

УДК 550.34+551.24

В.С. Захаров¹

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК САМОПОДОБИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ И СИСТЕМ АКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ ЕВРАЗИИ

Исследована возможная связь фрактальных размерностей сети активных разломов, пространственного распределения эпицентров землетрясений и параметра b в законе повторяемости землетрясений Гутенберга—Рихтера. Получены количественные характеристики самоподобия сейсмического процесса и сети активных разломов сейсмически активных районов Евразии. Это самоподобие проявляется в диапазоне по крайней мере двух порядков пространственных масштабов и энергий. Полученные оценки фрактальной размерности сети разломов D_f и эпицентрального поля D_e близки для всех анализируемых районов. Установлено, что в среднем для исследуемых районов коэффициент, связывающий величины D и b , несколько больше теоретического значения 2 и варьирует в диапазоне 1,7–2,4.

Ключевые слова: сейсмотектоника, разломы, землетрясения, фрактальная размерность, закон Гутенберга—Рихтера.

Analysis of possible relation of fractal dimensions of active faults network, spatial distribution of earthquakes epicenters and parameter b in Gutenberg—Richter law is presented. Quantitative characteristics of self-similarity of seismic process and active faults network of seismically active areas of Eurasia are obtained. This self-similarity is manifested in a range at least 2 orders of spatial scales and magnitude. The received estimations of fractal dimensions of faults network D_f and epicenter fields D_e are close to each other for all analyzed areas. It is established that for investigated areas the average value connecting sizes D and b is a bit bigger than theoretical value — 2 and varies in a range 1,7–2,4.

Key words: seismotectonics, faults, earthquakes, fractal dimension, Gutenberg—Richter law.

Введение. Геофизическая среда, в которой протекает сейсмический процесс, очень неоднородна. Эта неоднородность проявляется в геолого-геоморфологических характеристиках (геологические разломы, мощности основных верхних оболочек Земли, типы складчатости, виды эндогенных режимов, рельеф, морфоструктуры и т.д.) и в различных геофизических полях — гравитационном, магнитном, тепловом, гидрогеологических характеристик, аномалий сейсмических скоростей и т.д., а также в вещественно-структурных характеристиках среды. Имеются многочисленные свидетельства иерархического самоподобного строения этих полей и неоднородностей [Садовский, Писаренко, 1991].

Со структурой неоднородной среды самым тесным образом связан сейсмический процесс, который проявляет характерные свойства иерархической самоподобной системы в распределении землетрясений в пространстве, во времени и по энергии. Самоподобные (фрактальные) свойства как сейсмического процесса, так и среды, в которой он протекает, выражаются в значениях фрактальной размерности и параметра b в законе Гутенберга—Рихтера. Возможный характер теоретической связи между этими величинами представлен в [Касахара, 1985; Turcotte, 1997]. Опубликовано довольно большое количество работ [Volant, Grasso, 1994; Oncel et al., 1995, 2001; Caneva, Smirnov, 2004; Захаров, 2008], в которых

проводится практическое исследование этих соотношений для различных регионов мира. В статье исследована Евразия.

Цель работы — исследование связи фрактальных размерностей сети активных разломов различных регионов Евразии, пространственного распределения эпицентров землетрясений и параметра b в законе повторяемости землетрясений Гутенберга—Рихтера.

Исходными данными послужили однородный представительный мировой каталог землетрясений PDE (URL: <http://earthquake.usgs.gov>) за 1973–2010 гг. и карты активных разломов Евразии [Trifonov, 2004; Соболева и др., 2002]. В анализ включены различные сейсмически активные регионы (рис. 1). Выбор регионов, помимо сейсмотектонической активности, обусловлен также полнотой анализируемых баз данных.

Дискретность и самоподобие блоковой делимости Земли. Заключение о самоподобной иерархии блоковой делимости Земли сделано в ряде работ [Садовский, Писаренко, 1991; Turcotte, 1997; Горяинов, Иванов, 2001; Vonnet et al., 2001]. Такая тектоническая делимость литосферы связана с проявлением дальнего порядка в структурной организации тектоносферы. Делимость горных пород [Садовский, Писаренко, 1991] обладает способностью образовывать иерархическую последовательность, приближенно описываемую геометрической прогрессией с показателем 2–5

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, доцент, канд. физ.-мат. н., e-mail: vszakharov@yandex.ru; zakharov@dynamo.geol.msu.ru

