

В. М. Урицкий, В. Н. Троян

## ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ФРАКТАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ ПРИ КРУПНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ

Одним из перспективных методов прогноза крупных сейсмических событий является анализ изменений пространственной структуры фоновой региональной сейсмичности (слабых и умеренных землетрясений). В основе метода лежат представления о долговременной перестройке сейсмического режима на подготовительной стадии крупных землетрясений, включающей процессы перераспределения тектонических напряжений в области очага [1–3]. Эти процессы могут приводить к возникновению областей сейсмического затишья, появлению предвестниковых роев землетрясений, формированию кольцевой активности и группированию сейсмичности [4–7]. Перечисленные явления сопровождаются отчетливо выраженными изменениями геометрии активности исследуемых регионов, количественный анализ которой проводится исходя из формы проявления предвестника [8–11].

Общим признаком аномалий в расположении эпицентров фоновой сейсмичности в периоды времени перед мощными толчками может считаться повышенный уровень ее кластеризации, поскольку характерные для этих периодов зоны разрежения и сгущения в распределении сейсмической активности вблизи назревающего катастрофического землетрясения могут рассматриваться как различные проявления процесса увеличения статистической корреляции эпицентров в масштабах региона. Ввиду этого поиск адекватной количественной меры сейсмической кластеризации является актуальной задачей прогноза землетрясений.

Одно из решений указанной задачи состоит в применении к исследованию топологии региональной сейсмичности методов фрактального анализа [12]. Было показано, что в общем случае статистика распределения эпицентров описывается масштабнo-инвариантными соотношениями, включающими параметр дробной (фрактальной) размерности, который служит основной характеристикой геометрической кластеризации событий [13, 14]. Однако до сих пор фрактальные подходы использовались лишь для изучения периодов относительно стационарной сейсмической активности и не рассматривались в качестве предвестника сейсмических катастроф. В настоящей работе впервые исследуется возможность применения критерия фрактальной размерности в качестве локальной количественной характеристики измененного режима кластеризации перед наступлением крупных землетрясений.

### Методы обработки данных

В работе проведен анализ данных всемирного каталога землетрясений PDE, включающего около двухсот тысяч значимых сейсмических событий, зарегистрированных с начала века.

В качестве главных толчков рассматривались землетрясения с магнитудой  $M > 6,8$ . За исследованный период (1966–1994 гг.) было выделено 23 таких события, относящихся к разным сейсмически активным регионам. Анализ фоновой сейсмичности включал исследование статистики распределения умеренных землетрясений ( $3,5 < M < 6,0$ ) в областях  $400 \times 400$  км с центром в окрестности главного толчка. Для каждого катастрофического землетрясения строились две выборки данных, по-

звolyающие сравнить локальную топологию региональной сейсмичности в последние два года перед контрольным землетрясением события и за такой же период времени после его наступления. В зависимости от уровня региональной активности число анализируемых событий в сопоставляемых выборках колебалось в пределах от 80 до 400.

