

ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ МЕТОДОВ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ НАУКИ

УДК 550.34.01+550.348.436

© Стаховский И. Р., 2020

ДИССИПАТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИСтаховский И. Р.^{a,1}^a Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, 123242, Россия.

В статье представлены результаты мультифрактального анализа ряда временных интервалов (ряда времен ожидания) между событиями серии землетрясений Риджкрест 2019 г. Показано, что ряд обладает самоподобной структурой, сформированной сильно неравновесным состоянием среды. Временная диссипативная структура ряда может рассматриваться как индикатор процесса подготовки сильного землетрясения в сейсмогенерирующей среде.

Ключевые слова: землетрясение, мультифрактальная мера, спектр сингулярностей, диссипативная структура, сейсмическая кинетика.

DISSIPATIVE STRUCTURES OF SEISMIC KINETICSStakhovsky I. R.^{a,1}^a Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242, Russia.

The results of multifractal analysis of the series of time intervals between the events of the 2019 Ridgecrest earthquake sequence (waiting time series) are presented. It is shown that the series has self-similar structure which is formed by the strongly non-equilibrium state of the medium. The temporal dissipative structure of the waiting time series may be considered as the indicator of the earthquake preparation process in seismo-generating medium.

Keywords: earthquake, multifractal measure, singularity spectrum, dissipative structure.

PACS: 91.30. - f, 91.30.Px

DOI: 10.17238/issn2226-8812.2020.3.58-64

Введение

В теории неравновесных систем [1] диссипативными структурами называют устойчивые пространственно-временные структурные образования, возникающие в многокомпонентных открытых диссипативных системах за счет роста флуктуаций в условиях сильной неравновесности. Исследования как временных, так и пространственных диссипативных структур показывают, что структуры этого типа всегда подчинены степенным распределениям, т.е. обладают мультифрактальной организацией [2,3]. В сейсмофизике пространственные диссипативные структуры исследуются давно [4-6]. В значительно меньшей степени исследованы временные диссипативные

¹E-mail: stakhov@ifz.ru

структуры, возникающие во временном ходе сейсмической кинетики перед разрушением сейсмогенерирующей системы, т.е. перед сильными землетрясениями. При этом поиск самого факта появления закономерного физического явления перед сильными землетрясениями относится к актуальным проблемам сейсмофизики и, в частности, сейсмического прогноза.

В данной работе проведен структурный (мультифрактальный) анализ временного хода сейсмичности перед сильнейшим из событий ($M = 7.1$) серии землетрясений Риджкрест 2019 г. в Восточной Калифорнии. Расчеты проведены с использованием данных каталога SCSN (Southern California Seismic Network) [7]. Серия землетрясений Риджкрест уникальна тем, что в течение нескольких десятков часов в небольшой области с линейным размером ≈ 25 км было зафиксировано более 3300 событий с магнитудой $M > 0$, причем в окрестностях этой области сейсмическая активность не наблюдалась [8]. Мультифрактальный анализ полученных данных показал, что в исследованной серии землетрясений сейсмический поток не был хаотическим, процесс сейсмической кинетики имел самоподобную диссипативную структуру. Тем самым, получено обоснованное свидетельство того, что процесс подготовки сильных землетрясений следует рассматривать как процесс перехода среды в сильно неравновесное состояние, а скейлинговый анализ данных сейсмической кинетики — как средство мониторинга текущего состояния сейсмогенерирующей среды.

1. Исходные данные

Серия землетрясений Риджкрест началась 04.07.2019 в 17:33:49 (UTC) землетрясением с магнитудой $M = 6.4$ и координатами эпицентра 35.70° N, 117.50° W. Далее в ближайших окрестностях эпицентра этого землетрясения вдоль двух небольших разломов последовательно произошли несколько тысяч мелкомасштабных сейсмических событий. 06.07.2019 в 03:19:53 (UTC) произошло второе сильное землетрясение с магнитудой $M = 7.1$ и координатами эпицентра 35.70° N, 117.59° W. Сплошной поток сейсмических событий в этой области за указанный период времени позволяет говорить, что локализованная сейсмогенерирующая система в данном случае непрерывно находилась в условиях сильной неравновесности. Вся последовательность сейсмических событий от землетрясения с магнитудой $M = 6.4$ до главного толчка землетрясения с магнитудой $M = 7.1$ по сути представляла собой проявление единого процесса подготовки второго из этих сильных землетрясений ($M = 7.1$). В этой последовательности 1081 событие имело значение магнитуды в диапазоне $1.7 \leq M \leq 5.37$, что превышает порог представительности данных сети SCSN (порог представительности $M \approx 1.7$ [7]). Эти события составили анализируемую далее выборку данных каталога.

