

УДК 550.34.01+550.348.436

© Стаховский И. Р., 2019

ВЗАИМОСВЯЗЬ СЕЙСМИЧЕСКИХ СКЕЙЛИНГОВ НА ПРИМЕРЕ СЕЙСМИЧНОСТИ ОСТРОВА КЮСЮ (ЯПОНИЯ)Стаховский И. Р.^{a,1}^a Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва, 123242, Россия

В статье представлены результаты мультифрактального анализа сейсмичности острова Кюсю (Япония). Показано, что сейсмический процесс острова Кюсю характеризуется взаимосвязанными скейлингами пространственных распределений сейсмичности и повторяемости землетрясений. Вычислены количественные соотношения между этими скейлингами.

Ключевые слова: мультифрактальное поле, сейсмичность, индекс сингулярности, спектр сингулярностей, график повторяемости.

SEISMIC SCALINGS INTERRELATIONSHIP BY THE REFERENCE TO SEISMICITY OF KYUSHU ISLAND (JAPAN)Stakhovsky 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 seismicity of Kyushu island (Japan) are presented. It is shown that seismic process of Kyushu island is characterized by interrelated scalings of seismicity spatial distributions and repeatability of earthquakes. The quantitative relations between these scalings are calculated.

Keywords: multifractal field, seismicity, singularity index, singularity spectrum, frequency-magnitude relation of earthquakes.

PACS: 91.30. - f, 91.30.Px

DOI: 10.17238/issn2226-8812.2019.1.76-81

Введение

Неравновесный характер сейсмического процесса приводит к масштабной инвариантности физических полей, порождаемых сейсмогенерирующей системой. Так, сейсмический процесс обладает скейлингом повторяемости землетрясений, описываемый законом Гутенберга-Рихтера [1], который может быть выражен соотношением:

$$E \propto N^{-\omega} \quad (1)$$

N — число землетрясений с сейсмической энергией E , ω — константа, обычно интерпретируемая как "наклон графика повторяемости". Кроме того, сейсмический процесс обладает локальными и глобальными скейлингами пространственных распределений эпицентров землетрясений и сейсмической энергии, что установлено с помощью мультифрактального анализа данных сейсмических каталогов [2, 3, 4]). В работе [5] методом математического моделирования получены количественные соотношения, связывающие эти формы сейсмических скейлингов. Соотношения имеют вид:

¹E-mail: stakhov@ifz.ru

$$a_i^E = \omega a_i^S + const, \quad (2)$$

$$f(a^E) = f(a^S), \quad (3)$$

где a_i^E — индексы сингулярности мультифрактальной меры, моделирующей пространственное распределение сейсмической энергии (сейсмоэнергетического поля), a_i^S — индексы сингулярности мультифрактальной меры, моделирующей пространственное распределение сейсмических эпицентров (сейсмического поля), ω — абсолютное значение наклона графика повторяемости в энергетической форме (т.е. в форме (1)), $f(a^E)$ и $f(a^S)$ — спектры сингулярностей соответствующих полей, $const$ — эмпирическая константа, i — порядковый индекс боксов (ячеек) масштабной сетки. Индекс сингулярности определяется как:

$$a_i = \lim_{r \rightarrow 0} p_i / r \quad (4)$$

где p_i — содержание меры в i -том боксе масштабной сетки, r — размер бокса (масштаб). Соотношения (2)–(3) были проверены с помощью структурного анализа данных Южно-Калифорнийского сейсмологического каталога (каталога SCEDC — Southern California Earthquake Data Center) [5], однако вопрос об их универсальности может быть решен только путем их проверки и подтверждения по данным сейсмических каталогов разных сейсмоактивных регионов.

Ниже приводятся результаты проверки соотношений (2)–(3) с использованием данных каталога японской сейсмологической сети КиК-net. Проверка проведена несколькими независимыми методами. Показано, что для сейсмического процесса острова Кюсю (Япония) соотношения (2)–(3) выполняются.