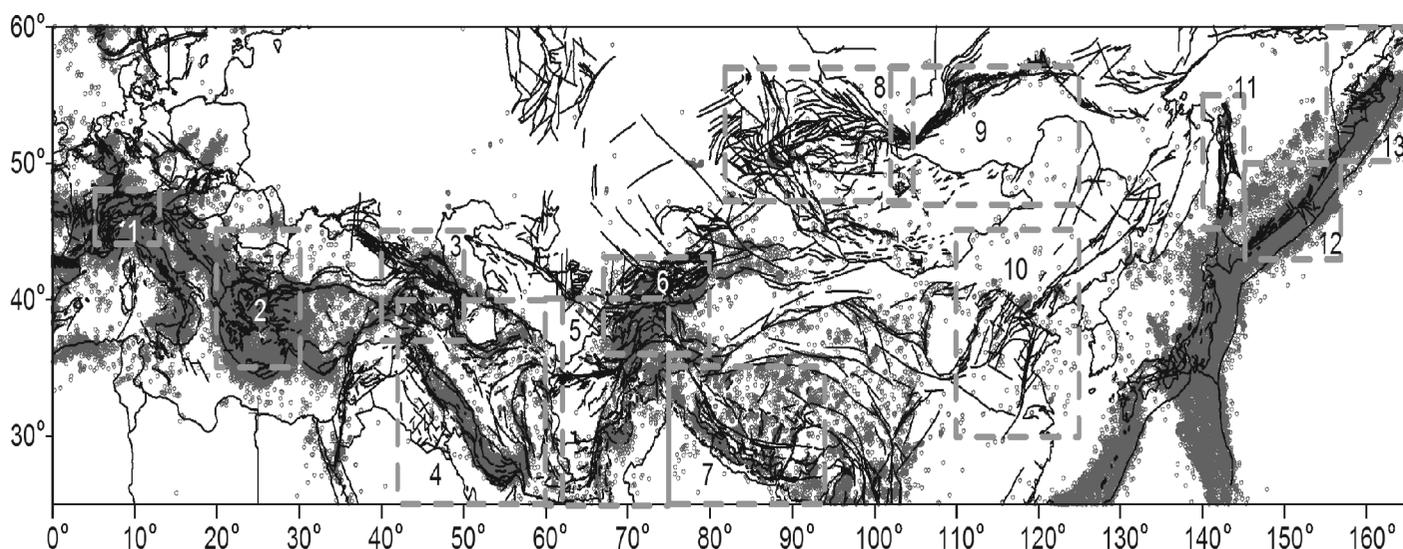


Рис. 1. Сейсмичность по каталогу землетрясений PDE за 1973–2010 гг. и сеть активных разломов Евразии, по [Trifonov, 2004; Соболева и др., 2002]. Цифрами обозначены регионы: 1 — Альпы, 2 — Восточное Средиземноморье, 3 — Кавказ, 4 — Иран, 5 — Афганистан, Пакистан, 6 — Памир, Тянь-Шань, 7 — Гималаи, Тибет, 8 — Алтай, Саяны, 9 — Байкал, 10 — Восточный Китай, 11 — Сахалин, 12 — Курилы, 13 — Камчатка

(в среднем $3,5 \pm 0,9$), и практически не зависит ни от физико-химических свойств пород, ни от способа возникновения — природного или вызванного подземными взрывами. Это свойство М.А. Садовский связывал с автомодельностью процессов образования вещества литосферы.

Таким образом, согласно современным представлениям, литосфера — глубоко иерархическая (многоуровневая), самоподобная, грубодискретная среда. Для ее исследования активно применяются новые подходы, которые разработаны в синергетике, теории динамических систем и теории фракталов.

Фракталы и фрактальная размерность. Теория фракталов — активно развивающаяся область знаний, обладающая мощными инструментами описания сложных самоподобных объектов и процессов [Мандельброт, 2002]. Появление этого подхода дает новое приближение для описания сложных объектов на языке математики, позволяет ввести количественные характеристики для самоподобия, представление о котором на качественном уровне давно вошло в разные области знания, в том числе и в науки о Земле.

Фракталы — объекты, которые обладают масштабной инвариантностью, или *скейлингом*, когда каждый элемент несет информацию о целом. Важное место в теории фракталов занимает понятие *фрактальной размерности* (D), которая является показателем в степенном законе вида

$$N \sim r^{-D}, \quad (1)$$

где r — масштаб рассмотрения, N — число элементов.

Для практического вычисления D часто используют метод подсчета клеток [Мандельброт, 2002], в этом случае размерность носит название *клеточной* (*box dimension*). Для ее вычисления исследуемый объект покрывается клетками со стороной, равной

r , причем при каждом акте покрытия r изменяется, подсчитывается число необходимых для этого клеток N при разных значениях r . Обычно строят график в двойном логарифмическом масштабе, а затем область скейлинга (диапазона значений r , для которого зависимость имеет вид (1)), аппроксимируют прямой линией

$$\lg N = -D \lg r + c, \quad (2)$$

угловой коэффициент которой является фрактальной размерностью D , c — постоянная.

Фрактальная размерность показывает меру самоподобия рассматриваемой иерархической совокупности и степень сложности структуры. Мера подобия оценивается диапазоном масштаба, в котором выполняется однородный степенной закон, а относительная степень сложности определяется величиной фрактальной размерности. Фрактальная размерность дает количественную меру для сопоставления объектов или процессов, как правило, имеющих неодинаковое время формирования и/или характеризующихся различными физическими величинами.

Фрактальная геометрия — мощное средство для анализа огромного разнообразия геологических процессов и объектов, характеристики которых описываются степенными законами. [Горяинов, Иванюк, 2001; Лукк и др., 1996; Turcotte, 1997].

Самоподобие разломной сети. Среди многообразных тектонических структур разломы и трещиноватость наиболее просто выразить комплексом количественных параметров и использовать компьютерную технику для их математической обработки и численного моделирования [Шерман, 1998].

