

УДК 550.34.01+550.348.436

© Стаховский И. Р., 2019

## ИЗМЕНЕНИЕ МАСШТАБНО-ИНВАРИАНТНОЙ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ СЕВЕРНАЯ БАХА (МЕКСИКА)

Стаховский И. Р.<sup>a,1</sup><sup>a</sup> Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, 123242, Россия.

В статье представлены результаты мультифрактального анализа сейсмичности, предшествовавшей землетрясению Северная Баха (2010 г., Мексика) в его эпицентральной области. Построены спектры сингулярностей мультифрактальных мер, моделирующих пространственные распределения сейсмических эпицентров и сейсмической энергии. Показано, что для обоих распределений спектры сингулярностей существенно расширяются в последние два года перед главным толчком землетрясения Северная Баха.

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

## SEISMIC PROCESS SCALE-INVARIANT STRUCTURE CHANGES BEFORE THE NORTHERN BAJA EARTHQUAKE (MEXICO)

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 results of multifractal analysis of seismicity preceded the Northern Baja earthquake (2010, Mexico) in its epicentral zone are presented. The singularity spectra of multifractal measures simulated spatial distributions of seismic epicenters and seismic energy are calculated. It is shown that singularity spectra of both distributions demonstrate substantial widening during last two years before the main shock of the Northern Baja earthquake.

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

DOI: 10.17238/issn2226-8812.2019.2.75-81

### Введение

Сейсмичность — существенно нелинейный и неравновесный физико-химический процесс, в ходе которого подготовку сильного землетрясения можно интерпретировать как переход сейсмогенерирующей системы из слабо неравновесного состояния (установившегося режима) в сильно неравновесное (переходный режим). В условиях земных недр под действием тектонических напряжений сильно неравновесное состояние среды заканчивается потерей устойчивости или разрушением (т.е. главным толчком землетрясения). В соответствии с выводами теории диссипативных структур [1] при переходе в сильно неравновесное состояние свойства физико-химической системы начинают определяться ростом флуктуаций ее параметров (само сильное землетрясение можно рассматривать как "бесконечную" флуктуацию). Тем самым, поиск способов обнаружения роста флуктуаций в пространственно-временных распределениях сейсмических событий и сейсмической энергии становится актуальной проблемой сейсмофизики.

Мультифрактальная (масштабно-инвариантная) структура сейсмического процесса обнаружена и неоднократно подтверждена во многих работах по анализу сейсмических каталогов [2, 3].

---

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

Рост флуктуаций сейсмической активности перед сильным землетрясением приводит к изменениям в масштабно-инвариантной структуре сейсмичности. В кумулятивной форме эти изменения проявляются в виде вариаций параметров мультифрактальных спектров сейсмических распределений, например, в виде расширения  $f(a)$ -спектра сейсмического поля. Так, эффект расширения  $f(a)$ -спектра сейсмического поля был обнаружен перед землетрясением Джошуа Три в Южной Калифорнии (1992 г.,  $M = 6.2$ ) и землетрясением в Исландии (2000 г.,  $M = 6.6$ ) [4]. Тем не менее, имеющегося материала по этому вопросу пока недостаточно для статистически значимых обобщений. Современные сейсмические каталоги имеют, как правило, довольно высокий порог представительности ( $M \approx 2 \div 2.5$ ), что часто приводит к серьезной нехватке данных для проведения структурного анализа пространственных распределений сейсмичности или полной невозможности такого анализа. Поэтому каждый новый пример эффекта расширения  $f(a)$ -спектра сейсмического поля перед сильным землетрясением, который удастся обнаружить в сейсмических каталогах по мере накопления в них новой информации, представляет самостоятельный интерес.

В данной работе проведен мультифрактальный анализ данных по мелкомасштабной сейсмичности перед землетрясением Северная Баха (Мексика) с использованием Южно-Калифорнийского сейсмологического каталога (каталога SCEDC – Southern California Earthquake Data Center). Приведены результаты сравнения  $f(a)$ -спектров пространственных распределений сейсмических эпицентров и сейсмической энергии для двух временных периодов: первого, относящегося к установившемуся сейсмическому режиму, и второго, непосредственно предшествовавшего главному толчку этого землетрясения. Показано, что эффект расширения  $f(a)$ -спектра обнаруживается в данном случае как в пространственном распределении сейсмических эпицентров (в сейсмическом поле), так и в пространственном распределении сейсмической энергии (в сейсмоэнергетическом поле), что в данной работе получено впервые.

