

Фрактальный анализ сейсмичности территории Азербайджана

Н.Р. Карагезова, 2020

Институт геологии и геофизики НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан

Поступила 16 декабря 2019 г.

Исследованы проявления самоподобия в распределении землетрясений, зарегистрированных в Азербайджане и на сопредельных территориях в течение инструментального периода с 1902 по 2018 г. На территории Азербайджанской Республики, большинство регионов которой сейсмически активны, за весь инструментальный период регистрировались сейсмические события в широком диапазоне магнитуд ($3 \leq M < 7,3$). Анализ распределения землетрясений проведен с применением фрактальной теории, основу которой составляют выявление самоподобия в исследуемом процессе и количественная оценка статистического самоподобия. В качестве базы данных использован сводный сейсмический каталог за 1902—2018 гг., составленный на основе данных о параметрах землетрясений отечественных каталогов (данные Республиканского центра Сейсмологической службы НАН Азербайджана) и каталогов землетрясений известных мировых сейсмологических центров.

В результате для выборки сейсмических событий, зафиксированных на территории Азербайджана, рассчитаны фрактальные размерности (количественные характеристики самоподобия) распределения сейсмических событий по энергиям и эпицентрам. Значение фрактальной размерности распределения землетрясений по эпицентрам (D_e) составляет 1,63, а среднее значение рассчитанного показателя фрактальной размерности распределения землетрясений по энергиям (d) — 0,54.

Наряду с этим на основе данных сводного сейсмического каталога получены закон повторяемости землетрясений Гутенберга—Рихтера и значение параметра b для распределения сейсмических событий Азербайджана и сопредельных территорий. Дан анализ статистических соотношений рассчитанных фрактальных размерностей распределения землетрясений по энергиям (d) и эпицентрам (D_e).

Ключевые слова: сейсмичность Азербайджана, соотношение Гутенберга—Рихтера, параметр b , фрактальная размерность, распределение землетрясений.

Введение. Территория Азербайджана представляет собой часть Альпийско-Гималайского складчато-орогенного пояса. Большая часть территории является сейсмически активной, а отдельные регионы Республики оцениваются как зоны с высокими сейсмическими рисками. Высокая сейсмическая опасность характерна, к примеру, для зон, расположенных в области пересечения Астара-Гызылагадж-Вандамского глубинного разлома с разломом Балакан-Исмаиллы [Агамирзоев, 1987].

Изучались фрактальные свойства распределения землетрясений Азербайджана, произошедших за инструментальный период (1902—2018), с магнитудами $3 \leq M < 7,3$.

Для анализа фрактальных (самоподобных) свойств в распределении сейсмических событий использовались фрактальные показатели сейсмичности, дающие количественную оценку распределения землетрясений. Рассчитывались фрактальные размерности распределения землетрясений по энергиям и эпицентрам, а также закон повторяемости Гутенберга—Рихтера и значение параметра b для распределения землетрясений Азербайджана и сопредельных территорий.

Для вычисления фрактальных показателей сейсмичности на основе данных отечественных (Республиканский центр сейсмологической службы НАН Азербайджана) и

мировых сейсмологических центров был составлен сводный каталог. В частности, использовались данные по параметрам землетрясений каталога Геофизического центра РАН под редакцией А.А. Годзиковской, каталоги Европейского Средиземноморского Сейсмологического Центра (EMSC) и Американской Национальной Сейсмической Службы (ANSS), а также сейсмические каталоги СТВТО и IRIS.

Методика расчета фрактального показателя распределения землетрясений по энергиям. Для вычисления фрактального показателя распределения землетрясений по энергиям применялись два известных в сейсмологии логарифмических соотношения: соотношение Гутенберга—Рихтера [Gutenberg, Richter, 1944] и классическая формула Рихтера, описывающая связь логарифма энергии землетрясений и магнитуды [Richter, 1958; Kanamori, Anderson, 1975].

Приведем последовательность расчета формулы определения фрактальной размерности энергетического распределения, обозначаемую как d .

Комбинируя скейлинговый закон повторяемости Гутенберга—Рихтера $\lg N = a - bM$ и соотношение, связывающее логарифм энергии землетрясений с магнитудой $\lg E = \beta M + \alpha$ (где α и β являются эмпирическими коэффициентами), получаем следующие два равенства, определяющие магнитуду:

$$M = \frac{a - \lg N}{b} \quad \text{и} \quad M = \frac{\lg E - \alpha}{\beta}.$$

Приравниваем эти соотношения:

$$\frac{a - \lg N}{b} = \frac{\lg E - \alpha}{\beta},$$

$$\beta a - \beta \lg N = b \lg E - b\alpha,$$

$$\beta a - b \lg E + b\alpha = \beta \lg N.$$

Далее выводим формулу для десятичного логарифма числа сейсмических событий N :

$$\lg N = a - \frac{b}{\beta} \lg E + \frac{b\alpha}{\beta},$$

$$\lg N = \left(a + \frac{b\alpha}{\beta} \right) - \left(\frac{b}{\beta} \right) \lg E.$$