При изучении разломной тектоники давно уже используются количественные параметры разломов: значения угла простираения, падения, длины, а также

глубины проникновения, амплитуды и направления смещения, ширины области влияния, густоты систем трещин, определяющих внутреннее строение разломов, и др. Однако этих параметров оказывается недостаточно как для описания всей сложности структур, с которыми имеет дела разломная тектоника, так и при сопоставлении с результатами, полученными в других отраслях геолого-геофизических знаний. Так, достаточно легко установить пространственную связь эпицентров некоторых землетрясений с отдельными разломами, но для сравнения сети разломов региона с его эпицентральной полем землетрясений нужны другие методы. Применение подходов фрактальной геометрии в разломной тектонике существенно увеличивает возможности применяемых в ней численных методов [Turcotte, 1997; Шерман, 1998; Горяинов, Иванюк, 2001].

Появление планетарной или локальных регматических (линеаментных) сетей большинство исследователей связывают либо с напряжениями ротационной природы, либо с локальным перераспределением напряжений при тектонических движениях, иначе говоря, предполагается пассивный отклик на внешние воздействия. Часто их привязывают к двум, четырем (реже к шести и более) сериям систематических направлений относительно меридианов и параллелей. Однако реальная разломная сеть далека от подобного совершенства. Обычно это разнопорядковая система делимости с хаотической или слабо выраженной анизотропной организацией.

Для адекватного описания такой структуры нужен соответствующий аппарат. На рис. 2 представлен пример определения фрактальной размерности разломной сети Кавказа. Точки, полученные на различных масштабах рассмотрения, ложатся на одну *общую* прямую, соответствующую однородному степенному закону с показателем $D_f = 1,63$. Это означает, что

процесс разрушения в данном диапазоне масштабов происходит одинаковым образом и *не зависит от размеров* объекта.

Оценки фрактальной размерности разномасштабной регматической сети, полученные в различных работах [Turcotte, 1997; Горяинов, Иванюк, 2001; Bonnet et al., 2001; Wilson, 2001; Bour et al., 2002], указывают на их фрактальное строение в широком интервале масштаба с размерностью $D_f = 1,1 \div 1,9$. Эти оценки количественно подтверждают вывод о самоподобной иерархии блоковой делимости Земли, который сделан М.А. Садовским [Садовский, Писаренко, 1991].

Структура тектоносферы, таким образом, обусловлена «необходимостью» эффективно диссипировать (рассеивать) непрерывно поступающую эндогенную энергию. На это, помимо упомянутых доводов, указывает фрактальный характер распределения гипо- и эпицентров землетрясений, сопоставимый в основных чертах с характером структур делимости [Горяинов, Иванюк, 2001].

Самоподобие сейсмического режима. Сейсмический режим [Касахара, 1985] — совокупность землетрясений, которые рассматриваются как точки в координатах пространство—время, снабженные параметром энергии. Сейсмический режим представляет собой яркий пример самоподобного процесса.

По современным представлениям, сейсмический процесс является следствием деформации горной породы под действием тектонических сил. Поскольку сейсмический процесс протекает в дискретной, иерархически самоподобной среде, то он также несет черты иерархичности, дискретности и автомодельности [Садовский, Писаренко, 1991]. Крупные отдельности в системе горного массива могут представлять собой целые ассоциации более мелких, реагирующих на внешние воздействия как единое целое. Такая система способна обменивать-

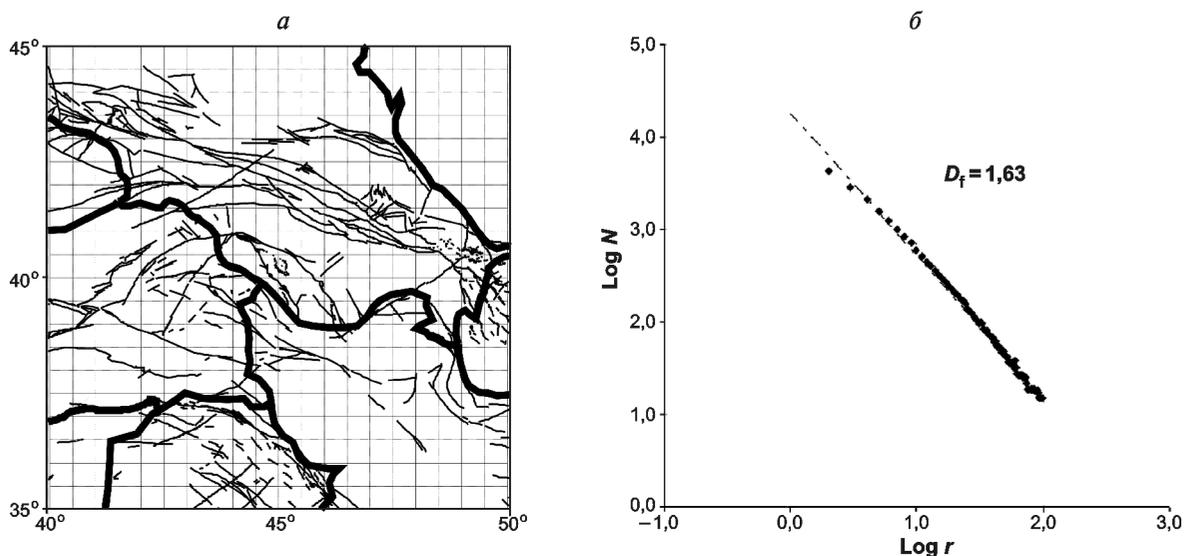


Рис. 2. Вычисление фрактальной размерности системы разломов Кавказа клеточным методом: *a* — покрытие разломной сети клетками размером r ; *b* — зависимость числа клеток N от размера r в двойном логарифмическом масштабе ($D_f = 1,63$)

