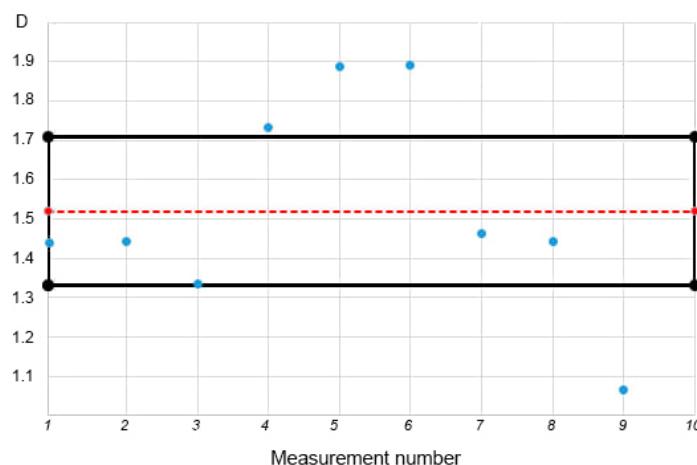


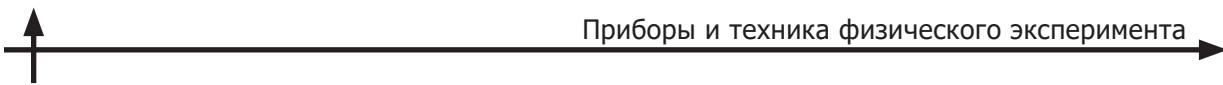
Рис. 8. Результат оценки доверительного интервала значений параметра  $D$  по среднемесячным данным III деформографа.

Черные горизонтальные линии обозначают границы 95%-го доверительного интервала для оценки  $D$ . Красная пунктирная линия соответствует номинальному (ожидаемому) значению  $D = 1,51$ .

### Заключение

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. III деформограф, расположенный на скальном основании, продемонстрировал более выраженные изменения фрактальных параметров, чем деформографы на песчаной поверхности, так как демпфирование снижает чувствительность к малым колебаниям.



2. Снижение значений показателей сингулярности  $\Delta\alpha(q)$  и их разброса во время сейсмически активных периодов наблюдалось на всех деформографах. Этот результат может свидетельствовать о перестройке структуры земной коры, однако точность определения параметра  $\Delta\alpha(q)$  также зависит от разброса исходных данных, который не был детально проанализирован в данной работе.

3. В периоды с 01.10.2020 по 31.03.2021 гг. и с 15.01 по 16.03.2022 г., когда произошли землетрясения в пос. Намиэ (Япония), все деформографы показали схожие изменения фрактальных характеристик. Эти изменения могут служить индикаторами подготовки сейсмических событий, однако их количественная интерпретация требует дальнейшего исследования.

4. За период с 01.12.2022 по 15.02.2023 гг. данные всех деформографов продемонстрировали аномальное поведение фрактальных характеристик, что позволяет предположить влияние землетрясения, произошедшего в то же время в Турции, или другого сейсмического события. Указанный период требует дальнейшего изучения для выявления возможных корреляций и уточнения природы выявленных аномалий.

Постоянная сейсмическая активность, не утихающая в ближней зоне размещения деформографов, затрудняет выделение полностью спокойных периодов, и может влиять на показания деформографов, а следовательно, и на интерпретацию результатов.

Представленные в настоящей работе выводы свидетельствуют о потенциальной прогностической значимости таких величин как фрактальная размерность  $D$  и ширина мультифрактального спектра  $\Delta\alpha(q)$ . Однако эти выводы носят предварительный характер и нуждаются в дополнительном подтверждении.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bak P., Tang Ch., Wiesenfeld K. Self-organized criticality // Physical Review A. 1988. Vol. 38. No. 1. Pp. 364–374.
2. Higuchi T. Relationship between the fractal dimension and the power law index for a time series: A numerical investigation // Physica D: Nonlinear Phenomena. 1990. Vol. 46. No. 2. Pp. 254–264.
3. Kantelhard J. W., Zschiegner S. A., Koscielny-Bunde E., Havlin S., Bunde A., Stanley H. E. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2002. Vol. 316. No. 1–4. Pp. 87–114.
4. Долгих Г. И., Привалов В. Е. Лазерная физика. Фундаментальные и прикладные исследования. Владивосток: Изд. ООО «Рея», 2016. 352 с.
5. Любушин А. А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с.
6. Насонов А. Н., Цветков И. В., Жогин И. М., Кульев В. В., Репина Е. М., Кирносов С. Л., Звягинцева А. В., Базарский О. В. Фракталы в науках о Земле. Воронеж: Типография ООО «Ковчег», 2018. 82 с.
7. Филатов Д. М., Любушин А. А. Оценка сейсмической опасности японских островов на основе фрактального анализа временных рядов GPS // Физика Земли, 2017. № 4. С. 55–66.
8. Liehr L., Massopust P. On the mathematical validity of the Higuchi method // Physica D: Nonlinear Phenomena. 2020. Vol. 402. 15 January. P. 132265.
9. Mohamed H., Henares J., Peláez J., Damerdji Y. Fractal analysis of earthquake sequences in the Ibero-Maghrebian region // Pure and Applied Geophysics. 2019. Vol. 176. No. 4. Pp. 1397–1416.