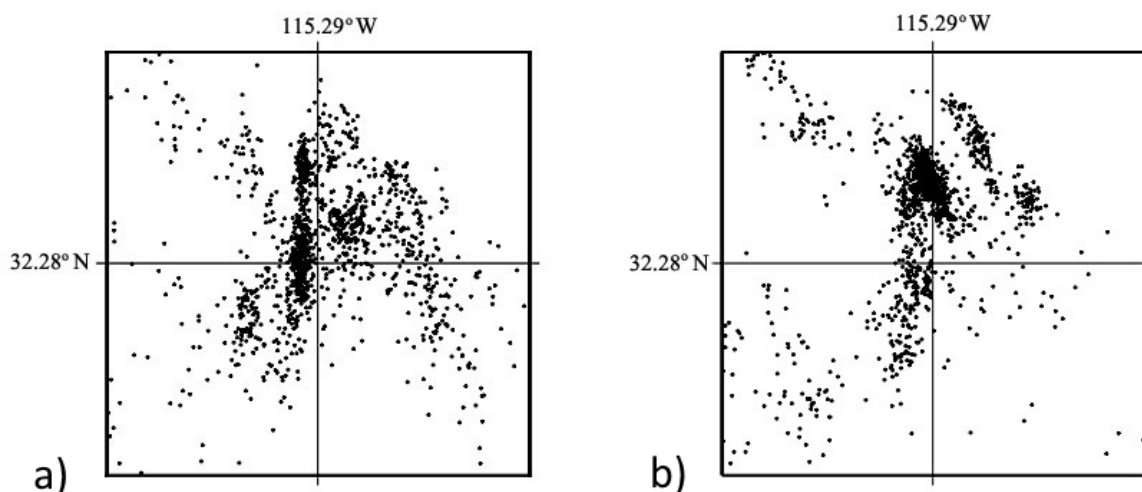
## 1. Исходные данные

Землетрясение Северная Баха (Northern Baja, испанское название — Sierra El Mayor Cucarahn) произошло 04.04.2010 г. на территории Мексики недалеко от границы с США. Его магнитуда составила  $M = 7.2$ , координаты эпицентра —  $32.28^\circ \text{ N } 115.29^\circ \text{ W}$ , глубина гипоцентра 10 км. В результате этого землетрясения дневная поверхность оказалась вспорота на протяжении 75 км, разлом пересек границу США и вышел на территорию Южной Калифорнии. Вертикальное смещение берегов разлома в отдельных местах превышало 2 м. В Южно-Калифорнийском сейсмологическом каталоге землетрясение Северная Баха относится к сильнейшим событиям за время инструментальных наблюдений.

Основным источником информации о процессе подготовки этого землетрясения являются данные о микросейсмичности, предвещавшей главный толчок. Благодаря высокому уровню микросейсмической активности в фокальной области землетрясения Северная Баха, а также неглубокому положению гипоцентра, процесс подготовки этого землетрясения в той мере, в какой он отражен в характере микросейсмичности, оказался представлен в Южно-Калифорнийском каталоге достаточно полно для статистического (мультифрактального) анализа.

Расчеты проводились с сейсмическими данными в рамках полигона размером  $80 \times 80$  км, центр которого совпадал с эпицентром землетрясения Северная Баха. По сейсмической информации Южно-Калифорнийского каталога были сформированы две выборки данных, относящихся к этому полигону и предшествовавших землетрясению Северная Баха. Первая выборка включала события, произошедшие за период с февраля 2002 г. по декабрь 2007 г. Вторая выборка включала события с января 2008 г. до момента главного толчка землетрясения Северная Баха (04.04.2010), при этом само землетрясение Северная Баха в выборку не входило. Обе выборки содержали по 1305 событий в магнитудном диапазоне  $2.0 \leq M \leq 5.4$ , глубины гипоцентров не превышали 20 км (за единичными исключениями). Равное количество событий в выборках позволяло в результатах расчетов избегать погрешностей, вызванных неодинаковой представительностью исходных

данных. Пространственное распределение событий представлено на рис. 1.



**Рис. 1.** Пространственное распределение сейсмических событий на территории исследованного полигона размером  $80 \times 80$  км, а) - за 2002 ÷ 2007 гг. (первая выборка), б) - за 2008 ÷ 04.04.2010 гг. (вторая выборка). Обе выборки содержат по 1305 событий.