ся массой и энергией, как с внешней средой, так и между составляющими ее отдельностями. При этом ее отдельности могут достигать критической энергонасыщенности, терять устойчивость, сбрасывая избыток энергии в виде упругих волн (землетрясение). Потеря устойчивости может сопровождаться изменением конфигурации блоков относительно друг друга, их расчленением или консолидацией. Однако при этом свойства горного массива в целом практически не меняются; не меняется и характер энергообмена в системе, иными словами, остается неизменным и общий характер сейсмического процесса. Согласно этим представлениям, среда, в которой происходит сейсмический процесс, должна рассматриваться как самоорганизующаяся система, находящаяся в состоянии динамического равновесия. При этом момент землетрясения представляет собой резкую потерю устойчивости (катастрофу), после чего происходит перестройка системы и адаптация к новому устойчивому состоянию.

Указанные самоподобные (фрактальные) свойства сейсмического режима проявляются в его пространственно-временных характеристиках в виде степенных законов распределения [Main, 1996; Turcotte, 1997].

Фрактальные свойства пространственного распределения очагов землетрясений. Пространственная структура гипо- и эпицентрального поля землетрясений имеет весьма сложный неоднородный вид, причем эти свойства проявляются в широчайшем диапазоне масштабов. Если не учитывать размер очага, то совокупность очагов имеет характер канторовых множеств [Мандельброт, 2002]. Пример вычисления размерности распределения эпицентров методом подсчета клеток для Кавказа представлен на рис. 3. Величина размерности $D_e = 1,67$.

Взаимосвязь сети разломов и приуроченного к ним поля эпицентров позволяет провести сопоставление их фрактальных размерностей [Volant, Grasso, 1994]. Согласно исследованиям Шермана [Шерман, 1998], для Байкальской рифтовой зоны наблюдается совпадение D_f (фрактальной размерности сети активных разломов) и D_e (фрактальной размерности эпицентрального поля), причем $D_f = D_e = 1,68$.

Близкие значения могут указывать на сходство пространственных характеристик разломов и полей эпицентров и, следовательно, на взаимную согласованность процессов сейсмичности и разломообразования. Фрактальное строение разломных сетей определяет особенности фрактальной пространственно-временной динамики землетрясений и наоборот. Это обстоятельство позволяет оценить некоторые топологические характеристики системы разломов и трещин, которые недоступны непосредственному изучению, по аналогичным характеристикам поля очагов землетрясений.

Закон Гутенберга—Рихтера. Классическим примером, подтверждающим самоподобие сейсмического режима, является закон Гутенберга—Рихтера для распределения землетрясений по *магнитудам*, имеющий фундаментальное значение в сейсмологии [Касахара, 1985]:

$$\lg N = -bM + a, \quad (3)$$

где a и b — эмпирические константы, N — число землетрясений за определенный промежуток времени с магнитудой, превосходящей M , в определенном регионе.

Это соотношение выполняется для области спада графика распределения $\lg N(M)$. Графическое представление этой зависимости называется *графиком*

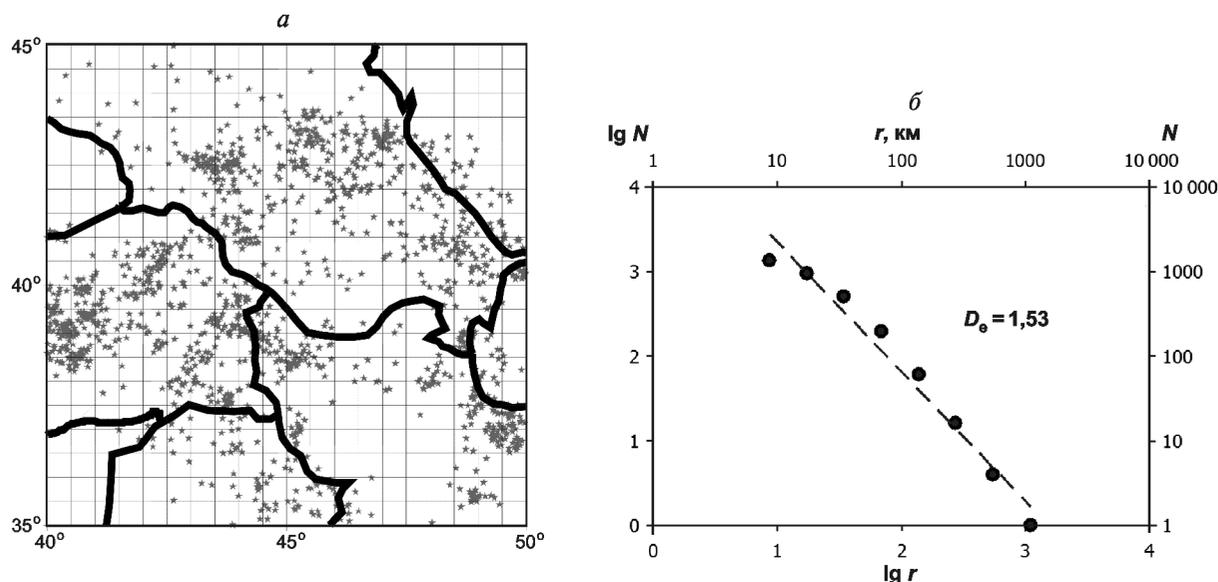


Рис. 3. Определение фрактальной размерности распределения эпицентров землетрясений Кавказа: a — покрытие эпицентрального поля клетками размером r ; b — зависимость числа клеток N от размера r в двойном логарифмическом масштабе ($D_e = 1,53$)