Временной ход сейсмической кинетики исследовался с помощью ряда временных интервалов между последовательно происходившими событиями, т.е. ряда «времен ожидания» (такой метод анализа точечных процессов использовался в сейсмофизике и ранее [9]). Перенумеруем события в выборке в хронологическом порядке с помощью индекса i ($i = 1, 2, 3, \dots$), тогда момент времени t , соответствующий i -тому событию, можно обозначить t_i . Временем ожидания δt_i будем называть интервал времени между последовательно происходившими событиями, т.е.:

$$\delta t_i = t_{i+1} - t_i. \quad (1)$$

Величины δt_i неотрицательны и аддитивны, что делает эти параметры сейсмической кинетики удобными для скейлингового анализа.

Разместив величины δt_i в порядке возрастания индекса i , получим ряд времен ожидания, графически представленный на рис. 1. Нетрудно видеть, что ряд времен ожидания δt_i сохраняет практически всю временную информацию о процессе сейсмической кинетики, которая присутствует в каталоге.

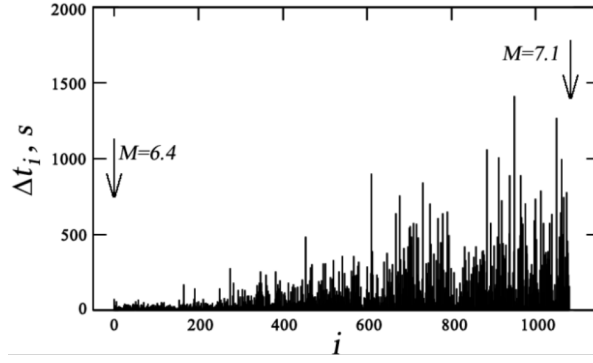


Рис. 1. Ряд времен ожидания для исследовавшейся выборки данных. По оси абсцисс отложены порядковые индексы событий, по оси ординат — значения времен ожидания δt_i в секундах. Стрелки указывают моменты землетрясений с магнитудами $M = 6.4$ и $M = 7.1$.

2. Результаты расчетов

Для целей мультифрактального анализа ряд времен ожидания покрывался одномерной ренормируемой масштабной сеткой непересекающихся боксов. Нумерация боксов сетки осуществлялась с помощью индекса j ($j = 1, 2, 3, \dots$). Распределение времен ожидания моделировалось мерой P , содержание которой в j -том боксе сетки p оценивалось с помощью нормировки:

$$p_j = \frac{\delta t_i}{\sum_{i=1}^N \delta t_i}, \quad (2)$$

где N — общее число боксов сетки. В формуле (2) подразумевается, что i -тый элемент ряда времен ожидания δt_i попадает в j -тый бокс масштабной сетки. Процедура ренормирования меры P включала использование биномиальной каскадной схемы с максимальным разрешением масштабной сетки $2^{10} = 1024$. Алгоритм анализа включал составление статистических сумм (partition function):

$$Z_q(r) = \sum_{i=1}^N p_j^q(r), \quad q \in \{-\infty, +\infty\}, \quad (3)$$

где q — порядок момента меры, r — размер бокса сетки (масштаб). Ренормирование задавало изменения масштаба r ($r = r_1, r_2, r_3, \dots$). В численных расчетах значения q перебирались дискретно с шагом $\delta q = 0.1$ в диапазоне значений $-30 \leq q \leq 30$. Для текущих значений q с учетом (3) строились вектора:

$$X_r = \left[\ln \sum_{j=1}^N p_j^q(r), \ln r \right], \quad (4)$$

составлявшие матрицу данных Y_q , использовавшуюся при определении характера соотношения между суммой моментов меры и масштабом (точнее, между их логарифмами):

$$Y_q = [X_{r_1} \ X_{r_2} \ X_{r_3} \ \dots]^T. \quad (5)$$

По компонентам матриц (5) строились зависимости $\ln \left(\sum_{j=1}^N p_j^q(r) \right)$ от $\ln r$, после чего цикл расчетов повторялся со следующим значением q .

Рис. 2 показывает, что зависимости $\ln \left(\sum_{j=1}^N p_j^q(r) \right)$ от $\ln r$ практически линейны, т.е. реальные зависимости сумм моментов меры от масштаба являются степенными. Прямыми линиями на рис. 2 показаны графики линейных регрессий, аппроксимирующих расчетные зависимости (точки).