Для упрощения записи уравнения обозначим $a + b\alpha/\beta$ как коэффициент v , а b/β как d . Следовательно, можно записать вышеприведенное уравнение в виде

$$\lg N = v - d \lg E.$$

Применяем к полученному равенству известные свойства логарифмов:

$$\begin{aligned} \lg N &= v + \lg E^{-d} = \lg 10^v + \\ &+ \lg E^{-d} = \lg 10^v E^{-d}. \end{aligned}$$

В итоге получаем степенное соотношение, показывающее, что закон, «контролирующий» распределение землетрясений по энергиям, обладает фрактальными свойствами:

$$N = 10^v E^{-d}.$$

В приведенном равенстве степенной показатель d принимается за фрактальную размерность распределения землетрясений по энергиям и соответствует отношению параметра b из закона повторяемости Гутенберга—Рихтера к эмпирическому коэффициенту β . Это позволяет нам вывести следующую формулу: $d = b/\beta$.

Определяемая таким образом и принимающая дробное значение фрактальная размерность d в целом характеризует количественное выделение сейсмической энергии в изучаемой выборке землетрясений и оценивает его фрактальную (статистически самоподобную) природу.

Определение фрактального показателя энергетического распределения землетрясений и закона Гутенберга—Рихтера для сейсмичности Азербайджана. Обратимся к карте распределения эпицентров землетрясений, зарегистрированных на территории Азербайджана и сопредельных территориях за 1902—2018 гг. (рис. 1). Карта построена на основе сводного каталога, содержащего данные по землетрясениям Азербайджана за указанный период. В 2018 г. каталог был обновлен и дополнен на основе данных международных сейсмических центров.

На карте пропорционально отражено большое количество эпицентров слабых землетрясений ($3 \leq M < 4$) и землетрясений