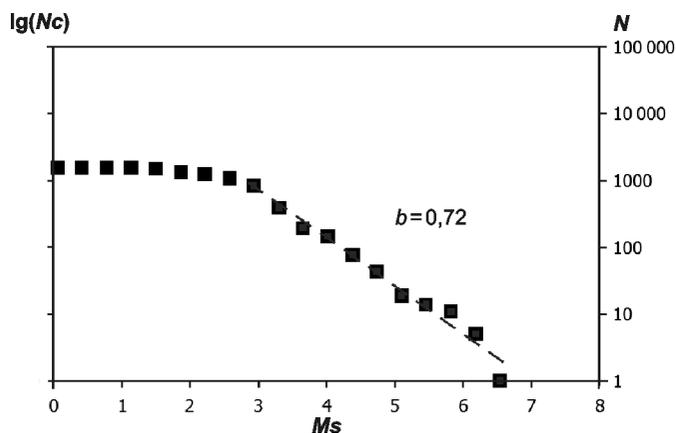


Рис. 4. Распределение числа землетрясений по магнитуде и оценка параметра b в законе Гутенберга—Рихтера для Кавказа ($b = 0,72$)

повторяемости (рис. 4). Установлено, что параметр b в законе Гутенберга—Рихтера для различных районов и обстановок варьирует в диапазоне $0,5 < b < 1,2$ [Касахара, 1985].

Подобный вид распределения указывает на то, что катастрофические землетрясения случаются редко, но для них не нужно искать специальный механизм — он такой же, что и для событий меньшего масштаба [Turcotte, 1997; Горяинов, Иванюк, 2001]. С учетом того, что магнитуда пропорциональна логарифму энергии землетрясения, коэффициент b — параметр самоподобия сейсмического режима.

Отметим, что землетрясения — это не только события, происходящие в существующей структуре разломов, они сами формируют эти разломы. Таким образом, должна существовать взаимная связь свойств дискретной иерархической среды и самоподобного процесса, протекающего в ней.

Связь между параметром b в законе Гутенберга—Рихтера и фрактальной размерностью сети активных разломов и эпицентрального поля. Физические механизмы землетрясений, связанные с процессами роста трещин, дают основания полагать, что длина разрыва зависит от энергии землетрясения и, следовательно, от магнитуды. Эмпирическими методами установлен степенной характер соотношения между числом землетрясений (N) и длиной разрывного нарушения (l), с которым они связаны [Лукк и др., 1996; Turcotte, 1997]:

$$N = \beta l^{-D}, \quad (4)$$

где D — фрактальная размерность, β — эмпирический параметр. Этот закон носит универсальный характер и выполняется для регионов с различным тектоническим режимом.

Самоподобие сейсмического режима и фрактальные характеристики делимости земной коры дают основания полагать, что может быть выявлена связь между характеристиками степенных законов, описывающих эти явления [Лукк и др., 1996; Turcotte, 1997].

Сейсмический момент M_0 связан с деформациями, происходящими во время землетрясения, соотношением [Касахара, 1985; Fowler, 2005] $M_0 = \mu A u$, где μ — модуль сдвига упругой среды; A — площадь, охваченная разрывом; u — среднее смещение по разрыву во время землетрясения. Экспериментально установлено соотношение [Kanamori, Anderson, 1975; Касахара, 1985]:

$$\lg M_0 = c M_w + s, \quad (5)$$

которое вводит новую шкалу магнитуд M_w — *моментную магнитуду*.

В соотношении (5) часто вместо M_w приближенно используют магнитуду M_S , определяемую по поверхностным волнам:

$$\lg M_0 = 1,5 M_w + 9,1. \quad (6)$$

Кроме того, для M_0 имеет место соотношение [Kanamori, Anderson, 1975]

$$M_0 = \alpha A^{3/2}. \quad (7)$$

Комбинируя (5), (7) и закон Гутенберга—Рихтера (3), с учетом среднего значения $c = 1,5$ [Касахара, 1985; Fowler, 2005], получаем

$$D = 2b. \quad (8)$$

Таким образом, это дает возможность определять фрактальную размерность совокупности разломов по параметру b в законе Гутенберга—Рихтера, построенном по распределению магнитуд поверхностных волн M_S .

Методика анализа. В статье исследована возможная связь между параметром b в законе Гутенберга—Рихтера и фрактальными характеристиками среды (системы разломов D_e , пространственное распределение эпицентров D_f) для Евразии. Методика включает три этапа.