Линейный характер зависимостей $\ln \left(\sum_{j=1}^N p_j^q(r) \right)$ от $\ln r$ доказывает, что исследуемый ряд времен ожидания не является хаотическим, а моменты времени, в которые происходили сейсмические события, не являются произвольными. Ряд обладает статистически самоподобной структурой.

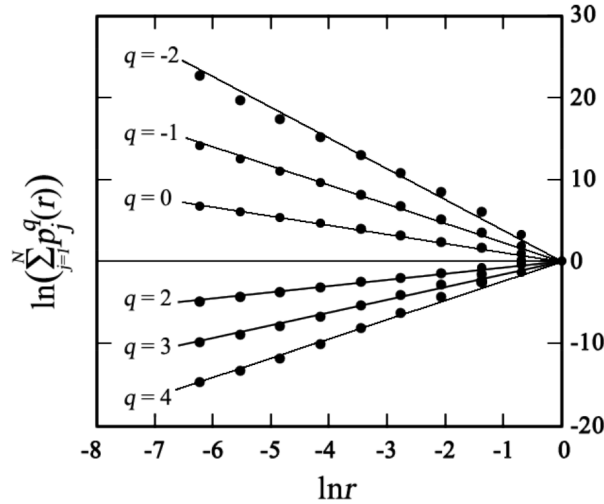


Рис. 2. Зависимости сумм моментов меры P от масштаба r при разных значениях порядка момента меры q . График построен в двойном логарифмическом масштабе. Прямые линии — графики линейных регрессий, аппроксимирующих расчетные зависимости (точки).

Сейсмические события, по которым построен ряд, предшествуют сильному землетрясению и сами могут рассматриваться как «бесконечные» флуктуации сейсмической энергии в исследуемой системе, что отмечает факт пребывания системы в сильно неравновесном состоянии. Скейлинговая структура ряда сформирована флуктуационной природой процесса, что позволяет интерпретировать ее как временную диссипативную структуру.

В условии мультифрактальности меры $\sum_{j=1}^N p_j^q(r) \propto r^{-\tau(q)}$ входит кумулянт-генерирующая функция $\tau(q)$. Коэффициенты регрессий, построенных по зависимостям $\ln\left(\sum_{j=1}^N p_j^q(r)\right)$ от $\ln r$ (рис. 2), можно рассматривать как аппроксимации значений кумулянт-генерирующей функции $\tau(q)$ при соответствующих значениях q :

$$\tau(q) = \lim_{r \rightarrow 0} \left[\frac{\ln \sum_{j=1}^N p_j^q(r)}{\ln(1/r)} \right], \quad q \in \{-\infty, +\infty\}. \quad (6)$$

Кумулянт-генерирующая функция $\tau(q)$ описывает неоднородность скейлинга меры, не имеет экстремумов и определена в бесконечном диапазоне изменения q . В численных же расчетах при обработке эмпирических данных диапазон изменения q ограничен прежде всего тем, что нехватка данных (например, из-за наличия у каталога порога представительности) может привести к значительным искажениям $\tau(q)$ при больших значениях $|q|$.

Функцию $\tau(q)$ можно преобразовать в спектр обобщенных фрактальных размерностей $D_q = (1 - q)^{-1} \tau(q)$. Однако по указанной выше причине целесообразно избавиться от уходящих в бесконечность ветвей функции $\tau(q)$, придав производной от $\tau(q)$ смысл новой переменной. Тем самым, с помощью преобразования Лежандра можно сменить координаты $\{q, \tau(q)\}$ на новые координаты $\{a, f(a)\}$, где переменную a называют индексом сингулярности, а функцию $f(a)$ — спектром сингулярностей:

$$a = -\frac{d}{dq} \tau(q), \quad (7)$$

$$f(a) = aq + \tau(q). \quad (8)$$

Величины a и $f(a)$ имеют самостоятельный геометрический смысл. Так, индекс сингулярности a_j характеризует локальное самоподобие меры:

$$a_j = \lim_{r \rightarrow 0} \left[\frac{\ln p_j}{\ln r} \right], \quad (9)$$

где обозначение a_j означает принадлежность индекса сингулярности j -тому боксу масштабной сетки. Спектр сингулярностей $f(a)$ описывает глобальное самоподобие меры:

$$f(a) = - \lim_{r \rightarrow 0} \left[\frac{\ln \sum N_a}{\ln r} \right], \quad (10)$$

где $\sum N_a$ — число боксов масштабной сетки с общим значением индекса сингулярности a .