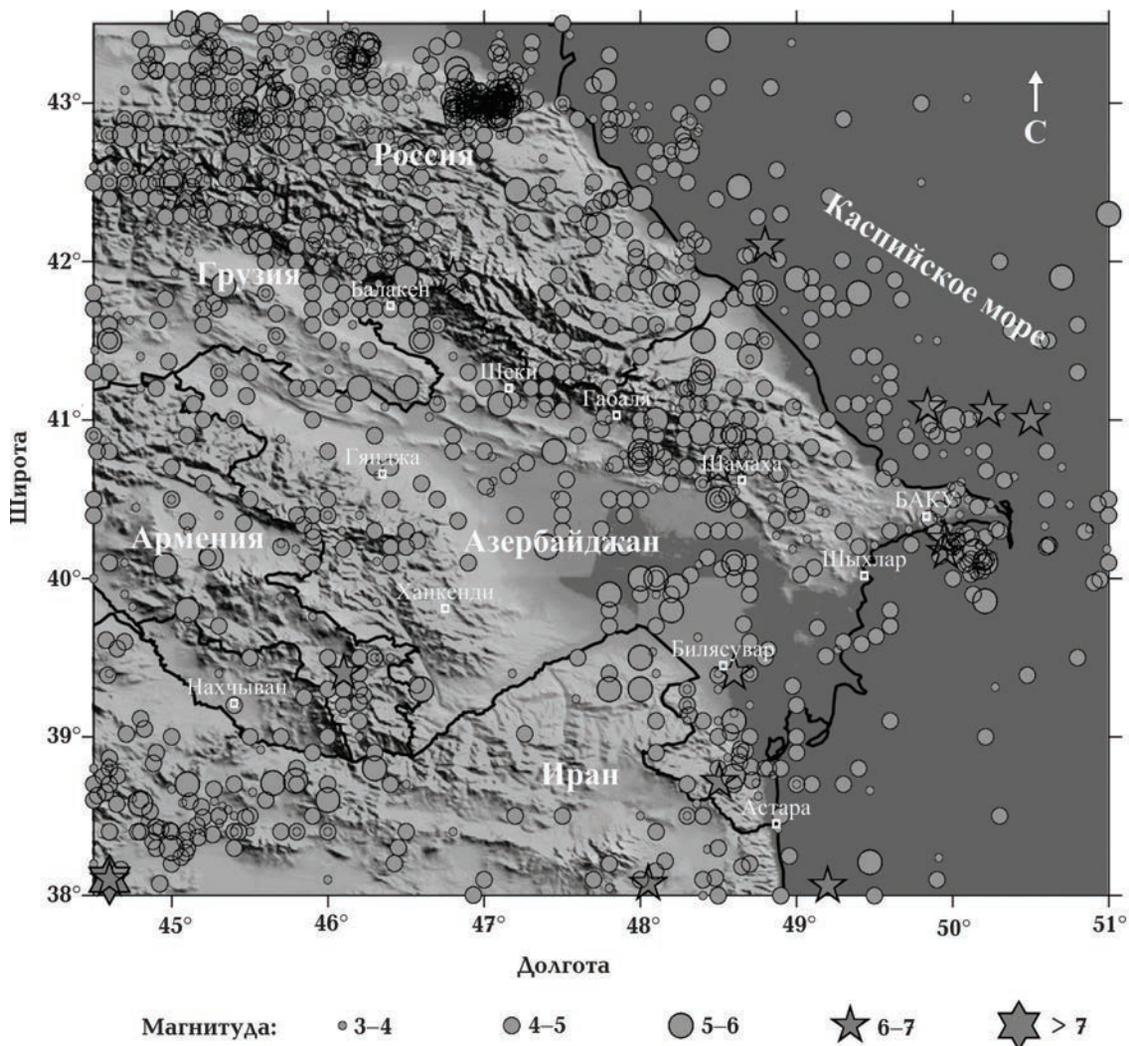


Рис. 1. Карта распределения эпицентров землетрясений Азербайджана и сопредельных территорий со значениями магнитуд в пределах $3 \leq M < 7,3$ (1902—2018).

Fig. 1. The spatial distribution of the earthquakes recorded in Azerbaijan and the adjacent territories with $3 \leq M < 7.3$ (1902—2018).

с магнитудами в пределах $4 \leq M < 5$, которые группируются в основном в полосе от Балакен до Шамаха, в прибрежной зоне Каспийского моря, на Малом Кавказе, а также в районе Зангезура и Талыша. Эпицентры сильных землетрясений с $6 \leq M < 7,3$ находятся внутри этих групп землетрясений.

В пространственной выборке также присутствует доля землетрясений, произошедших на сопредельных территориях, включая такие сейсмически активные регионы, как северо-западный Иран, Северный Кавказ, а также ряд землетрясений на территории Грузии.

Для данной выборки землетрясений был рассчитан закон повторяемости землетрясений Гутенберга—Рихтера и, соответственно, определены базовое уравнение аппроксимации и параметр b .

Параметр b из закона Гутенберга—Рихтера — это важный сейсмологический индикатор, несущий информацию о распределении землетрясений по магнитудам [Gutenberg, Richter, 1944]. Высокие значения параметра b свидетельствуют о сравнительно большей доле слабых землетрясений в исследуемой выборке, в то время как невысокие значения данного параметра указы-

вают на то, что выборка пропорционально содержит больше относительно сильных сейсмических событий. С помощью данного параметра можно косвенно оценивать напряжения земной коры [Scholz, 1968; Wyss, 1973] и определять объемы активных магматических тел [Wiemer et al., 1998].

При расчете закона повторяемости для сейсмических событий Азербайджана использовался логарифм кумулятивного числа землетрясений (N).

Соотношение Гутенберга—Рихтера для исследуемой выборки определяется уравнением аппроксимирующей прямой и принимает вид $\lg N = 5,99 - 0,81M$ (рис. 2).

Таким образом, параметр b , рассчитанный на основе построенного кумулятивного распределения землетрясений по магнитудам методом наименьших квадратов, составляет 0,81 (коэффициент детерминации $R^2 = 0,99$).

Как было показано, фрактальная размерность распределения землетрясений Азербайджана по энергиям определяется по формуле $d = b/\beta$.

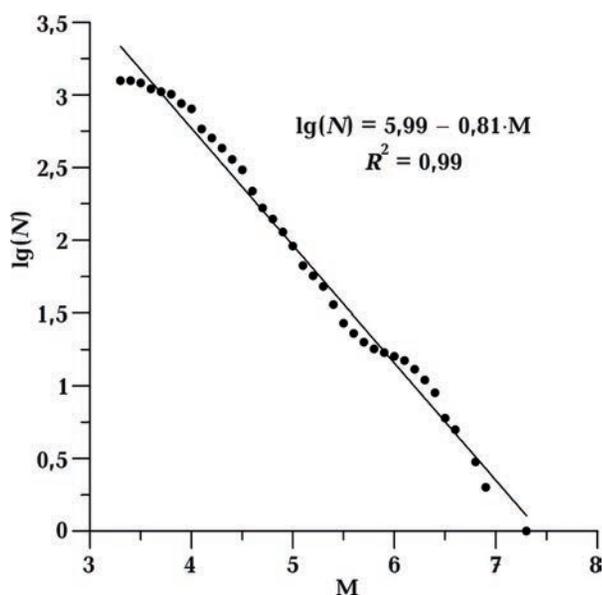


Рис. 2. График повторяемости для землетрясений Азербайджана и сопредельных территорий для $M \geq 3,3$ (1902—2018).