1. Построение карт активных разломов для выбранных регионов по данным [Trifonov, 2004; Соболева и др., 2002]. Для пространственного распределения разломов вычислялась фрактальная размерность D_f клеточным методом по графическому растровому изображению сети разломов с помощью freeware-программы FractalAnalysis. Пример такого анализа для Кавказа представлен на рис. 2.

2. Построение карты эпицентров землетрясений. С помощью авторского программного обеспечения клеточным методом вычислялась фрактальная размерность D_e распределения эпицентров. Пример для Кавказа представлен на рис. 3. При этом размер очагов не учитывался, и источник полагался точечным. Пространственные координаты измерялись в градусах, сферичность Земли не учитывалась.

3. Построение распределения землетрясений по магнитудам и определение параметра b закона Гутенберга—Рихтера. Пример для Кавказа представлен на рис. 4. Выше отмечено, что это соотношение

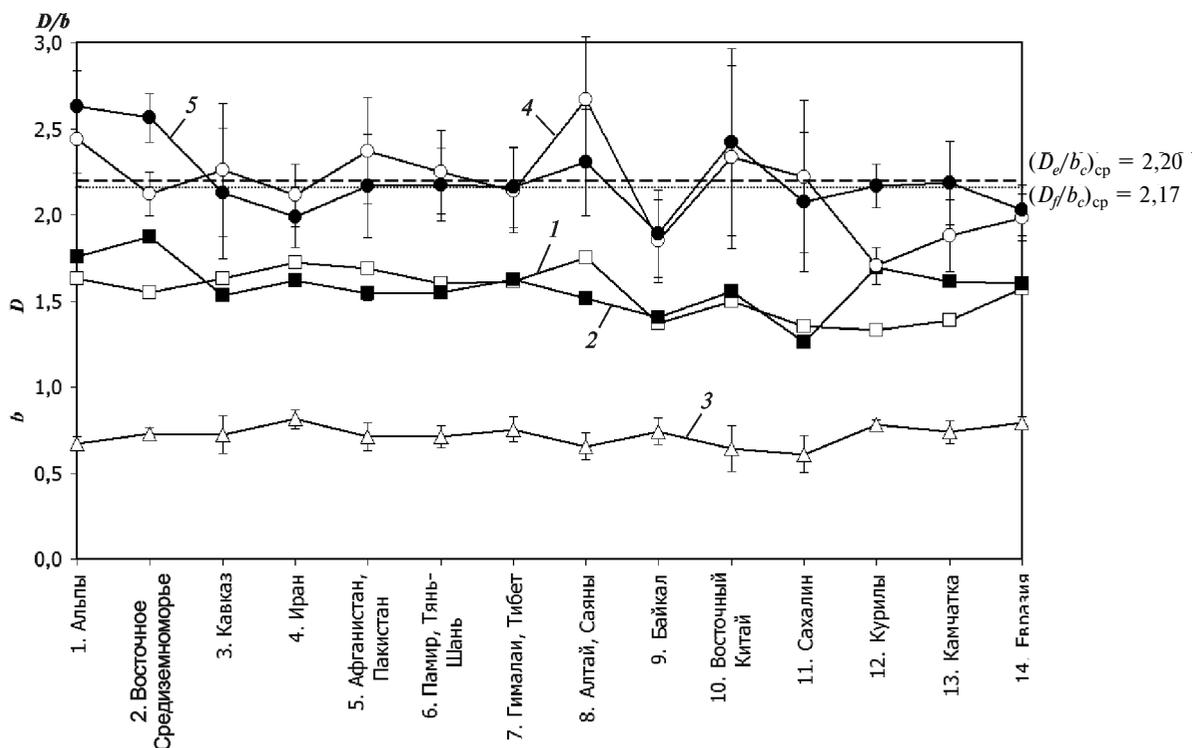


Рис. 5. Результаты анализа фрактальных размерностей сети активных разломов (D_f), пространственного распределения эпицентров землетрясений (D_e) и параметра b в законе Гутенберга—Рихтера для исследуемых регионов Евразии: 1 — D_f , 2 — D_e , 3 — b , 4 — D_f/b , 5 — D_e/b . Представлены также стандартные ошибки оценки параметров и средние значения $(D_f/b)_{cp}$ и $(D_e/b)_{cp}$

связывает фрактальную размерность, определяемую по сети активных разломов (или по эпицентральному полю), и параметр b , который получается при анализе закона Гутенберга—Рихтера для распределения по магнитудам M_S . Однако в каталоге PDE относительно немного записей содержат определения M_S . Поэтому в работе осуществлялся пересчет магнитуд m_b , определяемых по объемным волнам, в магнитуды M_S , по [Fowler, 2005]:

$$m_b = 2,94 + 0,55M_S. \quad (9)$$

Результаты исследований. Приведенная методика применялась для всех анализируемых районов Евразии (рис. 1). В таблице приведены значения фрактальных размерностей D_f и D_e ; параметр b , определяемый по кумулятивному распределению, а также отношения D_f/b и D_e/b . Графически эти результаты представлены на рис. 5. Полученные результаты сопоставлялись с теоретическим соотношением (8). При анализе вычислялись также сопутствующие статистические характеристики для подтверждения достоверности получаемых оценок.