## REFERENCES

1. Bak P., Tang Ch., Wiesenfeld K., Self-organized criticality, Phys. Rev. A. 38 (1) (1988) 364–374.
2. Higuchi T., Relationship between the fractal dimension and the power law index for a time series: A numerical investigation, Physica D. 46 (2) (1990) 254–264.
3. Kantelhard J. W., Zschiegner S. A., Koscielny-Bunde E., et al., Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series, Physica A. 316 (1–4) (2002) 87–114.
4. Dolgikh G. I., Privalov V. E., Lazernaya fizika. Fundamentalnye i prikladnye issledovaniya [Laser physics. Basic and applied research], Reya Publishing, Vladivostok, 2016 (in Russian).

5. Lyubushin A. A., Analiz dannykh sistem geofizicheskogo i ekologicheskogo monitoringa [Analysis of data from geophysical and environmental monitoring systems], Nauka Publishing, Moscow, 2007 (in Russian).
6. Nasonov A. N., Tsvetkov I. V., Zhogin I. M., et al., Fraktaly v naukakh o Zemle [Fractals in the Earth's sciences], "Kovcheg" Publishing, Voronezh, 2018 (in Russian).
7. Filatov D. M., Lyubushin A. A., Assessment of seismic hazard of the Japanese islands based on fractal analysis of GPS time series, Izv. Phys. Solid Earth. 53 (4) (2017) 545–555.
8. Liehr L., Massopust P., On the mathematical validity of the Higuchi method, Phys. D. 402 (15 Jan) (2020) 132265.
9. Mohamed H., Henares J., Peláez J., Damerdji Y., Fractal analysis of earthquake sequences in the Ibero-Maghrebian region, Pure Appl. Geophys. 176 (4) (2019) 1397–1416.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ЛИСОВИЦКИЙ Артем Сергеевич** – аспирант лаборатории физики геосфер Тихоокеанского океанологического института имени В. И. Ильичёва Дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток, Россия.

690041, Россия, г. Владивосток, Балтийская ул., 43  
lisovitckii.as@poi.dvo.ru  
ORCID: 0009-0006-5255-5894

**ЧУПИН Владимир Александрович** – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физики геосфер Тихоокеанского океанологического института им. В. И. Ильичёва Дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток, Россия.

690041, Россия, г. Владивосток, Балтийская ул., 43  
chupin@poi.dvo.ru  
ORCID: 0000-0001-5103-8138

**МОСКОВЧЕНКО Лариса Григорьевна** – кандидат физико-математических наук, доцент департамента теоретической физики и интеллектуальных технологий Дальневосточного федерального университета, г. Владивосток, Россия.

690950, Россия, г. Владивосток, ул. Суханова, 8  
moskovchenko.lg@dvfu.ru  
ORCID: 0000-0003-2621-0594

## THE AUTHORS

**LISOVITSKY Artem S.**  
*V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute*  
43 Baltiyskaya St., Vladivostok, 690041, Russia  
lisovitckii.as@poi.dvo.ru  
ORCID: 0009-0006-5255-5894

**CHUPIN Vladimir A.**  
*V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute*  
43 Baltiyskaya St., Vladivostok, 690041, Russia  
chupin@poi.dvo.ru  
ORCID: 0000-0001-5103-8138



**MOSKOVCHENKO Larisa G.**

*Far Eastern Federal University*

8 Suhnov St., Vladivostok, 690950, Russia

[moskovchenko.lg@dvfu.ru](mailto:moskovchenko.lg@dvfu.ru)

ORCID: 0000-0003-2621-0594

*Статья поступила в редакцию 28.03.2025. Одобрена после рецензирования 19.05.2025.  
Принята 26.05.2025.*

*Received 28.03.2025. Approved after reviewing 19.05.2025. Accepted 26.05.2025.*