Fig. 2. The Gutenberg—Richter magnitude-frequency relationship for the earthquakes in Azerbaijan and the adjacent territories with $M \geq 3.3$ (1902—2018).

Показатель b служит эмпирическим коэффициентом в формуле Рихтера. Известно, что значения коэффициентов α и β в данной формуле равны соответственно 11,8 и 1,5 [Beth, 1981; Richter, 1958]. Следовательно, можно записать $\lg E = 11,8 + 1,5M$ [Richter, 1958].

Согласно проведенным для сейсмичности Кавказа эмпирическим исследованиям, если значения магнитуды $M \geq 5,5$, то β принимает значение 1,1, а для магнитуд от 5,5 и выше — 1,8 [Ризниченко, 1985]. Отсюда среднее значение β равно 1,5, и оно совпадает со значением β в формуле Рихтера.

Оценив значения b и β , можно определить фрактальную размерность энергий землетрясений для Азербайджана и сопредельных территорий по приведенной формуле расчета энергетической фрактальной размерности. В результате получаем две оценки фрактальной размерности распределения землетрясений Азербайджана по энергиям для разных диапазонов магнитуд:

- 1) для землетрясений с $M \geq 5,5$, $d = 0,81/1,1 = 0,74$;
- 2) для землетрясений с $M < 5,5$, $d = 0,81/1,8 = 0,45$.

Так как анализируемая в настоящей статье выборка содержит сейсмические события в обоих диапазонах, полагается целесообразным определить фрактальную размерность для среднего значения коэффициента β , равного 1,5 [Ризниченко, 1985].

Для среднего значения β фрактальная размерность распределения землетрясений по энергиям для Азербайджана составляет 0,54 ($d = 0,81/1,5$).

Определение фрактального показателя распределения землетрясений Азербайджана по эпицентрам. В целом фрактальная размерность распределения землетрясений по эпицентрам выражает количественную меру распределения эпицентров сейсмических событий, позволяющую определить тип пространственного распределения сейсмических событий исследуемого региона. Оценки данных фрактальных размерностей и их временных вариаций дают представление о том, насколько одно-

родно распределен сейсмический процесс и помогают выделить зоны кластеризации сейсмических событий.

В работе на основе обновленного сводного каталога исследуется фрактальный показатель эпицентрального распределения землетрясений Азербайджана.

Для определения фрактальной размерности распределения по эпицентрам (D_e) использовался клеточный метод [Falconer, 1990; Robertson et al., 1995; Turcotte, 1997; Angulo-Brown et al., 1998; Caneva, Smirnov, 2004; Захаров, 2008; Kadirov et al., 2013; Han et al., 2015; Öztürk, 2015].

Исследуемая территория покрывается сеткой клеток со стороной размером r . Далее можно получить уравнение, описывающее зависимость количества клеток N , содержащих эпицентры землетрясений, от размера стороны клетки r . Данная зависимость выражается формулой $\lg N(r) = -D_e * \lg(r) + c$ [Mandelbrot, 1982; Sander et al., 1994; Turcotte, 1997; Caneva, Smirnov, 2004; Han et al., 2015], где N — число клеток, содержащих хотя бы одно землетрясение; c — эмпирический коэффициент; r — размер стороны клетки.

Следует отметить, что рассчитанная клеточным методом фрактальная размерность не учитывает неоднородности изучаемого фрактала. Каждой клетке приписывается идентичный вес, независимо от того, какое количество эпицентров помещается в данной клетке.

Исследуемый объект имеет фрактальную структуру и для зависимости $\lg(N)$ от $\lg(r)$ можно выделить область скейлинга — диапазон значений r , для которого зависимость принимает следующий вид: $N \sim r^{-D_e}$. Степенной показатель D_e представляет собой коэффициент в формуле $\lg N(r) = -D_e * \lg(r) + c$ и выражает оценку фрактальной размерности изучаемого множества, т. е. в нашем случае является фрактальной размерностью эпицентрального распределения землетрясений.

На базе карты пространственного распределения эпицентров землетрясений (см. рис. 1), используя клеточный метод, строился график двойной логарифмической за-

висимости числа непустых клеток (N) от размера стороны клетки разбиения территории Азербайджана (r).

Фрактальная размерность распределения эпицентров для выборки землетрясений Азербайджана за инструментальный период определяется с помощью приведенного на графике (рис. 3) уравнения аппроксимирующей прямой $\lg N(r) = -1,63 * \lg(r) + 1,04$ ($R^2 = 0,99$) и составляет 1,63.

Представление о значениях фрактальной размерности распределения землетрясений по эпицентрам позволяет проводить сравнительный анализ сейсмичности географически близких регионов. Так, представляется целесообразным рассмотреть фрактальные размерности эпицентрального распределения для сейсмического процесса на Кавказе и в Иране. Фрактальный показатель эпицентрального распределения для сейсмичности Кавказа равен 1,67, в то время как для распределения землетрясений Ирана аналогичный показатель составляет 1,60 [Захаров, 2008].