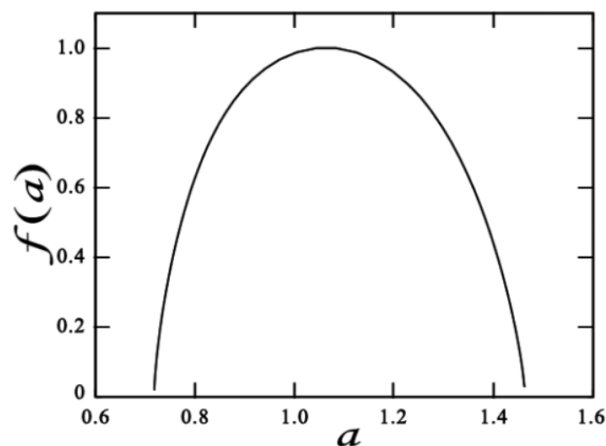


Рис. 3. Спектр сингулярностей ($f(a)$ -спектр) мультифрактальной меры P , моделирующей ряд времен ожидания для серии землетрясений Риджкрест.

Построенный численно, $f(a)$ -спектр меры P приведен на рис. 3. Как видим, он асимметричен, т.е. в структуре ряда времен ожидания количество элементов с малыми значениями резко превышает количество элементов с крупными значениями. Ширину спектра, т.е. величину $a_{max} - a_{min}$ естественно рассматривать как количественную оценку степени стохастичности исследуемой меры P . Сложнее интерпретировать такие характеристики $f(a)$ -спектра как его форма, радиус кривизны в точке экстремума и т.д. Можно обоснованно полагать, что параметры $f(a)$ -спектра, описывающие масштабно-инвариантную структуру, появляющуюся в процессе сейсмической кинетики непосредственно перед сильным землетрясением, содержат информацию как о процессе подготовки землетрясения, так и о параметрах самого готовящегося землетрясения. Расшифровать эту информацию удастся с появлением достаточного числа подобных примеров.

Спектр сингулярностей (рис. 3) как характеристика процесса сейсмической кинетики показывает, что сложное нерегулярное поведение сильно неравновесного процесса может быть описано в рамках строгого математического формализма практически без помощи идеализаций, упрощающих исследуемую сингулярную меру. По всей видимости, при наличии доступа к сейсмическим данным в реальном времени описанный алгоритм обработки данных можно рассматривать как инструмент сейсмического мониторинга текущего состояния сейсмогенерирующих систем.

Заключение

Серия землетрясений Риджкрест 2019-го года в Восточной Калифорнии продемонстрировала, что появление во временном ходе сейсмической кинетики масштабно-инвариантной структуры, сформированной мелкомасштабными событиями, можно рассматривать как индикатор развития в среде процесса подготовки крупномасштабного землетрясения. Причиной появления самоподобия во временном ходе сейсмической кинетики является сильно неравновесное состояние среды. Сильно неравновесное состояние сейсмической системы в условиях земных недр заканчивается землетрясением, магнитуда которого на 1-2 единицы превышает магнитуды предварявших его в его очаговой области наиболее сильных сейсмических событий.

В установившемся сейсмическом режиме временной ход сейсмической кинетики является хаотическим [10], однако при переходе сейсмогенерирующей системы в сильно неравновесное состояние сейсмическая кинетика приобретает самоподобную структурную организацию. Временные интервалы между последовательно происходящими в системе сейсмическими событиями (времена ожидания) оказываются подчинены мультифрактальной статистике. В терминах теории неравновесных процессов [1] этот результат можно интерпретировать как появление в системе временной диссипативной структуры, сформированной ростом флуктуаций сейсмической активности, вызванным сильно неравновесным состоянием системы.

Таким образом, появление статистического самоподобия во временном ходе сейсмической кинетики перед сильным землетрясением в его очаговой области оказывается теоретически обоснованным эффектом, который приобретает смысл закономерного этапа в процессе подготовки сильного землетрясения, а следовательно, имеет и прогностическое значение. Спектр сингулярностей мультифрактальной меры, моделирующей ряд времен ожидания в период сильно неравновесного состояния среды, становится содержательной характеристикой сейсмической кинетики, описывающей упорядочивание сейсмического процесса во времени перед сильным землетрясением. Структура ряда времен ожидания чувствительна прежде всего к процессу приближения сейсмогенерирующей системы к моменту потери глобальной устойчивости. По всей видимости, время следует считать конструктивным фактором сейсмического процесса, а моменты сейсмических событий — моментами качественных изменений сейсмогенерирующей системы, ведущих к ее разрушению (сильному землетрясению).

