

**ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ МЕТОДОВ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ НАУКИ****\*\*\***

УДК 550.34.01+550.348.436

© Стаховский И. Р., 2022

**СТРУКТУРНАЯ ПЕРЕСТРОЙКА МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫХ  
РАСПРЕДЕЛЕНИЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ  
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ**Стаховский И. Р.<sup>a,1</sup><sup>a</sup> Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, 123242, Россия

Пространственные распределения сейсмической энергии (сейсмоэнергетические поля) в фокальных областях двух сильных землетрясений — землетрясения Пойнт-Маккензи на Аляске ( $M = 7.1$ ) и землетрясения в Эгейском море ( $M \approx 7$ ) исследованы методами мультифрактального анализа. Показано, что перед главными толчками этих событий происходило значительное расширение и смена формы асимметрии спектров сингулярностей сейсмоэнергетических полей. Структурные перестройки сейсмоэнергетических полей объясняются ростом энергетических флуктуаций при переходе сейсмогенерирующих систем в сильно неравновесное состояние. Эффект расширения  $f(a)$ -спектров сейсмоэнергетических полей перед сильными землетрясениями может быть использован в задачах мониторинга текущего состояния сейсмогенерирующей среды.

*Ключевые слова:* мультифрактальная мера, спектр сингулярностей, сейсмическая энергия, землетрясение, расширение  $f(a)$ -спектра, асимметрия  $f(a)$ -спектра.

**STRUCTURAL REARRANGEMENT OF SEISMIC ENERGY MULTIFRACTAL  
DISTRIBUTIONS BEFORE STRONG EARTHQUAKES**Stakhovsky I. R.<sup>a,1</sup><sup>a</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242, Russia

The spatial distributions of seismic energy (seismic energy fields) in the focal zones of two strong earthquakes — the earthquake of Point MacKenzie, Alaska ( $M = 7.1$ ) and the October 30, 2020 Aegean Sea Earthquake ( $M \approx 7$ ) — have been investigated by the multifractal analysis methods. It is shown that the spectra of singularity of the seismic energy fields had undergone the significant widening and changing asymmetry before the main shocks of this events. The structural rearrangements of seismic energy fields may be explained by the increase of energetic fluctuations under the seismogenerating system transitions to strong nonequilibrium state. The effect of seismic energy fields  $f(a)$ -spectra widening before strong earthquakes may be used in the problems of seismogenerating media current state monitoring.

*Keywords:* multifractal measure, singularity spectrum, seismic energy, earthquake,  $f(a)$ -spectrum widening,  $f(a)$ -spectrum asymmetry.

PACS: 91.30.-f, 91.30.Px

DOI: 10.17238/issn2226-8812.2022.4.91-99

---

<sup>1</sup>E-mail: stakhov@ifz.ru

## Введение

Известно, что сложные системы в условиях неравновесности подвержены процессам самоорганизации, приводящим к спонтанному возникновению в них масштабных инвариантных (фрактальных) диссипативных структур за счет энергии флуктуаций [1]. В сильно неравновесном состоянии рост флуктуаций становится причиной последующего разрушения системы. В задачах по прогнозированию разрушения поиск индикаторов перехода системы в сильно неравновесное состояние, предшествующее разрушению, составляет основу анализа эволюции системы, включающего как обнаружение самого факта появления в системе процессов подготовки разрушения, так и нахождение методов их количественного описания. Переход системы в сильно неравновесное состояние всегда сопровождается ее структурной перестройкой, поэтому математическим аппаратом, используемым для обнаружения этого перехода, обычно становится структурный анализ, прежде всего — мультифрактальный [2, 3].

Примером сложных систем, претерпевающих переходы из слабо неравновесного состояния в сильно неравновесное и последующее разрушение, являются сейсмогенерирующие системы. Мультифрактальная организация пространственных распределений сейсмических эпицентров (диссипативных структур сейсмогенерирующих систем) в настоящее время интенсивно изучается [4–6]. В работе [7] было обнаружено, что перед сильными землетрясениями в их фокальных областях рост флуктуаций сейсмической активности приводит к характерному кумулятивному эффекту — расширению  $f(a)$ -спектров сейсмических полей. Термин «сейсмическое поле» используется здесь для краткого обозначения мультифрактальной меры, моделирующей пространственное распределение эпицентров землетрясений. Отметим, что в эффекте расширения  $f(a)$ -спектров сейсмических полей тектонические аспекты сейсмогенерирующих систем оказываются несущественными, в сильно неравновесном состоянии сейсмогенерирующие системы подчиняются общим законам эволюции, характерным для неравновесных систем любой физической природы.