Исследования [Smalley et al., 1987; Tur-

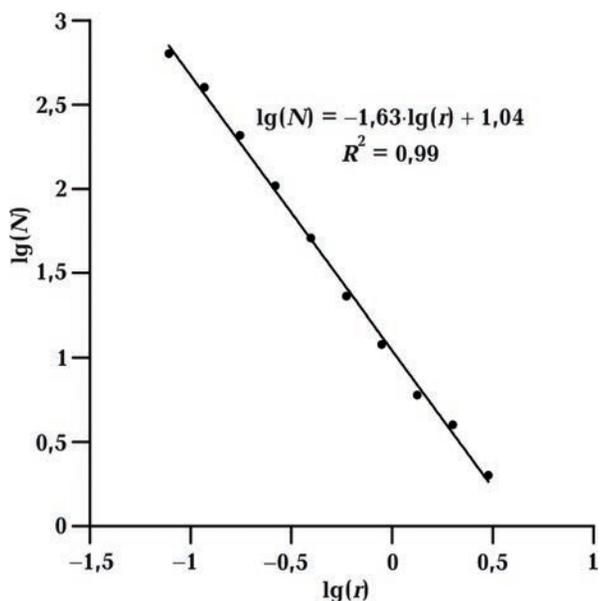


Рис. 3. Вычисление фрактальной размерности распределения эпицентров для землетрясений Азербайджана (1902—2018).

Fig. 3. The computation of the fractal dimension of the epicentre distribution for the earthquakes in Azerbaijan (1902—2018).

cotte, 1997; Öztürk, 2015] показали, что высокие значения фрактальной размерности распределения эпицентров могут свидетельствовать в пользу однородного разброса эпицентров землетрясений в исследуемом регионе, а низкие показатели фрактальной размерности эпицентрального распределения — о высоком уровне пространственного разброса землетрясений.

Иными словами, значения фрактальных размерностей эпицентрального распределения информируют исследователей о том, насколько неоднородным является пространственное распределение сейсмических событий [Smalley et al., 1987; Turcotte, 1997; Kagan, 2007].

Связь между параметром b из закона Гутенберга — Рихтера и рассчитанными фрактальными размерностями сейсмичности. В работах [Turcotte, 1997; Aki, 1981; Caneva, Smirnov, 2004; Захаров, 2008; Han et al., 2015] изучалась зависимость между параметром b и фрактальными показателями распределения эпицентров сейсмических событий. В частности, было показано, что приблизительно выполняется соотношение $D = 2b$.

Указанное теоретическое соотношение получено на основе выкладки формул, связывающих сейсмические параметры (количество землетрясений, магнитуду, сейсмический момент) и длину разрывных нарушений [Kanamori, Anderson, 1975; Касахара, 1985].

В строгом смысле соотношение $D = 2b$ связывает параметр b из закона Гутенберга—Рихтера и фрактальные размерности распределения эпицентров и разломов, принимая во внимание теоретическую близость данных фрактальных показателей [Aki, 1981; Volant, Grasso, 1994; Turcotte, 1997; Шерман, Гладков, 1999]. Таким образом, фрактальная размерность D в данном равенстве выступает в качестве своего рода комплексного фрактального показателя, количественно описывающего статистическое самоподобие распределения эпицентров землетрясений и сети активных разломов.

С помощью этого равенства можно приближенно оценивать значения фракталь-

ных размерностей эпицентрального поля и разломной сети по оценкам параметра b .

Учитывая, что фрактальная размерность распределения по энергиям связана с параметром b формулой $d = b/\beta$, где в среднем $\beta = 1,5$ (значение β в классической формуле, связывающей магнитуду и логарифм энергии), то, комбинируя эту формулу с $D = 2d$, можно записать следующее равенство: $D = 3d$.

Данное теоретическое равенство выполняется приближенно в регионах с разной сейсмотектонической структурой и описывает связь между фрактальной размерностью распределения эпицентров и фрактальным показателем распределения землетрясений по энергиям.

Взяв за основу $D = 3d$, было рассмотрено соотношение между рассчитанными для Азербайджана фрактальными размерностями распределения землетрясений по эпицентрам и энергиям (D_e/d). Выявлено, что соотношение D_e/d для сейсмичности Азербайджана равно 3,02. Полученный коэффициент приблизительно равен 3, что соответствует выведенной выше формуле, связывающей фрактальные размерности.

Заключение. В настоящей статье получены количественные оценки свойств пространственного самоподобия в распределении сейсмических событий, зарегистрированных в Азербайджане и сопредельных территориях за инструментальный период (1902—2018 гг.).