Обсуждение результатов. Главный результат нашего исследования — получение количественных характеристик самоподобия сейсмического процесса и сети активных разломов, с которым связано его проявление. Это самоподобие проявляется в диапазоне по крайней мере двух порядков пространственных масштабов и по магнитуде.

Отметим прежде всего близость полученных значений фрактальной размерности сети разломов D_f и эпицентрального поля D_e . Иерархическая структура блоков геологической среды и пространственная структура распределения гипоцентров землетрясений подчиняются, в пределах ошибок, одинаковым

Фрактальные характеристики сейсмичности и систем активных разломов Евразии

Номер по порядку	Регион	D_f	D_e	b	D_f/b	D_e/b
1	Альпы	1,63	1,76	0,67	2,44	2,63
2	Восточное Средиземноморье	1,55	1,87	0,73	2,12	2,56
3	Кавказ	1,63	1,53	0,72	2,26	2,12
4	Иран	1,72	1,62	0,81	2,11	1,99
5	Афганистан, Пакистан	1,69	1,54	0,71	2,37	2,17
6	Памир, Тянь-Шань	1,60	1,55	0,71	2,25	2,18
7	Гималаи, Тибет	1,61	1,62	0,75	2,14	2,16
8	Алтай, Саяны	1,75	1,51	0,66	2,67	2,31
9	Байкал	1,37	1,40	0,74	1,85	1,89
10	Восточный Китай	1,50	1,55	0,64	2,34	2,42
11	Сахалин	1,35	1,26	0,61	2,22	2,08
12	Курилы	1,33	1,69	0,78	1,70	2,17
13	Камчатка	1,39	1,61	0,74	1,88	2,18
14	Евразия	1,57	1,60	0,79	1,99	2,03

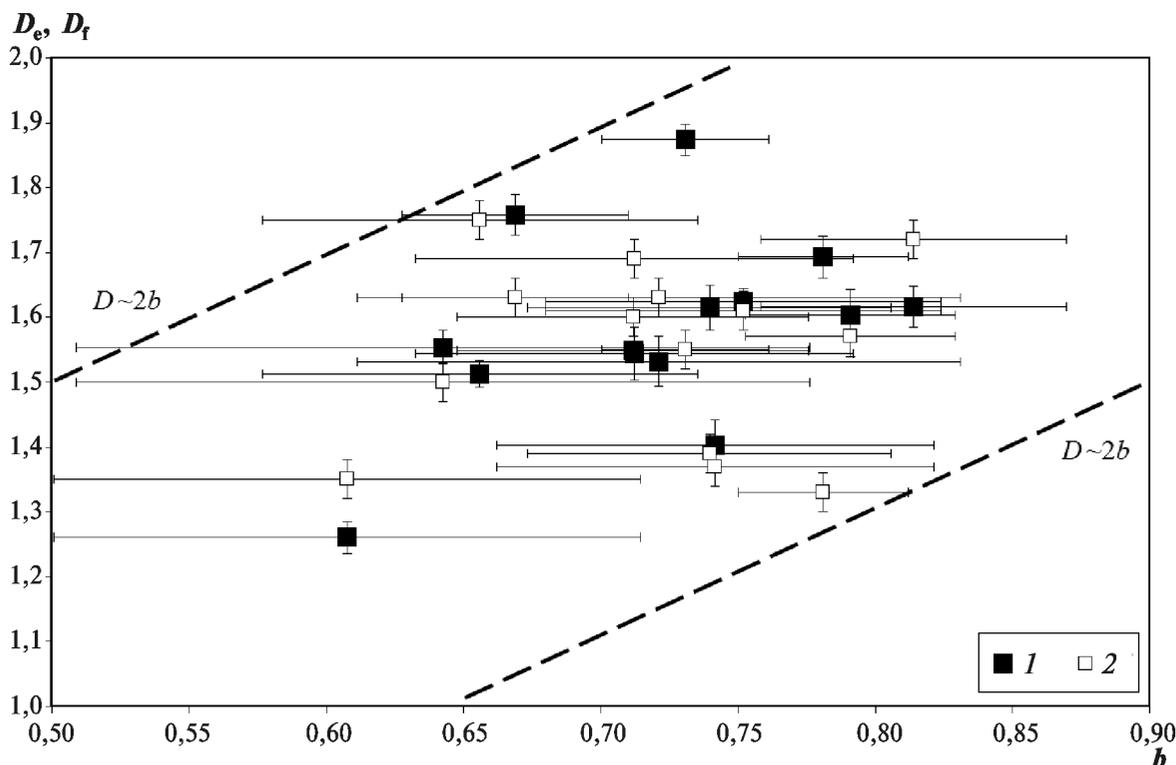


Рис. 6. Зависимости фрактальных размерностей пространственного распределения эпицентров землетрясений D_e и сети активных разломов D_f от параметра b в законе Гутенберга—Рихтера для исследуемых регионов Евразии: 1 — D_e , 2 — D_f . Пунктиром показаны линейные соотношения $D \sim 2b$

соотношениям самоподобия. Это дает возможность изучать структуру среды по свойствам происходящего в ней сейсмического процесса. Приводимые здесь результаты являются количественным свидетельством общей согласованности сейсмического процесса и разломообразования.