Эффект расширения  $f(a)$ -спектра сейсмического поля предшествует главному толчку сильного землетрясения и может рассматриваться как метод мониторинга текущего состояния сейсмогенерирующей среды, однако для его аккуратного определения требуется большой объем сейсмических данных. При сегодняшней представительности сейсмических данных  $f(a)$ -спектры сейсмических полей чаще всего просто не удается построить полностью. В данной статье показано, что период перехода сейсмогенерирующей системы в сильно неравновесное состояние можно обнаружить и в условиях нехватки данных, заменив анализ пространственного распределения сейсмических эпицентров на анализ пространственного распределения сейсмической энергии. В дальнейшем мультифрактальные меры, моделирующие пространственное распределение сейсмической энергии, будут обозначаться термином «сейсмоэнергетические поля». В работе [8] эффект расширения  $f(a)$ -спектра сейсмоэнергетического поля описан впервые, настоящая статья продолжает это исследование.

В данной работе исследован эффект расширения  $f(a)$ -спектров сейсмоэнергетических полей перед двумя сильными землетрясениями: землетрясением Пойнт-Маккензи (южное побережье Аляски, 2018,  $M = 7.1$ ) и землетрясением в Эгейском море (морской пролив между греческим островом Самос и Турцией, 2020,  $M = 7.0$ ). В обоих случаях расчеты проводились по сейсмическим данным, собранным с полигонов размером  $100 \times 100$  км, центры которых совпадали с эпицентрами указанных сильных землетрясений. Использовались данные за последние 5 лет перед главными толчками этих событий. Данные разделялись на две примерно равные выборки, для каждой строились  $f(a)$ -спектры сейсмоэнергетических полей, после чего проводилось их сравнение. Показано, что эффект расширения  $f(a)$ -спектров сейсмоэнергетических полей предвещал оба землетрясения, что позволяет рассматривать этот эффект как закономерный и повторяющийся признак подготовки сильных землетрясений.

## 1. Техника счета

Магнитуды сейсмических событий, систематизируемых в каталогах, связаны с энергией сейсмических волн эмпирическими зависимостями, среди которых одной из популярных является формула Бата [9]:

$$\lg E = 5.24 + 1.44M \quad (1.1)$$

где  $E$  — сейсмическая энергия (Дж),  $M$  — магнитуда по поверхностным волнам. Известен ряд альтернативных формул связи магнитуд с энергиями, которые приводят к несколько различающимся абсолютным значениям энергий, однако в дальнейшем будут вычисляться параметры только энергетического скейлинга, не зависящего от абсолютных значений энергий.

В ходе расчетов исследуемый полигон (исследуемая система) покрывался двумерной ренормируемой масштабной сеткой не пересекающихся квадратных боксов. Боксы сетки нумеровались индексом  $i$  ( $i = 1, 2, 3 \dots$ ). Пространственное распределение сейсмической энергии моделировалось мерой  $P$ , содержание которой в  $i$ -том боксе сетки  $p_i$  оценивалось с помощью нормировки:

$$p_i = E_i/E_0 \quad (1.2)$$

где  $E_i$  — суммарная величина сейсмической энергии в  $i$ -том боксе, т.е. сумма сейсмических энергий, определенных в соответствии с выражением (1.1), для всех событий, попадающих в  $i$ -тый бокс,  $E_0$  — суммарная величина сейсмической энергии всех событий в выборке,  $i$  — порядковый индекс бокса.