В частности, на базе сводного каталога землетрясений рассчитано соотношение Гутенберга—Рихтера и оценен параметр b для распределения землетрясений исследуемого региона. Используя значение параметра b , рассчитана фрактальная размерность распределения сейсмических событий по энергиям d , которая при среднем значении эмпирического коэффициента β составляет для Азербайджана 0,54.

С помощью клеточного метода определено значение фрактальной размерности пространственного распределения землетрясений Азербайджана по эпицентрам D_e , равное 1,63, которое может свидетельствовать о достаточно неоднородном простран-

ственном распределении сейсмичности на территории Азербайджана.

Также выявлено, что для фрактальных показателей сейсмичности Азербайджана

соотношение $D = 3d$ выполняется с высоким приближением, что свидетельствует в пользу надежности проведенного исследования.

Список литературы

- Агамирзоев Р.А. Сейсмоструктура Азербайджанской части Большого Кавказа. Баку: ЭЛМ, 1987. 124 с.
- Захаров В.С. Характеристики самоподобия сейсмичности сетей активных разломов Евразии. *Электронное научное издание «ГЕО-разрез»*. 2008. Вып. № 1. С. 20.
- Касахара К. Механика землетрясений. Москва: Мир, 1985. 264 с.
- Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии: избранные труды. Москва: Наука, 1985. 408 с.
- Шерман С.И., Гладков А.С. Анализ фрактальных размерностей разломов и сейсмичности в Байкальской рифтовой зоне. *Геология и геофизика*. 1999. Т. 40. С. 28—35.
- Aki, K. (1981). A probabilistic synthesis of precursory phenomena. In D.W. Simpson, & P.G. Richards (Eds.), *Earthquake Prediction: An International Review* (pp. 566—574). AGU. Washington, DC.
- Angulo-Brown, F., Ramírez-Guzmán, A.H., Yépez, E., Rudolf-Navarro, A., & Pavía-Miller, C.G. (1998). Fractal geometry and seismicity in the Mexican subduction zone. *Geofísica Internacional*, 37(1), 29—33.
- Beth, M. (1981). Earthquake Magnitude — Recent Research and Current Trends. *Earth Science Reviews*, 17(4), 315—398. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(81\)90014-3](https://doi.org/10.1016/0012-8252(81)90014-3).
- Caneva, A., & Smirnov, V. (2004). Using the fractal dimension of earthquake distributions and the slope of the recurrence curve to forecast earthquakes in Colombia. *Earth Sciences Research Journal*, 8(1), 3—9.
- Falconer, K. (1990). *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications*. New York: Wiley, 398 p.
- Gutenberg, B., & Richter, C.F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34, 164—176
- Han, Q., Carpinteri, A., Lacidogna, G., & Xu, J. (2015). Fractal analysis and yule statistics for seismic prediction based on 2009 L'Aquila earthquake in Italy. *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 2457—2465. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1386-y>.
- Kadirov, F.A., Gadirov, A.G., Babayev, G.R., Agayeva, S.T., Mammadov, S.K., Garagezova, N.R., & Safarov, R.T. (2013). Seismic zoning of the southern slope of Greater Caucasus from the fractal parameters of the earthquakes, stress state, and GPS velocities. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 49, 554—562. <https://doi.org/10.1134/S1069351313040046>.
- Kagan, Y. (2007). Earthquake spatial distribution: the correlation dimension. *Geophysical Journal International*, 168(3), 1175—1194. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03251.x>.
- Kanamori, H., & Anderson, D. (1975). Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65, 1073—1096.
- Mandelbrot, B.B. (1982). *The fractal geometry of nature*. San Francisco: Freeman, 480 p.
- Öztürk, S. (2015). A study on the correlations between seismotectonic b-value and D_e -value, and seismic quiescence Z-value in the Western Anatolian region of Turkey. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 108(2), 172—184. doi: 10.17738/ajes.2015.0019.
- Richter, C. (1958). *Elementary seismology*. San Francisco, Calif.: Freeman, 768 p.
- Robertson, M.C., Sammis, C.G., Sahimi, M., & Martin, A.J. (1995). Fractal analysis of three dimensional spatial distributions of earthquakes with a percolation interpretation. *Journal of Geophysical Research*, 100(B1), 609—620. <https://doi.org/10.1029/94JB02463>.