Список литературы

1. Prigogine I. *From being to becoming*. San Francisco: W.H. Freeman and Co., 1980. 200 p.
2. Bak P., Tang C. Earthquakes as self-organized criticality. *J. Geophys. Res.*, 1989, vol. 94, no. 15, pp. 635–637.
3. Lovejoy S., Mandelbrot B. Fractal properties of rain, and a fractal model. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 1985, vol. 37, no. 3, pp. 209–232.
4. Godano C., Tosi P., Derubeis V., Augliera P. Scaling properties of the spatio-temporal distribution of earthquakes: A multifractal approach applied to a Californian catalogue. *Geophys. J. Int.*, 1999, vol. 136, no. 1, pp. 99–108.
5. Стаховский И.Р., Белоусов Т.П. Масштабные инварианты в сейсмотектонике. *Доклады Академии Наук*. 1996. Т. 347. №2. С. 252–255.
6. Стаховский И.Р. Структурная модель взаимосвязи сейсмических скейлингов и обобщенный скейлинговый закон сейсмичности. *Письма в ЖЭТФ*. 2019. Т. 109. № 12. С. 852–857.
7. Hutton L. K., Woessner J., Hauksson E. Seventy-seven years (1932–2009) of earthquake monitoring in southern California. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2010, vol. 100, no. 2, pp. 423–446.
8. Barnhart W.D., Hayes G.P., Gold R.D. The July 2019 Ridgecrest, California, earthquake sequence: kinematics of slip and stressing in cross-fault ruptures. *Geophysical Research Letters.*, 2019, vol. 46, no. 21, pp. 11859–11867.
9. Telesca L., Lapenna V., Macchiato M. Multifractal fluctuations in seismic interspike series. *Physica A*, 2005, vol. 354, pp. 629–640.
10. Стаховский И.Р. Реконструкция аттрактора по временному ряду информационной энтропии процесса сейсмической кинетики. *Физика Земли*. 2016. № 5. С.120–133.

References

1. Prigogine I. *From being to becoming*. San Francisco: W.H. Freeman and Co. 1980. 200 P.
2. Bak P., Tang C. Earthquakes as self-organized criticality. *J. Geophys. Res.*, 1989, vol. 94, no. 15, pp. 635–637.
3. Lovejoy S., Mandelbrot B. Fractal properties of rain, and a fractal model. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, vol. 37, no. 3, pp. 209–232.

4. Godano C., Tosi P., Derubeis V., Augliera P. Scaling properties of the spatio-temporal distribution of earthquakes: A multifractal approach applied to a Californian catalogue. *Geophys. J. Int.*, 1999, vol. 136, no. 1, pp. 99–108.
5. Stakhovsky I.R., Belousov T.P. Scale invariants in seismotectonics. *Dokl. Akad. Nauk.*, 1996, vol. 347, no. 2, pp. 252–255.
6. Stakhovsky I.R. Structural model of the relation between seismic scalings and the generalized scaling law of seismicity. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters (JETP Letters)*, 2019, vol. 109, no. 12, pp. 816–820.
7. Hutton L. K., Woessner J., Hauksson E. Seventy-seven years (1932–2009) of earthquake monitoring in southern California. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2010, vol. 100, no. 2, pp. 423–446.
8. Barnhart W.D., Hayes G.P., Gold R.D. The July 2019 Ridgecrest, California, earthquake sequence: kinematics of slip and stressing in cross-fault ruptures. *Geophysical Research Letters*, 2019, vol. 46, no. 21, pp. 11859–11867.
9. Telesca L., Lapenna V., Macchiato M. Multifractal fluctuations in seismic interspike series. *Physica A*, 2005, vol. 354, pp. 629–640.
10. Stakhovsky I.R. Attractor reconstruction from the time series of information entropy of seismic kinetics process. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2016, vol. 52, no. 5, pp. 740–753.

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. Диссипативные структуры сейсмической кинетики. *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия*. 2020. № 3. С. 58–64.

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. Dissipative structures of seismic kinetics. *Space, Time and Fundamental Interactions*, 2020, no. 3, pp. 58–64.