Теория мультифрактального анализа изложена во многих первоисточниках [2, 3]. В работе [10] показано, что спектр сингулярностей мультифрактальной меры по эмпирическим данным может быть построен без обычно используемых в таких случаях сглаживающих процедур преобразования Лежандра, т.е. вычислен напрямую с помощью соотношений:

$$a(q) = \lim_{r \rightarrow 0} (\ln r)^{-1} \sum_{i=1}^N \tilde{p}_i(q, r) \ln p_i(r), \quad (1.3)$$

$$f(a(q)) = \lim_{r \rightarrow 0} (\ln r)^{-1} \sum_{i=1}^N \tilde{p}_i(q, r) \ln \tilde{p}_i(q, r), \quad (1.4)$$

где

$$\tilde{p}_i(q, r) = p_i^q(r) / \sum_j p_j^q(r). \quad (1.5)$$

Здесь  $q$  — порядок момента меры,  $r$  — размер бокса сетки (масштаб),  $N$  — общее число непустых боксов сетки,  $a$  — индекс сингулярности,  $f(a)$  — спектр сингулярностей. В условиях нехватки данных уравнения (1.3)-(1.4) позволяют построить  $f(a)$ -спектр мультифрактального поля с наименьшими погрешностями, соответственно, они и использовались в данной работе. Пределы в (1.3)-(1.4) оценивались как коэффициенты линейных регрессий  $\sum_{i=1}^N \tilde{p}_i(q, r) \ln p_i(r)$  и  $\sum_{i=1}^N \tilde{p}_i(q, r) \ln \tilde{p}_i(q, r)$  на  $\ln r$ . Изменения масштаба  $r$  ( $r = r_1, r_2, r_3, \dots$ ) осуществлялись путем ренормирования сетки. В численных расчетах значения  $q$  перебирались дискретно с шагом  $\Delta q = 0.15$  в диапазоне значений  $-30 \leq q \leq 30$ .

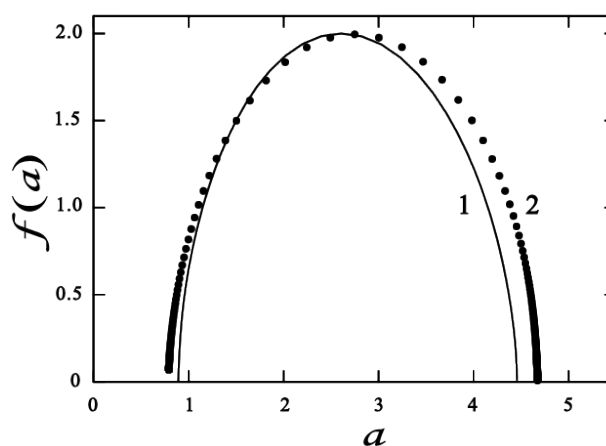
## 2. Землетрясение Пойнт МакКензи 30.11.2018 ( $M = 7.1$ )

Землетрясение Пойнт-Маккензи (Point MacKenzie) произошло в 17:29:29 (UTC) 30.11.2018 на Аляске на противоположном от Анкориджа берегу бухты Кинк Арм (Kink Arm). Эпицентр имел координаты  $61.34^\circ N$ ,  $149.95^\circ W$ . Магнитуда землетрясения составила  $M = 7.1$ , глубина гипоцентра

$H = 46.7$  км [11]. Землетрясение произошло в пустынной местности, поэтому не сопровождалось значительным ущербом для населения.

В расчетах использовались данные каталога USGS (United States Geological Survey) [12] за период 01.07.2013 ÷ 30.11.2018. Данные собраны сейсмической сетью Аляски (Alaska's Seismic Network), обладающей 280-тью сейсмостанциями по всему полуострову, причем 6 сейсмостанций этой сети находятся непосредственно на территории исследованного полигона. Порог представительности данных USGS-каталога для этой территории оценивается как  $M \approx 1.5$ . Используемые в расчетах сейсмические данные относились к магнитудному диапазону  $1.5 \leq M \leq 4.5$ . Заметим, что события с  $M \geq 5$  не наблюдались на территории полигона за весь инструментальный период.