- Sander, E., Sander, L.M., & Ziff, R.F. (1994). Fractals and fractal correlations. *Computers in Physics*, 8, 420—425. <https://doi.org/10.1063/1.168501>.
- Scholz, C.H. (1968). Microfracturing and the inelastic deformation of rock in compression. *Journal of Geophysical Research*, 73(4), 1417—1432. <https://doi.org/10.1029/JB073i004p01417>.
- Smalley, R.F., Chatelain, J.L., Turcotte, D.L., & Prevot, R. (1987). A fractal approach to the clustering of earthquakes — applications to the seismicity of the New Hebrides. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(4), 1368—1381.
- Turcotte, D.L. (1997). *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Second edition. Cambridge University Press, 398 p.
- Volant, P., & Grasso, J.R. (1994). The finite extension of fractal geometry and power law distribution of shallow earthquakes: a geo-mechanical effect. *Journal of Geophysical Research*, 99(B11), 21879—21889. <https://doi.org/10.1029/94JB01176>.
- Wiemer, S., McNutt, S.R., & Wyss, M. (1998). Temporal and three dimensional spatial analysis of the frequency-magnitude distribution near Long Valley Caldera. California. *Geophysical Journal International*, 134(2), 409—421. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1998.00561.x>.
- Wyss, M. (1973). Towards a physical understanding of the earthquake frequency distribution. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 31(4), 341—359. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1973.tb06506.x>.

Fractal analysis of the seismicity of the territory of Azerbaijan

N.R. Garagozova, 2020

Institute of Geology and Geophysics of the National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

The article examines the distribution of earthquakes occurred in Azerbaijan and the adjacent territories during the instrumental period (1902—2018) by investigating the self-similarity and fractal properties of the seismicity of the region. Most parts of the territory of Azerbaijan are considered to be seismically active, and seismic events with a wide range of magnitudes ($3 \leq M < 7.3$) have been registered in Azerbaijan during the instrumental period. Earthquake distribution has been analysed by means of the fractal theory, which is based on such notions as the detection of statistical self-similarity in the process under study and its quantitative assessment. The composite catalogue serves as a basis for the research and covers the time span of 1902—2018. It has been compiled with the help of seismic data from the Republican Seismic Survey Center of the Azerbaijan National Academy of Sciences and earthquake catalogues of various international seismological centres.

As a result, for the distribution of earthquakes registered in the territory of Azerbaijan the fractal dimensions (the quantitative indicators of self-similarity) of earthquake energy distribution and epicentre distribution have been calculated. The fractal dimension of earthquake epicentre distribution (D_e) is 1.63, whereas the average value of fractal dimension of energy distribution (d) for Azerbaijani seismic events equals 0.54.

Also, using the data from the composite catalogue, the Gutenberg—Richter magnitude-frequency relationship and the b -value for the earthquakes of Azerbaijan and the adjacent territories have been estimated. The statistical relationships between the calculated fractal dimensions of the earthquake energy and epicentre distribution (d and D_e , respectively) have also been examined.

Key words: Azerbaijan's seismicity, Gutenberg—Richter magnitude-frequency relationship, b -value, fractal dimension, earthquake distribution.

References

- Agamirzoev, R.A. (1987). *Seismotectonics of the Azerbaijan part of the Greater Caucasus*. Baku: Elm, 124 p. (in Russian).
- Zakharov, V.S. (2008). Characteristics of self-similarity of seismicity of networks of active faults of Eurasia. *Electronic scientific publication «GEOrazrez»*, (1), 20 (in Russian).
- Kasahara, K. (1985). *Mechanics earthquakes*. Moscow: Mir, 264 p. (in Russian).
- Riznichenko, Yu.V. *Problems of seismology: selected works*. Moscow: Nauka, 408 p. (in Russian).
- Sherman, C.I., & Gladkov, A.C. (1999). Analysis of the actual fracture and seismic dimensions in the Baikal rift zone. *Geologiya i geofizika*, 40, 28—35 (in Russian).
- Aki, K. (1981). A probabilistic synthesis of precursory phenomena. In D.W. Simpson, & P.G. Richards (Eds.), *Earthquake Prediction: An International Review* (pp. 566—574). AGU. Washington, DC.
- Angulo-Brown, F., Ramírez-Guzmán, A.H., Yépez, E., Rudolf-Navarro, A., & Pavía-Miller, C.G. (1998). Fractal geometry and seismicity in the Mexican subduction zone. *Geofísica Internacional*, 37(1), 29—33.
- Beth, M. (1981). Earthquake Magnitude — Recent Research and Current Trends. *Earth Science Reviews*, 17(4), 315—398. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(81\)90014-3](https://doi.org/10.1016/0012-8252(81)90014-3).
- Caneva, A., & Smirnov, V. (2004). Using the fractal dimension of earthquake distributions and the slope of the recurrence curve to forecast earthquakes in Colombia. *Earth Sciences Research Journal*, 8(1), 3—9.
- Falconer, K. (1990). *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications*. New York: Wiley, 398 p.
- Gutenberg, B., & Richter, C.F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34, 164—176.
- Han, Q., Carpinteri, A., Lacidogna, G., & Xu, J. (2015). Fractal analysis and yule statistics for seismic prediction based on 2009 L'Aquila earthquake in Italy. *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 2457—2465. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1386-y>.
- Kadirov, F.A., Gadirov, A.G., Babayev, G.R., Agayeva, S.T., Mammadov, S.K., Garagezova, N.R., & Safarov, R.T. (2013). Seismic zoning of the southern slope of Greater Caucasus from the fractal parameters of the earthquakes, stress state, and GPS velocities. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 49, 554—562. <https://doi.org/10.1134/S1069351313040046>.
- Kagan, Y. (2007). Earthquake spatial distribution: the correlation dimension. *Geophysical Journal International*, 168(3), 1175—1194. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03251.x>.
- Kanamori, H., & Anderson, D. (1975). Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65, 1073—1096.
- Mandelbrot, B.B. (1982). *The fractal geometry of nature*. San Francisco: Freeman, 480 p.
- Öztürk, S. (2015). A study on the correlations between seismotectonic b-value and D_e -value, and seismic quiescence Z-value in the Western Anatolian region of Turkey. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 108(2), 172—184. doi: 10.17738/ajes.2015.0019.
- Richter, C. (1958). *Elementary seismology*. San Francisco, Calif.: Freeman, 768 p.
- Robertson, M.C., Sammis, C.G., Sahimi, M., & Martin, A.J. (1995). Fractal analysis of three dimensional spatial distributions of earthquakes with a percolation interpretation. *Journal of Geophysical Research*, 100(B1), 609—620. <https://doi.org/10.1029/94JB02463>.
- Sander, E., Sander, L.M., & Ziff, R.F. (1994). Fractals and fractal correlations. *Computers in Physics*, 8, 420—425. <https://doi.org/10.1063/1.168501>.
- Scholz, C.H. (1968). Microfracturing and the inelastic deformation of rock in compression. *Journal of Geophysical Research*, 73(4), 1417—1432. <https://doi.org/10.1029/JB073i004p01417>.