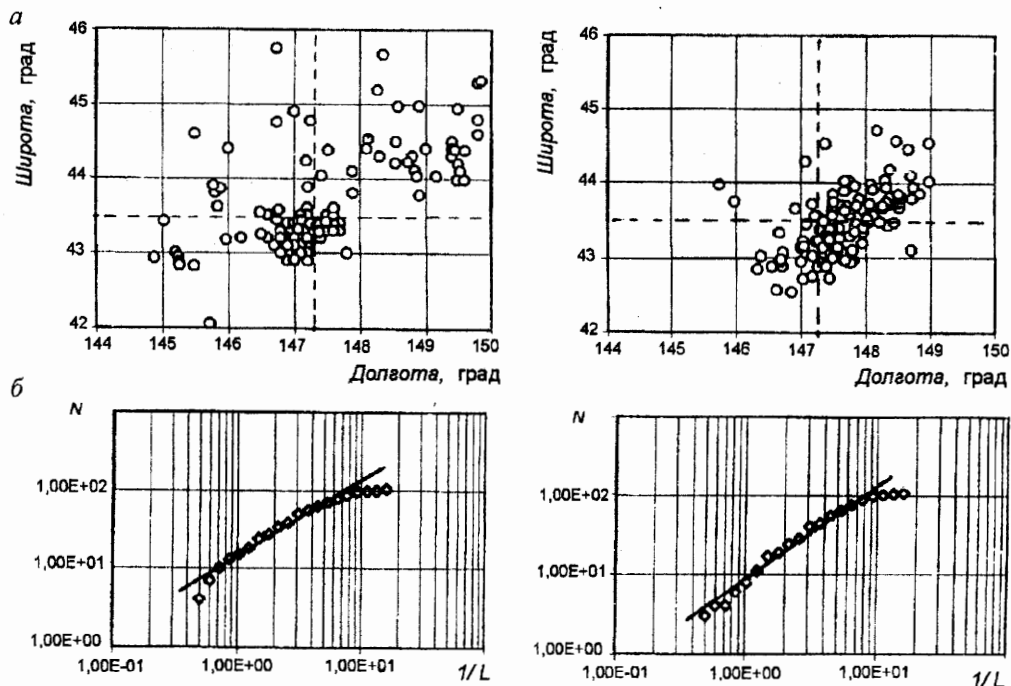
Фрактальная размерность распределений эпицентров определялась по клеточному методу [12] с применением стандартного алгоритма подсчета заполненных событиями ячеек разного масштаба. С этой целью карта исследуемого региона разбивалась на квадратные области с линейным размером  $L$ . Определялось число  $N$  непустых областей, содержащих по крайней мере один эпицентр. Эта процедура повторялась многократно для разных значений параметра масштаба  $L$ , менявшегося в пределах 6–250 км. Известно [13, 14], что для масштабно-инвариантного распределения точек на плоскости значение  $N$  связано с размером ячеек зависимостью  $N \sim (1/L)^D$ , где  $D$  — фрактальная размерность исследуемого геометрического объекта. В соответствии с этой закономерностью, основой для определения размерности служит график функции  $N(1/L)$ , построенный в логарифмических координатах. На интервале масштабов, отвечающем фрактальной статистике эпицентров, график имеет вид прямой линии с коэффициентом наклона, равным  $D$ , что позволяет оценить фрактальную размерность по формулам линейной регрессии.

Параметр  $D$  связан с кластеризацией эпицентров следующим образом. Установлено [13], что максимальное значение фрактальной размерности  $D = 2$  является характеристикой полностью случайного или однородного распределения точечных событий на плоскости. При появлении эффекта группировки точек размерность снижается и для наиболее структурированных множеств может достигать значения  $D = 1$ . Таким образом, фрактальная размерность служит обратной мерой кластеризации эпицентров: чем ниже  $D$ , тем выше степень их пространственной корреляции.

### Результаты и обсуждение

Полученные данные показывают наличие устойчивой тенденции к увеличению фрактальной размерности распределения эпицентров фоновой сейсмичности с приходом главного толчка. В абсолютном большинстве наблюдений (16 случаев из 23) фрактальная размерность, характеризующая двухлетний период, предшествовавший крупному землетрясению, оказалась ниже этого значения в период последствия. По непараметрическому критерию знаков этот результат может считаться достоверным ( $p = 0,05$ ). Количественное отличие фрактальных оценок не столь наглядно: среднее по изученным выборкам событий значение размерности в интервалы времени до главных толчков составило  $1,14 \pm 0,04$ ; после —  $1,22 \pm 0,04$ . Отчасти это связано с межрегиональной неоднородностью фрактальной топологии распределения эпицентров. Следует также учесть, что в статистику были включены все крупные землетрясения периода 1966–1994 гг., без их селекции по признаку фактического наличия предвестниковой перегруппировки фоновой сейсмичности.