Данные USGS-каталога за указанный период были разделены на две выборки: первая выборка охватывала период 01.07.2013 ÷ 07.02.2016 и содержала 1313 событий, вторая выборка охватывала период 08.02.2016 ÷ 30.11.2018 и содержала 1312 событий (само землетрясение Пойнт-Маккензи в выборку не входило). Вторая выборка характеризовала сейсмический процесс, непосредственно предшествовавший землетрясению Пойнт-Маккензи, т.е. сейсмический процесс, происходивший в сильно неравновесной среде и закончившийся главным толчком землетрясения с  $M = 7.1$ , которое можно интерпретировать как глобальное разрушение исследуемой системы. Первая же выборка характеризовала сейсмический процесс, происходивший в этой же системе ранее в установившемся режиме (при слабо неравновесном состоянии среды). Спектры сингулярностей сейсмоэнергетических полей, построенных по данным обеих выборок, представлены на рис. 1.



**Рис. 1.** Спектры сингулярностей сейсмоэнергетических полей, построенных по данным о слабой сейсмичности перед землетрясением Пойнт-Маккензи. График 1 (сплошная линия) —  $f(a)$ -спектр по данным первой выборки, график 2 (точки) —  $f(a)$ -спектр по данным второй выборки.

Как видно на рис. 1,  $f(a)$ -спектры сейсмоэнергетических полей, построенных по данным 1-й и 2-й выборок, существенно различны. Перед главным толчком землетрясения Пойнт-Маккензи рост флуктуаций сейсмической активности привел к расширению  $f(a)$ -спектра сейсмоэнергетического поля. Мультифрактальное распределение сейсмической энергии в очаговой области этого землетрясения испытало значительную перестройку при переходе среды в сильно неравновесное состояние, предшествовавшее разрушению исследуемой сейсмогенерирующей системы.

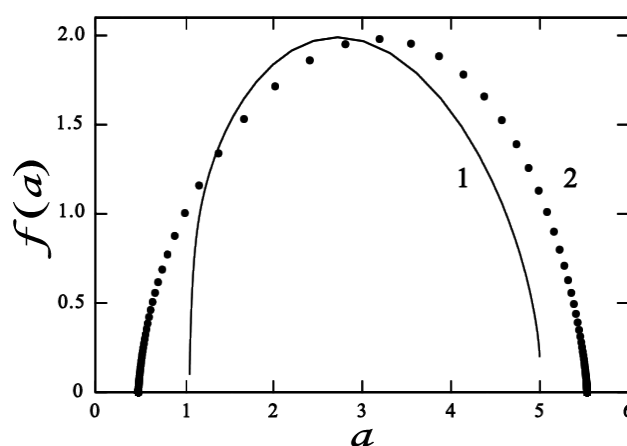
### 3. Землетрясение в Эгейском море 30.10.2020 ( $M \approx 7.0$ )

Землетрясение в Эгейском море произошло в 11:51:27 (UTC) 30.10.2020 в области так называемой Эллинской дуги. Оно имело магнитуду  $M \approx 7.0$  и глубину гипоцентра  $H \approx 20$  км. Эпицентр находился в морском проливе между греческим островом Самос и западным побережьем Турции и имел координаты  $26.78^\circ N$ ,  $37.89^\circ E$ . Землетрясение сопровождалось многочисленными жертвами, разрушениями зданий, а также возникновением цунами [13].

Территория исследованного в этом случае полигона относится к зоне непосредственного контроля двух сейсмических сетей: Единой сейсмологической сети Греции (Hellenic Unified Seismological Network) и Национальной сейсмической сети Турции (Turkish National Seismic Network). Несколько сейсмостанций обеих сетей расположены непосредственно на территории полигона. Обе сети передают данные в Международный сейсмологический центр (International Seismological Centre, ISC) в Великобритании, где они (вместе с данными других сейсмических сетей) систематизируются в ISC-каталоге [14].

В расчетах использованы данные ISC-каталога о сейсмических событиях, предшествовавших Эгейскому землетрясению 30.10.2020, за период 01.08.2015 ÷ 30.10.2020 в границах исследованного полигона. В течение этого периода территория полигона характеризовалась слабой сейсмичностью с максимальной магнитудой событий  $M = 4.7$ . Проведенные проверки показали хорошее соответствие данных ISC-каталога в пределах полигона закону повторяемости землетрясений (закону Гутенберга-Рихтера) в диапазоне магнитуд  $1.5 \leq M \leq 4.7$ , более слабые события отбраковывались как неподставительные.