## 2. Техника счета

Для целей мультифрактального анализа (подробное изложение теории см. [4]) территория полигона покрывалась ренормируемой масштабной сеткой квадратных боксов. Пространственные распределения эпицентров землетрясений и сейсмической энергии моделировались мерами  $P^S$  и  $P^E$ , где верхний индекс  $S$  соответствует сейсмическому полю (распределению эпицентров), а  $E$  — сейсмоэнергетическому полю (распределению сейсмической энергии). Содержание этих мер в  $i$ -тых боксах масштабной сетки оценивалось с помощью нормировки:

$$p_i^S = N_i/N_0, \quad (1)$$

$$p_i^E = E_i/E_0, \quad (2)$$

где  $N_i$  — число событий в  $i$ -том боксе,  $N_0$  — общее число событий в выборке,  $E_i$  — общая величина сейсмической энергии в  $i$ -том боксе,  $E_0$  — общая величина сейсмической энергии всех событий в выборке,  $i$  — порядковый индекс боксов. Пересчет магнитуд в энергии осуществлялся по формуле Бата [5]:

$$\lg E = 5.24 + 1.44M, \quad (3)$$

где  $E$  — сейсмическая энергия (Дж),  $M$  — магнитуда. Путем ренормирования сетки определялась кумулянт-генерирующая функция  $\tau(q)$ :

$$\tau(q) = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln(\sum p_i^q(r))}{\ln(1/r)} \quad (4)$$

где  $r$  — размер бокса сетки (масштаб),  $N$  — общее число непустых боксов сетки,  $q$  — порядок момента меры. С помощью преобразования Лежандра осуществлялся переход к переменным  $a$  и  $f(a)$ :

$$a = -\frac{d}{dq}\tau(q), \quad (5)$$

$$f(a) = aq + \tau(q), \quad (6)$$

где  $a$  — индекс сингулярности,  $f(a)$  — спектр сингулярностей.

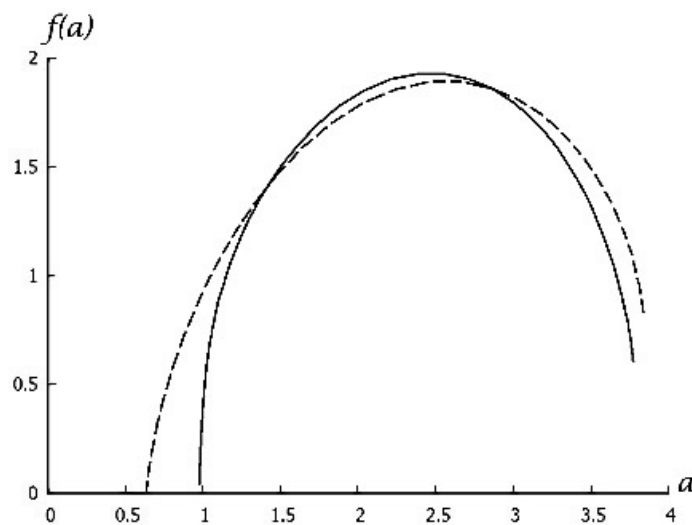
### 3. Результаты расчетов спектров сингулярностей сейсмических полей

Спектры сингулярностей сейсмических полей, рассчитанные по данным обеих выборок, представлены на рис. 2. Как видим,  $f(a)$ -спектр, соответствующий первой выборке (сплошная линия), т.е. относящийся к периоду времени 2002-2007 гг., когда сейсмический процесс находился в установившемся режиме, обладает существенно более узким диапазоном индексов сингулярности, чем  $f(a)$ -спектр, соответствующий второй выборке (пунктирная линия), т.е. относящийся к периоду времени 2008-2010 гг., когда сейсмический процесс находился в режиме непосредственной подготовки землетрясения Северная Баха (переходном режиме). Расширение  $f(a)$ -спектра является индикатором перехода сейсмогенерирующей системы в сильно неравновесное состояние.