1. Исходные данные

Основная масса японских землетрясений происходит вдоль океанического желоба, расположенного восточнее сухопутных границ японских островов. Среди областей интенсивной внутриостровной сейсмичности выделяется остров Кюсю — наиболее южный из крупных японских островов. В данной работе структурный анализ сейсмичности острова Кюсю проводился в рамках границ полигона размером $\approx 100 \times 100$ км (координаты 33.29° – 32.38° N, 130.52° – 131.58° E), сейсмический режим которого определяется в основном геодинамической активностью разлома Футагава-Хинагу. За инструментальный период сильнейшее из произошедших в этой области сейсмических событий — землетрясение Кумамото (16.04.2016, $M = 6.5$, $H = 12$ км).

В расчетах использовались данные каталога сейсмологической сети КиК-net, одной из нескольких сейсмологических сетей, покрывающих территорию Японии. Сеть КиК-net объединяет сейсмостанции, оборудованные двумя широкополосными сейсмографами, один из которых установлен на поверхности Земли, а второй — в скважине на глубине порядка 100 м, что повышает точность определения параметров сейсмических событий и снижает влияние паразитных шумов. Сеть КиК-net ориентирована на запись и систематизацию информации о слабых событиях. Исследованная выборка данных каталога содержала порядка 1000-и событий в диапазоне магнитуд $2.5 \leq M \leq 6.5$ за период 1996-2018 гг.

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, а E — сейсмоэнергетическому полю. Содержание этих мер в i -тых боксах масштабной сетки оценивалось с помощью нормировки:

$$p_i^S = N_i / N_0, \quad (5)$$

$$p_i^E = E_i / E_0, \quad (6)$$

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. Обработка данных осуществлялась с помощью алгоритмов мультимасштабного анализа (box-counting и method of multipliers), реализованных для компиляторов Turbo C и Free Pascal.

2. Результаты расчетов

Соотношение (2) показывает, что параметры локального скейлинга сейсмического и сейсмоэнергетического полей в каждой точке связаны линейно, причем коэффициентом пропорциональности является ω - абсолютное значение наклона графика повторяемости в энергетической форме. Соотношение (3) показывает, что спектры сингулярностей ($f(a)$ -спектры) сейсмического и сейсмоэнергетического полей связаны аффинными преобразованиями растяжения и сдвига (т.е. с помощью преобразований растяжения и сдвига один спектр может быть преобразован в другой). Следствием линейной зависимости (2) является равенство:

$$\omega = \frac{a_{i_1}^E - a_{i_2}^E}{a_{i_1}^S - a_{i_2}^S}, \quad (7)$$

где i_1 и i_2 — произвольные точки сейсмического и сейсмоэнергетического полей, имеющие одинаковые координаты. В частности, если максимальные и минимальные значения индексов сингулярности относятся к одним и тем же боксам масштабной сетки, то формула (6) может быть записана в виде:

$$\omega = \frac{a_{max}^E - a_{min}^E}{a_{max}^S - a_{min}^S}, \quad (8)$$

где a_{max} и a_{min} — максимальные и минимальные значения индексов сингулярности соответствующих полей. Это условие автоматически выполняется в проверяемой модели [5], но в реальных выборках данных может нарушаться в силу ограниченного объема данных в выборке (в силу нехватки данных).

Перечисленные свойства соотношений (2)–(3) допускают прямую экспериментальную проверку по сейсмическим данным. Так, на рис. 1а показано пространственное распределение эпицентров землетрясений в пределах исследовавшегося полигона. Рис. 1б представляет традиционный график повторяемости землетрясений (в энергетической форме). Прямая линия на рис. 1б – график линейной регрессии, аппроксимирующий данные каталога (точки). Абсолютное значение коэффициента регрессии можно рассматривать как оценку величины параметра ω , полученную с помощью построения графика повторяемости. В данном случае $\omega = 2.022 \dots$

На рис. 1с представлены $f(a)$ -спектры сейсмического и сейсмоэнергетического полей, построенных для исследовавшейся выборки. Максимальные и минимальные значения индексов сингулярности (т.е. точек, в которых ветви спектров достигают оси абсцисс) составили: $a_{max}^E = 7.401 \dots$, $a_{min}^E = 0.260 \dots$, $a_{max}^S = 3.990 \dots$, $a_{min}^S = 0.550 \dots$. Подставляя эти значения в (7), получаем вторую оценку параметра ω : $\omega = 2.075 \dots$, причем в данном случае ω или "наклон графика повторяемости" (в энергетической форме) определен без построения самого графика повторяемости, т.е. на основе анализа исключительно пространственных распределений сейсмичности. Как видим, в данном случае условие (7) выполняется.