Использованные в расчетах данные ISC-каталога были разделены на две выборки: 1-я выборка охватывала период времени с 01.08.2015 по 31.12.2017 и содержала 1133 события, 2-я выборка охватывала период времени с 01.01.2018 по 30.10.2020 и содержала 1153 события. Таким образом, вторая выборка характеризовала сейсмический процесс, непосредственно предшествовавший главному толчку Эгейского землетрясения 30.10.2020, т.е. процесс, происходивший при сильно неравновесном состоянии среды (само Эгейское землетрясение в выборку не входило). Первая же выборка характеризовала сейсмический процесс за более ранний период, когда исследуемая сейсмоэнергетическая система находилась в слабо неравновесном состоянии. Спектры сингулярностей сейсмоэнергетических полей, построенных по данным обеих выборок, представлены на рис. 2.



**Рис. 2.** Спектры сингулярностей сейсмоэнергетических полей, построенных по данным о слабой сейсмичности перед землетрясением в Эгейском море 30.10.2020. График 1 (сплошная линия) —  $f(a)$ -спектр по данным первой выборки, график 2 (точки) —  $f(a)$ -спектр по данным второй выборки.

Как видно из рис. 2, и в этом случае  $f(a)$ -спектр сейсмоэнергетического поля, непосредственно предшествовавшего главному толчку Эгейского землетрясения, оказывается существенно шире  $f(a)$ -спектра более раннего поля. Переход материала литосферы в очаговой области этого землетрясения в сильно неравновесное состояние привел к значительному расширению  $f(a)$ -спектра сейсмоэнергетического поля. И в этом случае расширение спектра сингулярностей вызвано ростом энергетических флуктуаций после перехода среды к сильной неравновесности перед магистральным разрушением сейсмоэнергетической системы. Эффект расширения  $f(a)$ -спектров сейсмоэнергетических полей перед сильными землетрясениями оказывается повторяющимся перед разными сейсмическими событиями, происходящими в совершенно различных регионах Земли.

#### 4. Количественные характеристики эффекта расширения $f(a)$ -спектров сейсмоэнергетических полей

Введем в рассмотрение количественные характеристики  $f(a)$ -спектров:

$$\Delta a = a_{max} - a_{min}, \quad (4.1)$$

где  $\Delta a$  — раскрытие (ширина)  $f(a)$ -спектра,  $a_{max}$  и  $a_{min}$  — соответственно максимальное и минимальное значения индексов сингулярности исследуемых полей, а также:

$$A = \frac{a_{max} - 2a_{ex} + a_{min}}{a_{max} - a_{min}}, \quad (4.2)$$

где  $A$  — параметр асимметрии спектра,  $a_{ex}$  — значение индекса сингулярности, соответствующее положению экстремума  $f(a)$ -спектра. Определенный таким образом параметр асимметрии  $A$  может принимать значения в диапазоне  $-1 < A < 1$ . Сигнатура  $A$  указывает на направление смещения экстремума спектра относительно центра диапазона  $\Delta a$ . Для симметричного спектра  $A = 0$ .

Кроме того, в работе [7] предложено количественно оценивать эффект расширения  $f(a)$ -спектров с помощью функционала  $\delta S$ :

$$\delta S = S^{**} - S^* = \int_{a_{min}^{**}}^{a_{max}^{**}} f^{**}(a) da - \int_{a_{min}^*}^{a_{max}^*} f^*(a) da, \quad (4.3)$$

где  $S$  — область координатного пространства, огибаемая спектром (и еще одна характеристика раскрытия спектра), верхний индекс в виде двух звездочек относится к спектру сейсмоэнергетического поля, предшествовавшего сильному землетрясению, верхний индекс в виде одной звездочки относится к спектру более раннего сейсмоэнергетического поля. Поскольку функции  $f(a)$  в области интегрирования являются непрерывными, гладкими и ограниченными, то параметр расширения  $\delta S$  всегда может быть оценен численно.