Для количественной оценки эффекта расширения  $f(a)$ -спектра воспользуемся функционалом  $\delta S$ :

$$\delta S = S^{**} - S^* = \int_{a_{min}^{**}}^{a_{max}^{**}} f^{**}(a) da - \int_{a_{min}^*}^{a_{max}^*} f^*(a) da, \quad (7)$$

где  $S$  — характеристика раскрытия спектра, верхний индекс в виде двух звездочек относится к спектру сейсмического поля, предшествовавшего сильному землетрясению (т.е. ко второй выборке данных), верхний индекс в виде одной звездочки относится к спектру более раннего сейсмического поля (т.е. к первой выборке данных),  $a_{max}$  и  $a_{min}$  — соответственно максимальное и минимальное значения индексов сингулярности. Функции  $f(a)$  в области интегрирования являются непрерывными, гладкими и ограниченными, т.е. параметр расширения  $\delta S$  всегда может быть оценен численно. В данном случае  $\delta S = 0.458\dots$  Заметим, что в упомянутых выше случаях с Исландским землетрясением 2000 г. и землетрясением Джошуа Три 1992 г. значения параметра расширения  $\delta S$  составили 1.08... и 0.94... соответственно.



**Рис. 2.** Спектры сингулярностей мультифрактальных мер, моделирующих пространственные распределения эпицентров слабой сейсмичности перед землетрясением Северная Баха. Сплошная линия –  $f(a)$ -спектр, построенный по первой выборке данных, пунктирная линия –  $f(a)$ -спектр, построенный по второй выборке данных.

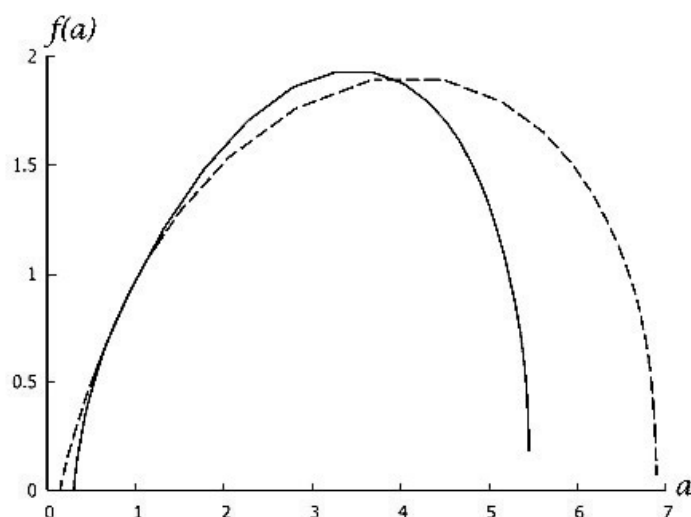
### 4. Результаты расчетов спектров сингулярностей сейсмоэнергетических полей

Отметим, что первая выборка данных охватывала период времени примерно в пять лет, тогда как вторая выборка охватывала период времени чуть более двух лет. Обе выборки содержали одинаковое количество событий, однако суммарная сейсмическая энергия всех событий первой выборки составила  $\approx 1.40 \cdot 10^{13}$  Дж, а второй выборки  $\approx 7.06 \cdot 10^{13}$  Дж, что примерно в пять

раз больше, чем для первой выборки. Таким образом, сейсмический процесс перед землетрясением Северная Баха резко изменился в энергетическом плане в последние два года перед главным толчком: в условиях сильно неравновесного состояния среды микроземлетрясения происходили чаще и обладали повышенной энергией по сравнению с более ранним установившимся сейсмическим режимом.

Не менее существенные изменения происходили и в пространственной структуре сейсмоэнергетического поля. Спектры сингулярностей сейсмоэнергетических полей, рассчитанные по данным обеих выборок, представлены на рис. 2. Сплошная линия на рис. 2 –  $f(a)$ -спектр сейсмоэнергетического поля в установившемся режиме (первая выборка), пунктирная линия –  $f(a)$ -спектр сейсмоэнергетического поля в переходном режиме непосредственно перед землетрясением Северная Баха (вторая выборка). Расширение  $f(a)$ -спектра сейсмоэнергетического поля перед сильным землетрясением выражено значительно сильнее, чем в сейсмическом поле. Параметр расширения  $\delta S$  в данном случае составляет  $\delta S = 2.055\dots$

Заметим, что параметр расширения  $\delta S$  позволяет оценить эффект расширения  $f(a)$ -спектров количественно, включая как изменение ширины, так и изменение формы спектров. Не исключено, что изменение формы  $f(a)$ -спектров может иметь самостоятельное прогностическое значение, однако этот вопрос пока изучен недостаточно.



**Рис. 3.** Спектры сингулярностей мультифрактальных мер, моделирующих пространственные распределения сейсмической энергии для слабой сейсмичности перед землетрясением Северная Баха. Сплошная линия –  $f(a)$ -спектр, построенный по первой выборке данных, пунктирная линия –  $f(a)$ -спектр, построенный по второй выборке данных.