На рис. 1д показан $f(a)$ -спектр сейсмоэнергетического поля (сплошная линия) и $f(a)$ -спектр сейсмического поля (точки), преобразованный в соответствии с соотношениями (2)–(3), т.е. подвергнутый преобразованиям растяжения и сдвига. Параметр растяжения определен выше: $\omega = 2.075 \dots$. Параметр сдвига $const$ (2) может быть вычислен разными способами в зависимости от метода минимизации невязок между спектрами. Учитывая сложную форму спектров, наилучшие результаты в данном случае дают не формальные методы подбора параметра сдвига (метод наименьших квадратов, метод Колмогорова или аналогичные методы), а компьютерный перебор значений, минимизирующий невязки между вычисленными точками спектров (поскольку абсцис-

сы этих точек не совпадают). На рис. 1d показан $f(a)$ -спектр сейсмического поля, преобразованный со значением $const = -1.120\dots$

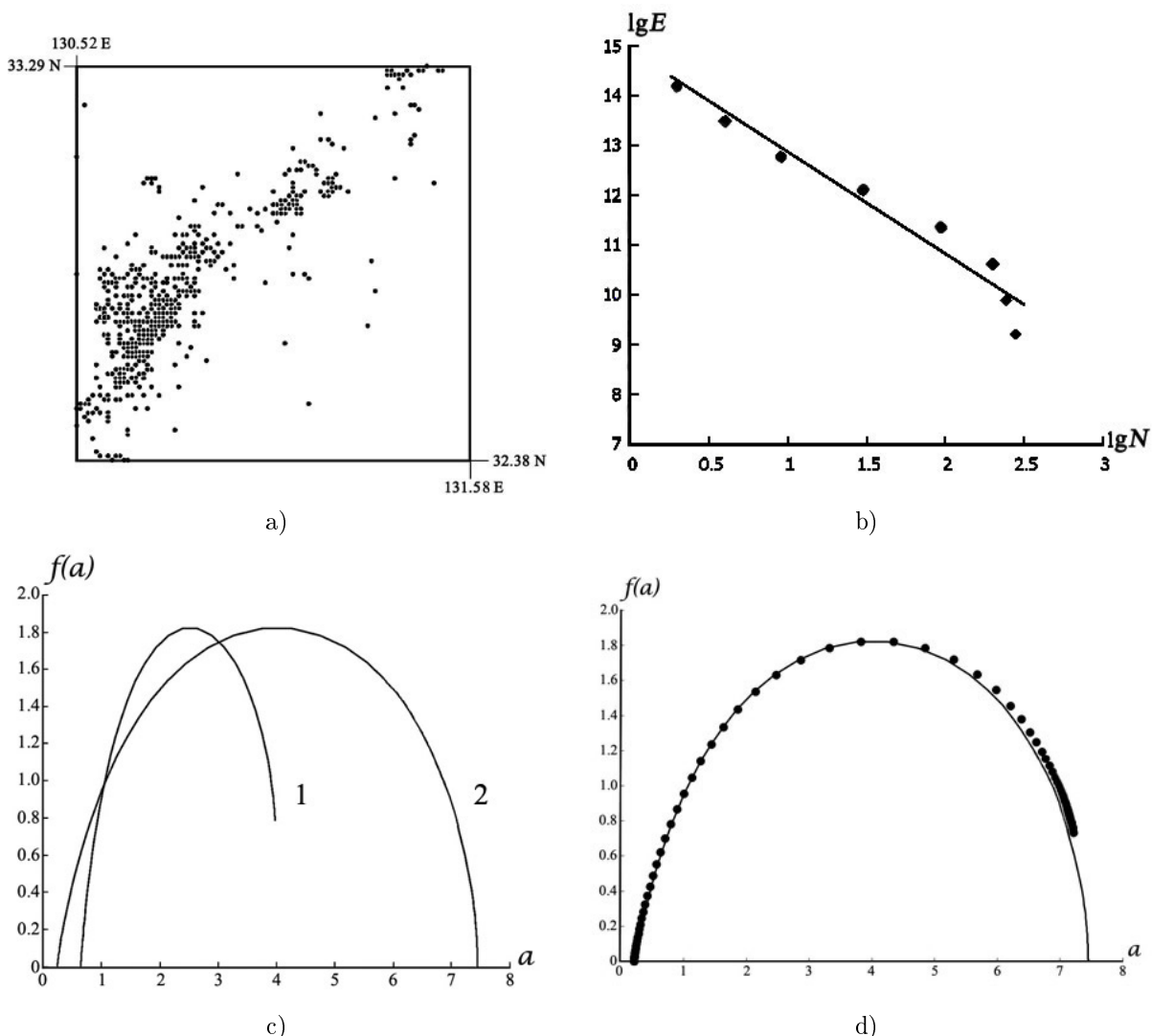


Рис. 1. а) Пространственное распределение эпицентров землетрясений на исследовавшемся полигоне, б) График повторяемости в энергетической форме для исследовавшейся выборки данных, точки - данные каталога, прямая линия - график линейной регрессии, построенной по этим данным, в) Спектры сингулярностей сейсмического (1) и сейсмoэнергетического (2) полей, д) Результат наложения спектра сингулярностей сейсмического поля (точки) после преобразования растяжения и сдвига на спектр сингулярностей сейсмoэнергетического поля (сплошная линия).