Землетрясение Пойнт-Маккензи. Величина раскрытия спектра 1 (рис. 1) составляет  $\Delta a = 3.56\dots$ , величина раскрытия спектра 2 —  $\Delta a = 3.88\dots$ . Таким образом, перед этим событием раскрытие спектра сейсмоэнергетического поля увеличилось примерно на 9%. Параметр асимметрии для спектра 1 равен  $A = 0.041\dots$ , для спектра 2 —  $A = -0.013\dots$ . Асимметрия спектров невелика, однако существенно, что расширение спектра сейсмоэнергетического поля сопровождалось сменой сигнатуры параметра  $A$ , т.е. инверсией формы асимметрии. Интегральный параметр расширения  $\delta S$  для землетрясения Пойнт-Маккензи составил  $\delta S = 0.52\dots$ .

Землетрясение в Эгейском море. Величина раскрытия спектра 1 (рис. 2) составляет  $\Delta a = 3.94\dots$ , величина раскрытия спектра 2 —  $\Delta a = 5.05\dots$ . Перед этим событием раскрытие спектра сейсмоэнергетического поля увеличилось примерно на 27%. Параметр асимметрии для спектра 1 равен  $A = 0.152\dots$ , для спектра 2 —  $A = -0.073\dots$ . Перед Эгейским землетрясением также произошла смена сигнатуры параметра  $A$ , однако в этом случае инверсия формы асимметрии спектров выражена значительно сильнее. Интегральный параметр расширения  $\delta S$  для Эгейского землетрясения по спектрам 1 и 2 составил  $\delta S = 1.25\dots$ .

Как видим, количественные характеристики эффекта расширения  $f(a)$ -спектров сейсмоэнергетических полей перед сильными землетрясениями могут значительно варьировать. Однако, необходимо отметить, что оба сильных землетрясения предварялись настолько слабой сейсмичностью, что ни форшоков, ни каких-либо иных физических явлений, способных содержать прогностическую информацию, перед этими событиями выявлено не было. Прогностическая информация, тем не менее, содержалась в вариациях скейлинговой структуры сейсмоэнергетических полей, т.е. исследование этих вариаций можно рассматривать как инструмент анализа тонкой структуры сейсмического процесса, недоступной пока для анализа другими методами.

## Заключение

В рассмотренных выше случаях содержащихся в каталогах USGS и ISC сейсмических данных оказывалось недостаточно для построения полных  $f(a)$ -спектров сейсмических полей. Недостаток данных (т.е. искусственный разрыв скейлинга) приводил не только к невозможности построения полных правых ветвей  $f(a)$ -спектров сейсмических полей, но и к их сильному искажению. Однако те же данные позволили построить полные  $f(a)$ -спектры сейсмоэнергетических полей. В соответствии с физикой процесса вариации связанных между собою сейсмического и сейсмоэнергетического полей происходят синхронно, однако анализ сейсмоэнергетических полей предоставляет и дополнительные преимущества. Так, при покрытии пространственных сейсмических распределений масштабной сеткой, используемой в мультифрактальном анализе, суммарные количества событий в боксах сетки различаются обычно не более, чем на один-два порядка, тогда как суммарные величины сейсмической энергии этих событий могут различаться на четыре-пять порядков и больше, что служит своего рода мультипликатором исследуемых вариаций. Это предоставляет возможность исследовать не только увеличение раскрытия (расширение)  $f(a)$ -спектров, но и изменения их асимметрии.

Эффект расширения  $f(a)$ -спектров сейсмоэнергетических полей перед сильными землетрясениями, вызванный ростом флуктуаций сейсмической активности при переходе сейсмогенерирующей системы в сильно неравновесное состояние, можно назвать вполне закономерным прогностическим признаком сильного землетрясения, свойства которого могут быть не только количественно описаны, но и теоретически обоснованы. Учитывая самоподобие сейсмического процесса, этот прогностический признак, по всей видимости, может быть обнаружен перед любым литосферным землетрясением (при наличии достаточных сейсмических данных).