## Заключение

Процесс подготовки землетрясения Северная Баха (2010 г.,  $M = 7.2$ ) сопровождался изменениями структуры сейсмического процесса в последние два года перед главным толчком. Эти изменения могут быть обнаружены с помощью мультифрактального анализа пространственных распределений слабой сейсмичности в окрестности эпицентра этого землетрясения. При этом прогностические признаки подготовки землетрясения в полях иной физической природы обнаружены перед этим землетрясением не были.

Эффект расширения  $f(a)$ -спектров сейсмических и сейсмоэнергетических полей перед сильным землетрясением позволяет различить состояния сейсмогенерирующей системы во времени, т.е. отличить установившийся сейсмический режим от переходного режима, заканчивающегося главным толчком землетрясения. В иной терминологии, этот эффект позволяет отличить слабо

неравновесное состояние среды от сильно неравновесного. Тем самым, эффект расширения  $f(a)$ -спектров можно рассматривать как метод мониторинга текущего состояния сейсмогенерирующей системы. Отметим также, что сильно неравновесное состояние среды перед землетрясением Северная Баха привело и к формированию статистического самоподобия в структуре сейсмической кинетики [4].

Характерно, что экстремумы спектров, построенных по разным выборкам данных, отличаются крайне слабо (имеющиеся различия незначительны и объясняются только нехваткой данных), т.е. монофрактальные размерности сейсмических распределений нечувствительны к процессам подготовки сильных землетрясений. Прогностическая информация сосредоточена в поведении высших моментов мультифрактальных мер, моделирующих пространственные распределения сейсмических эпицентров и сейсмической энергии. Сейсмический скейлинг можно рассматривать как макропараметр сейсмогенерирующей среды, изменения которого являются индикатором перехода среды в сильно неравновесное состояние.

Эффект расширения  $f(a)$ -спектров сейсмических и сейсмоэнергетических полей перед сильным землетрясением объясняется локальными кратковременными флуктуациями (точечными всплесками или затуханием) сейсмической активности, зафиксированными в кумулятивных модельных мерах, использовавшихся для мультифрактального анализа. Эффект может быть обнаружен при обработке статистически значимых массивов данных и в будущем может использоваться в целях прогноза сейсмических катастроф.

### Список литературы

1. Prigogine I. From being to becoming. San Francisco: W.H.Freeman and Co; 1980.
2. Geilikman M.B., Golubeva T.V., Pisarenko V.F. Multifractal patterns of seismicity. *Earth and Planetary Science Letters*. 1990; v. 99. №1/2. pp. 127-132.
3. Hooge C., Lovejoy S., Pecknold S., Malouin F., Schertzer D. Universal multifractals in seismicity. *Fractals*. 1994; v. 2. № 3: pp. 445-449.
4. Стаховский И.Р. Масштабная инвариантность коровой сейсмичности и прогностические признаки землетрясений // Успехи физических наук. 2017. Т. 187. № 5. С. 505-524.
5. Bath M. Introduction to seismology. Basel and Stuttgart: Birkhauser Verlag; 1973.

### References

1. Prigogine I. *From being to becoming*. San Francisco. W.H.Freeman and Co., 1980. 200 p.
2. 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.
3. Hooge C., Lovejoy S., Pecknold S., Malouin F., Schertzer D.. Universal multifractals in seismicity. *Fractals*, 1994, vol. 2, no. 3, pp. 445-449.
4. Stakhovsky I. R. Scale invariance of shallow seismicity and the prognostic signatures of earthquakes. *Physics-Uspeski*, 2017, vol. 60, no. 5, pp. 472-489.
5. Bath M. *Introduction to seismology*. Basel and Stuttgart. Birkhauser Verlag., 1973. 350 p.

### Авторы

**Стаховский Игорь Ростиславович**, д. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, ул. Б. Грузинская, 10, г. Москва, 123242, Россия.

E-mail: stakhov@ifz.ru

**Просьба сослаться на эту статью следующим образом:**

Стаховский И. Р. Изменение масштабно-инвариантной структуры сейсмического процесса перед землетрясением Северная Баха (Мексика) // *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия*. 2019. № 2. С. 75—81.

**Authors**

**Stakhovsky Igor R.**, doctor of physical and mathematical Sciences, leading researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, B. Gruzinskaya st., 10, Moscow, 123242, Russia.

E-mail: stakhov@ifz.ru

**Please cite this article in English as:**

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.