Рис. 1d демонстрирует, что после преобразования растяжения и сдвига $f(a)$ -спектр сейсмического поля практически совпадает с $f(a)$ -спектром сейсмoэнергетического поля. Незначительное расхождение правых ветвей спектров объясняется нехваткой данных: форма правых ветвей $f(a)$ -спектров определяется боксами масштабной сетки с наименьшим содержанием меры, что приводит к повышенным погрешностям и искажениям формы ветвей (в частности, нехватка данных не позволяет довести правую ветвь $f(a)$ -спектра сейсмического поля до оси абсцисс, т.е. приводит к разрыву скейлинга). Однако расхождение правых ветвей спектров в данном случае меньше погрешностей построения самих ветвей спектров.

Еще один способ проверки соотношений (2)–(3) заключается в построении непосредственной зависимости a_i^E от a_i^S в соответствии с выражением (2). Поскольку индексы сингулярности являются предельными характеристиками (4), а на сетках низкого разрешения оценить пределы (4)

невозможно, значения a_i аппроксимировались их приближенными оценками $a_i = \lim_{r \rightarrow 0} p_i/r \approx p_i/r$. График зависимости a_i^E от a_i^S представлен на рис. 2. Необходимость использования приближенных значений a_i приводит к заметному разбросу точек на рис. 2, однако статистически множество точек сохраняет проверяемую зависимость. Линейная регрессия (график которой представлен на рис. 2 прямой линией) имеет коэффициент регрессии, равный $\omega = 2.091 \dots$

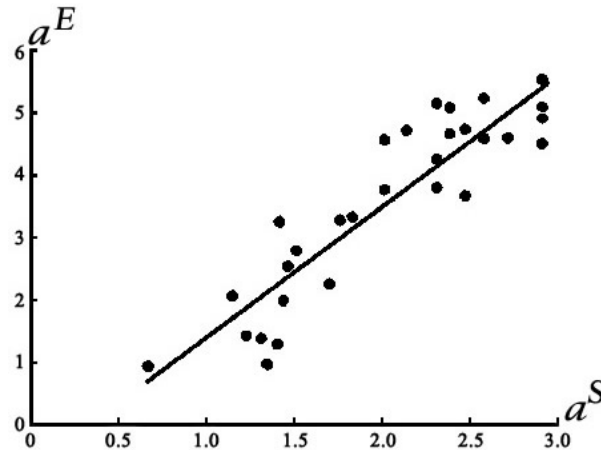


Рис. 2. График зависимости a_i^E от a_i^S для всех непустых боксов масштабной сетки (кроме боксов, содержащих только по одному событию, т.е. непредставительных для статистического анализа). Прямая линия – график линейной регрессии, построенной по этим точкам.