Как видно на рис. 1 и 2, монофрактальные размерности сейсмоэнергетических полей (экстремумы  $f(a)$ -спектров) нечувствительны к процессам подготовки магистрального разрушения. Эффект расширения  $f(a)$ -спектров сейсмоэнергетических полей вызван характером изменений высших моментов мультифрактальных мер, моделирующих пространственные распределения сейсмической энергии. Физически это означает, что ослабленные точки литосферы (точки диссипации энергии) индуцируют сейсмические события многократно, не мигрируя в пространстве, а после перехода среды в сильно неравновесное состояние их энергетическая активность проявляется прежде всего в форме увеличения размаха энергетических флуктуаций. Общая энергия сейсмического потока может при этом повышаться незначительно. Переход среды в сильно неравновесное состояние проявляется не в росте абсолютных значений индуцируемой сейсмической энергии, а в структуре ее распределения в пространстве и времени. Структурные изменения полей приводят и к изменениям асимметрии характеризующих эти поля  $f(a)$ -спектров.

Возможность получения количественных характеристик эффекта расширения  $f(a)$ -спектров сейсмоэнергетических полей позволяет в определенном смысле говорить о том, что процессы подготовки сильных землетрясений могут быть измерены. Скейлинг оказывается не только структурным стержнем сейсмического процесса, но и его макропараметром. В задачах мониторинга текущего состояния сейсмогенерирующей среды мультифрактальный анализ сейсмического процесса может применяться не только как качественный, но прежде всего как количественный метод описания процессов подготовки землетрясений.

Представляется важным также, что эффект расширения  $f(a)$ -спектров сейсмоэнергетических полей обнаруживается с помощью применения к сейсмическим данным достаточно разработанных формальных математических алгоритмов, т.е. его обнаружение не предполагает использование каких-либо субъективных (напр. экспертных) процедур. Этот эффект может быть использован в полностью автоматизированных системах мониторинга сейсмического процесса, на создание которых уже в настоящее время затрачиваются значительные усилия.

## Список литературы

1. Prigogine I. *From being to becoming*. San Francisco: W.H. Freeman and Co., 1980. 200 p.
2. Mandelbrot B. Multifractal measures, especially for geophysicist. *PAGEOPH*, 1989, vol. 131, no. 2, pp. 5–42. <https://link.springer.com/journal/24/volumes-and-issues/131-1>
3. Takens F., Verbitski E. Multifractal analysis of dimensions and entropies. *Regular and chaotic dynamics*, 2000, 5(4), pp. 361–382. <https://doi.org/10.1070/RD2000v005n04ABEH000154>
4. Geilikman M.B., Golubeva T.V., Pisarenko V.F. Multifractal patterns of seismicity. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, vol. 99, no. 1/2, pp. 127–132.
5. Hooge C., Lovejoy S., Pecknold S., Malouin F., Schertzer D. Universal multifractals in seismicity. *Fractals*, 1994, vol. 2, no. 3, pp. 445–449.
6. Стаховский И.Р., Белоусов Т.П. Масштабные инварианты в сейсмотектонике. *Доклады Академии Наук*. 1996. Т. 347. №2. С. 252–255.
7. Стаховский И.Р. Расширение  $f(a)$ -спектров сейсмических полей в областях подготовки сильных землетрясений. *Физика Земли*. 2002. № 2. С. 74–78.
8. Стаховский И.Р. Изменение масштабно-инвариантной структуры сейсмического процесса перед землетрясением Северная Баха (Мексика). *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия*. 2019. № 2. С. 75–81.
9. Bath M. *Introduction to seismology*. Basel and Stuttgart: Birkhauser Verlag, 1973. 350 p.
10. Chhabra, A.B., Meneveau, C., Jensen, R.V., Sreenivasan K.R. Direct Determination of the  $f(a)$ -Singularity Spectrum and Its Application to Fully Developed Turbulence. *Phys. Rev. A*. 1989, vol. 40, no. 9, pp. 5284–5294.
11. West M.E., Bender A., Gardine L., Gately K., Haeussler P., Hassan W., Meyer F., Richards C., Ruppert N., Tape C., Thornley J., Witter R. The 30 November 2018 Mw 7.1 Anchorage Earthquake. *Seismological Research Letters*, 2020, vol. 91, no. 1, pp. 66–84. <https://doi.org/10.1785/0220190176>
12. <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/data>
13. Altunisik A.C., Atmaca B., Kartal M.E., Gunaydin M., Demir S., Ulsan A. Assessment of Structural Damage Following the October 30, 2020 Aegean Sea Earthquake and Tsunami. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 2021, vol. 15, no. 06, 2150029. <https://doi.org/10.1142/S1793431121500299>
14. International Seismological Centre (20XX), On-line Bulletin, <https://doi.org/10.31905/D808B830>