Полученные нами соотношения b , D_f и D_e показывают, что приблизительно зависимость $D = 2b$ выполняется, хотя наблюдаются довольно значительные отклонения (рис. 6). Согласованность фрактального распределения магнитуды (и, следовательно, энергии) землетрясений и фрактального распределения размеров разрывных нарушений количественно подтверждают иерархические самоподобные свойства сейсмотектонического процесса.

Отметим, однако, что в большинстве регионов и в среднем коэффициент, связывающий D и b , несколько больше 2 и варьирует в диапазоне $1,7 \div 2,4$, при этом среднее значение, $(D_f/b)_{\text{ср}} = 2,20$, $(D_e/b)_{\text{ср}} = 2,17$. Это отклонение от теоретической зависимости может быть связано с тем, что в данном исследовании использован пересчет магнитуд, который, как сказано выше, не является однозначным. Довольно низкая корреляция в некоторых регионах, скорее всего, получилась из-за недостатка данных прежде всего по разломам.

Литосфера как открытая система подстраивается под внешнее воздействие таким образом, чтобы эффективно перерабатывать поступающую в нее энергию, которая накапливается в значительной степени в виде упругой потенциальной энергии. Система дискретностей (неоднородностей) литосферы сама выбирает ту структуру, которая обеспечивает максимальную степень диссипации упругой энергии, — это своего рода адаптация материи к условиям существования. Таким образом, образование структур отдельных (неоднородностей) геофизической среды в большом диапазоне масштаба можно рассматривать как *самоорганизацию*.

Заключение. С точки зрения современной физики открытая сложная система в процессе эволюции неизбежно приходит к состоянию самоорганизованной критичности, для которого характерны иерархическая организация неоднородностей (фрактальность) и степенные законы распределения параметров [Горяинов, Иванюк, 2001]. И земная кора в целом, и отдельные ее элементы относятся к классу подобных систем. Это служит причиной того, что фрактальные свойства обнаруживаются в различных геологических структурах и процессах в различном пространственно-временном масштабе, в том числе и в сейсмотектоническом процессе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю.* Самоорганизация минеральных систем. Синергетические принципы геологических исследований. М.: ГЕОС, 2001. 312 с.
- Захаров В.С.* Характеристики самоподобия сейсмичности и сетей активных разломов Евразии // Электрон. науч. издание «ГЕОразрез». 2008. Вып. 1. URL: http://www.georazrez.ru/articles/2008/1-1/zakharov-kharakteristiki_samopodobiya_seysmichnosti.pdf
- Казахара К.* Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.
- Лукк А.А., Децеровский А.В., Сидорин А.Я., Сидорин И.А.* Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 210 с.
- Мандельброт Б.* Фрактальная геометрия природы. Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф.* Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 96 с.
- Соболева О.В., Трифонов Р.В., Востриков Г.А.* Современная геодинамика Альпийско-Гималайского коллизийного пояса. М.: ГЕОС, 2002. 225 с.
- Шерман С.И.* Фрактальный анализ в разломной тектонике // Тектоника и геодинамика: общие и региональные аспекты. М.: ГЕОС, 1998. Т. 2. С. 274–276.
- Bonnet E., Bour O., Odling N.E.* et al. Scaling of fracture systems in geological media // *Rev. Geophys.* 2001. Vol. 39, N 3. P. 47–381.
- Bour O., Davy P., Darcel C.* et al. A statistical scaling model for fracture network geometry, with validation on a multiscale mapping of a joint network (Hornelen Basin, Norway) // *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, N B6. doi 10.1029/2001JB000176.
- Caneva A., Smirnov V.* Using the fractal dimension of earthquake distributions and the slope of the recurrence curve to forecast earthquakes in Colombia // *Earth Sci. Res. J.* 2004. Vol. 8, N 1. P. 3–9.
- Fowler C.M.R.* The Solid Earth: an introduction to global geophysics. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2005. 685 p.
- Kanamori H., Anderson D.L.* Theoretical basis of some empirical relations in seismology // *Seism. Soc. Amer. Bull.* 1975. Vol. 65. P. 1073–1096.
- Main I.* Statistical physics, seismogenesis, and seismic hazard // *Rev. Geophys.* 1996. Vol. 34, N 4. P. 433–462.
- Oncel A.O., Alptekin O., Main I.* Temporal variations of the fractal properties of seismicity in the western part of the north Anatolian fault zone: possible artifacts due to improvements in station coverage // *Nonlin. Proc. Geophys.* 1995. Vol. 2. P. 147–157.
- Oncel A.I., Wilson T.H., Nishizawa O.* Size scaling relationships in the active fault networks of Japan and their correlation with Gutenberg-Richter b values // *J. Geophys. Res.* 2001. Vol. 106. P. 21827–21841.
- Trifonov V.G.* Active faults in Eurasia: general remarks // *Tectonophys.* 2004. Vol. 380, N 3–4. P. 123–130.
- Turcotte D.L.* Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. Second edition. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1997. 398 p.
- Volant P., Grasso J.R.* The finite extension of fractal geometry and power law distribution of shallow earthquakes: a geomechanical effect // *J. Geophys. Res.* 1994. Vol. 99. P. 21879–21889.
- Wilson T.H.* Scale Transitions in Fracture and Active Fault Networks // *Math. Geology.* 2001. Vol. 33, N 5. P. 591–613.

Поступила в редакцию
22.02.2011