- Smalley, R.F., Chatelain, J.L., Turcotte, D.L., & Prevot, R. (1987). A fractal approach to the clustering of earthquakes — applications to the seismicity of the New Hebrides. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(4), 1368—1381.
- Turcotte, D.L. (1997). *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Second edition. Cambridge University Press, 398 p.
- Volant, P., & Grasso, J.R. (1994). The finite extension of fractal geometry and power law distribution of shallow earthquakes: a geo-mechanical effect. *Journal of Geophysical Research*, 99(B11), 21879—21889. <https://doi.org/10.1029/94JB01176>.
- Wiemer, S., McNutt, S.R., & Wyss, M. (1998). Temporal and three dimensional spatial analysis of the frequency-magnitude distribution near Long Valley Caldera. California. *Geophysical Journal International*, 134(2), 409—421. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1998.00561.x>.
- Wyss, M. (1973). Towards a physical understanding of the earthquake frequency distribution. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 31(4), 341—359. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1973.tb06506.x>.

Фрактальний аналіз сейсмічності території Азербайджану

Н.Р. Карагезова, 2020

Інститут геології і геофізики НАН Азербайджану, Баку, Азербайджан

Досліджено вияви самоподібності у розподілі землетрусів, зареєстрованих в Азербайджані й на суміжних територіях протягом інструментального періоду з 1902 по 2018 р. На території Азербайджанської Республіки, більшість регіонів якої є сейсмічно активними, за весь інструментальний період зареєстровано сейсмічні події в широкому діапазоні магнітуд ($3 \leq M < 7,3$). Аналіз розподілу землетрусів проведено із застосуванням фрактальної теорії, основу якої складають виявлення самоподібності у досліджуваному процесі та кількісна оцінка статистичної самоподібності. За базу даних використано зведений сейсмічний каталог за 1902—2018 рр., складений на основі даних щодо параметрів землетрусів вітчизняних каталогів (дані Республіканського центру Сейсмологічної служби НАН Азербайджану) і каталогів землетрусів відомих світових сейсмологічних центрів.

У результаті для вибірки сейсмічних подій, зафіксованих на території Азербайджану, розраховано фрактальні розмірності (кількісні характеристики самоподібності) розподілу сейсмічних подій за енергіями і епіцентрами. Значення фрактальної розмірності розподілу землетрусів за епіцентрами (D_e) становить 1,63, а середнє значення розрахованого показника фрактальної розмірності розподілу землетрусів за енергіями (d) — 0,54.

Поряд з цим на підставі даних зведеного сейсмічного каталогу отримано закон повторюваності землетрусів Гутенберга—Ріхтера і значення параметра b для розподілу сейсмічних подій Азербайджану і суміжних територій. Проаналізовано статистичні співвідношення розрахованих фрактальних розмірностей розподілу землетрусів за енергіями (d) і епіцентрами (D_e).

Ключові слова: сейсмічність Азербайджану, співвідношення Гутенберга—Ріхтера, параметр b , фрактальна розмірність, розподіл землетрусів.