Для иллюстрации обсуждаемой закономерности на рисунке приведены карты эпицентров и результаты фрактального анализа распределения сейсмических событий в районе восточного побережья о. Хоккайдо до и после землетрясения с магнитудой  $M=7,1$ , зарегистрированного 11 августа 1969 г. Расположение очагов на стадии накопления тектонических напряжений имеет неоднородный фрактальный вид, поскольку включает кластеры различного масштаба (главный кластер слева от эпицентра ожидаемого события и малые кластеры по периферии области). Наблюдаются также области сейсмического затишья в характерном окружении кольцевой



Изменение пространственной фрактальной структуры распределения эпицентров умеренных землетрясений при наступлении крупного сейсмического события.

а — расположение эпицентров у восточного побережья о. Хоккайдо за двухлетние периоды до (слева) и после (справа) события 11 августа 1969 г.; отмечено положение эпицентра главного толчка; б — зависимость числа заполненных измерительных ячеек  $N$  от их обратного линейного размера  $L$  (град) для приведенных в верхней части рисунка распределений эпицентров.

сейсмичности. Размерность этого геометрического объекта составила 1,05, что говорит о высокой степени его статистической упорядоченности. В период после главного толчка распределение фоновой сейсмичности стало существенно более гомогенным, что закономерно привело к увеличению фрактальной размерности до 1,35.

В целом результаты работы согласуются с высказанным нами предположением об усилении фрактальной кластеризации как ведущем признаке пространственной перестройки фоновой сейсмичности на подготовительном этапе крупных землетрясений. Следующим шагом проверки этой гипотезы может стать непосредственное сопоставление данных фрактального анализа с результатами традиционных подходов к определению аномалий в распределении эпицентров региональной сейсмической активности.

С практической точки зрения, полученные данные указывают на возможность использования фрактального анализа в целях прогноза крупных землетрясений. Принципиальная новизна такого подхода заключается в сведении многофакторной задачи исследования топологии очагов к единственному управляющему параметру — фрактальной размерности, рассматриваемой в роли предвестника.

#### Указатель литературы

1. Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1979. 388 с.
2. Касагара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.

3. *Lay T., Terry C.* Modern global seismology. N. Y.: Academic Press, 1995. 522 p.
4. *Mogi K.* Two kinds of seismic gaps // PAGEOPH. 1979. Vol. 117. P. 131-144.
5. *Wyss M., Haberman R. E.* Precursory seismic quiescence // Pure Appl. Geophys. 1988. Vol. 126. P. 319-332.
6. *Schreider S. Yu.* Formal definition of premonitory seismic quiescence // Phys. Earth Planet. Int. 1990. Vol. 61. P. 113-127.
7. *Papadimitriou E. E., Papazachos B. C.* Seismicity gaps in Aegean and surrounding area // Boll. Geoph. Teor. Appl. 1985. Vol. 27. N 107. P. 3-16.
8. *Ковачев С. А., Кузин И. П.* О сейсмологическом подходе к прогнозированию сильных землетрясений в области эллинской дуги // Физика Земли. 1997. № 12. С. 23-36.
9. *Соболев Г. А., Кольцов А. В.* Крупномасштабное моделирование подготовки и предвестников землетрясений. М.: Наука, 1985. 205 с.
10. *Соболев Г. А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
11. *Акопян С. Ц.* Количественное описание сейсмических процессов на основе сейсмической энтропии // Физика Земли. 1998. № 1. С. 11-26.
12. *Mandelbrot B. B.* The fractal geometry of Nature. San Francisco: Freeman and Co., 1982.
13. *Turcotte D. L.* Fractals and chaos in geology and geophysics. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 400 p.
14. *Luongo G., Mazzarella A., Palumbo A.* A fractal approach to clustering of the 1983-1984 seismicity in the Campi Flegrei Caldera, South Italy // Fractals. Vol. 4. № 1. 1996. P. 29-34.