## References

1. Prigogine I. *From being to becoming*. San Francisco: W.H. Freeman and Co., 1980. 200 p.
2. Mandelbrot B. Multifractal measures, especially for geophysicist. *PAGEOPH*, 1989, vol. 131, no. 2, pp. 5–42. <https://link.springer.com/journal/24/volumes-and-issues/131-1>
3. Takens F., Verbitski E. Multifractal analysis of dimensions and entropies. *Regular and chaotic dynamics*, 2000, 5(4), pp. 361–382. <https://doi.org/10.1070/RD2000v005n04ABEH000154>
4. Geilikman M.B., Golubeva T.V., Pisarenko V.F. Multifractal patterns of seismicity. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, vol. 99, no. 1/2, pp. 127–132.
5. Hooge C., Lovejoy S., Pecknold S., Malouin F., Schertzer D. Universal multifractals in seismicity. *Fractals*, 1994, vol. 2, no. 3, pp. 445–449.
6. Stakhovsky I.R., Belousov T.P. Scale Invariants in Seismotectonics. *Dokl. Akad. Nauk*, 1996, vol. 347, no. 2, pp. 252–255.
7. Stakhovsky I.R. Widening of the  $f(a)$ -Spectra of Seismic Fields in Preparation Zones of Strong Earthquakes. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2002, vol. 38, no. 2, pp. 156–160.
8. Stakhovsky I.R. Seismic process scale-invariant structure changes before the Northern Baja earthquake (Mexico). *Space, Time and Fundamental Interactions*, 2019, no. 2, pp. 75–81.
9. Bath M. *Introduction to seismology*. Basel and Stuttgart: Birkhauser Verlag, 1973. 350 p.
10. Chhabra, A.B., Meneveau, C., Jensen, R.V., Sreenivasan K.R. Direct Determination of the  $f(a)$ -Singularity Spectrum and Its Application to Fully Developed Turbulence. *Phys. Rev. A*. 1989, vol. 40, no. 9, pp. 5284–5294.



11. West M.E., Bender A., Gardine L., Gately K., Haeussler P., Hassan W., Meyer F., Richards C., Ruppert N., Tape C., Thornley J., Witter R. The 30 November 2018 Mw 7.1 Anchorage Earthquake. *Seismological Research Letters*, 2020, vol. 91, no. 1, pp. 66–84. <https://doi.org/10.1785/0220190176>
12. <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/data>
13. Altunisik A.C., Atmaca B., Kartal M.E., Gunaydin M., Demir S., Ulasan A. Assessment of Structural Damage Following the October 30, 2020 Aegean Sea Earthquake and Tsunami. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 2021, vol. 15, no. 06, 2150029. <https://doi.org/10.1142/S1793431121500299>
14. International Seismological Centre (20XX), On-line Bulletin, <https://doi.org/10.31905/D808B830>

## Авторы

**Стаховский Игорь Ростиславович**, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, ул. Б. Грузинская, 10, Москва, 123242, Россия.  
E-mail: stakhov@ifz.ru

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Стаховский И. Р. Структурная перестройка мультифрактальных распределений сейсмической энергии перед сильными землетрясениями. *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия*. 2022. № 41. С. 91–99.

## Authors

**Stakhovsky Igor Rostislavovich**, Doctor of Physics and Mathematics, Chief researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, B. Gruzinskaya str., 10, Moscow, 123242, Russia.  
E-mail: stakhov@ifz.ru

### Please cite this article in English as:

Stakhovsky I. R. Structural rearrangement of seismic energy multifractal distributions before strong earthquakes. *Space, Time and Fundamental Interactions*, 2022, no. 41, pp. 91–99.