Как видим, оценки параметра ω , полученные тремя независимыми методами, различаются только в третьем знаке, а $f(a)$ -спектры сейсмического и сейсмоэнергетического полей могут быть преобразованы один в другой с помощью аффинных операций растяжения и сдвига. Это позволяет утверждать, что внутриостровная сейсмичность Японии на исследованном полигоне подчиняется соотношениям (2)–(3) в пределах погрешностей имеющихся данных.

Заключение

Соотношения (2)–(3) показывают взаимосвязь всех известных на сегодня форм сейсмического скейлинга (кроме временного). Соотношение (2) связывает три формы сейсмического скейлинга: скейлинг повторяемости землетрясений ω , локальный скейлинг пространственного распределения эпицентров землетрясений a_i^S и локальный скейлинг пространственного распределения сейсмической энергии a_i^E . Соотношение (3) связывает глобальные скейлинги сейсмического и сейсмоэнергетического полей. Таким образом, соотношения (2)–(3) можно рассматривать как условия одновременного выполнения пространственных скейлингов и скейлинга повторяемости сейсмических событий в едином сейсмическом процессе.

Взаимосвязь сейсмических скейлингов (2)–(3) существенно отличается от закона Гутенберга-Рихтера тем, что устанавливает соотношения между параметрами пространственных распределений эпицентров землетрясений и их сейсмической энергии (закон Гутенберга-Рихтера (1) не содержит пространственных параметров сейсмичности). Возможность определения "наклона графика повторяемости" ω без построения самого графика повторяемости (а только с помощью анализа пространственных распределений сейсмичности) качественно расширяет физический смысл параметра ω по сравнению с его значением в формуле (1): параметр ω связывает сейсмическое и сейсмоэнергетическое поля в каждой точке, где значения полей отличны от нуля.

Результаты работы позволяют говорить, что взаимосвязь сейсмических скейлингов имеет характер закономерности, не зависящей от тектоники или географии сейсмоактивного региона. Соотношения (2)–(3) характеризуют неравновесную природу сейсмичности, а параметр ω по сути является количественной мерой "степени неравновесности" сейсмического процесса. По всей види-

мости, соотношения (2)–(3) следует воспринимать как универсальный закон сейсмического процесса, который может быть назван обобщенным скейлинговым законом сейсмичности.

Список литературы

1. Gutenberg B., Richter C.F. Magnitude and Energy of Earthquakes. *Annali di Geofisica*. 1956; vol. 9. № 1: S. 15–20.
2. Geilikman M.B., Golubeva T.V., Pisarenko V.F. Multifractal patterns of seismicity. *Earth and Planetary Science Letters*. 1990; vol. 99. № 1/2: S. 127–132.
3. Hooge C., Lovejoy S., Pecknold S., Malouin F., Schertzer D. Universal multifractals in seismicity. *Fractals*. 1994; vol. 2. № 3: S. 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. Стаховский И.Р. Согласование скейлингов сейсмического и сейсмозонетического полей земной коры // *Физика Земли*. 2004. № 11. С. 38–46.

References

1. Gutenberg B., Richter C.F. Magnitude and Energy of Earthquakes. *Annali di Geofisica*, 1956, vol. 9, no. 1, pp. 15–20.
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. (in Russian)
5. Stakhovsky I. R. Scaling correspondence between seismic and seismic energy fields of the earth crust. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2004, vol. 40, no. 11, pp. 927–934. (in Russian)

Авторы

Игорь Ростиславович Стаховский, 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 ссылаться на эту статью следующим образом:

Стаховский И. Р. Взаимосвязь сейсмических скейлингов на примере сейсмичности острова Кюсю (Япония) // *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия*. 2019. № 1. С. 76–81.

Authors

Igor R. Stakhovsky, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, leading 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. Seismic scalings interrelationship by the reference to seismicity of Kyushu island (Japan). *Space, Time and Fundamental Interactions*, 2019, no. 1, pp. 76–81.