

## СВЯЗЬ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ТЕРРИТОРИИ ТУВЫ И ПРИЛЕГАЮЩЕЙ ЧАСТИ МОНГОЛИИ С ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТЬЮ СИСТЕМЫ РАЗЛОМОВ

О.Д. Аюнова, Ю.А. Калущ, В.М. Логинов\*

*Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН,  
667007, Кызыл, ул. Интернациональная, 117а, Россия*

*\* Институт математики, физики и информатики Красноярского государственного педагогического университета, 660049, Красноярск, ул. Перенсона, 7, Россия*

В статье с использованием технологий геоинформационных систем проведен совместный пространственный анализ сейсмической активности и фрактальных показателей разломных полей территории Тувы и прилегающей части Монголии. Показана приуроченность сейсмической активности к интервалам с низкими значениями (1.2—1.4) фрактальной размерности систем разломных полей.

*Математическое моделирование, сейсмическая активность, система разломов, фрактальная размерность, геоинформатика.*

## RELATIONSHIP OF THE SEISMIC ACTIVITY OF THE TUVINIAN AND ADJACENT MONGOLIAN AREAS WITH THE FRACTAL DIMENSIONALITY OF A FAULT SYSTEM

O.D. Ayunova, Yu.A. Kalush, and V.M. Loginov

Using GIS technologies, we carried out a complex spatial analysis of the seismic activity and fractal dimensionality of fault fields in the Tuvina and adjacent Mongolian areas. Results obtained showed that seismic activity is intrinsic to zones with the low fractal dimensionalities (1.2–1.4) of fault systems.

*Mathematical simulation, seismic activity, fault system, fractal dimensionality, geoinformatics*

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время теория фрактальных множеств и мультифрактальных мер широко применяется для описания многих природных процессов, в том числе и разломной тектоники [Федер, 1991; Стаховский, Белоусов, 1996, 1997; Шерман, Гладков, 1999; Борняков и др., 2003]. Экспериментальные и теоретические исследования указывают на то, что фракталы отражают прежде всего определенное состояние систем и подсистем разных уровней. Информативность фракталов обеспечивается: инвариантными и самоподобными свойствами, их способностью опосредованно передавать информацию о нарушении устойчивости структурного состояния системы и ее адаптивности к внешнему воздействию [Хакен, 1991; Иванова, 1992; Борняков и др., 2003]. Разломообразование, как и многие другие природные системы, относится к открытым неравновесным системам с характерным набором пространственных и временных масштабов. Общеизвестна взаимосвязь разломообразования и сейсмичности, а также и то, что фрактальный анализ структурных элементов поля разломов и динамики разломов является адекватным инструментом исследований [Стаховский, Белоусов, 1996, 1997; Шерман, Гладков, 1999].

В работах И.Р. Стаховского и Т.П. Белоусова для горных систем Кавказа [1997], Памира и Тянь-Шаня [1996] была установлена корреляция между мультифрактальными размерностями разломных полей и сейсмической активностью этих регионов, причем оказалось, что наибольшая сейсмическая активность приурочена к зонам с пониженной фрактальной размерностью 1.2—1.4. С.И. Шерман и А.С. Гладков [1999] для Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) исследовали корреляцию между фрактальными характеристиками поля разломов и эпицентрального поля землетрясений. В частности, была установлена близость показателей фрактальной размерности разломных полей центральной части БРЗ и их отличие на флангах зоны.

В данной работе дается оценка связи сейсмичности с показателями фрактальной размерности системы разломов Тувы и прилегающей территории Монголии. Исследуемая территория относится к Алтае-Саянской горной области, которая неоднородна по сейсмической активности [Жалковский и др., 1995].

### ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА

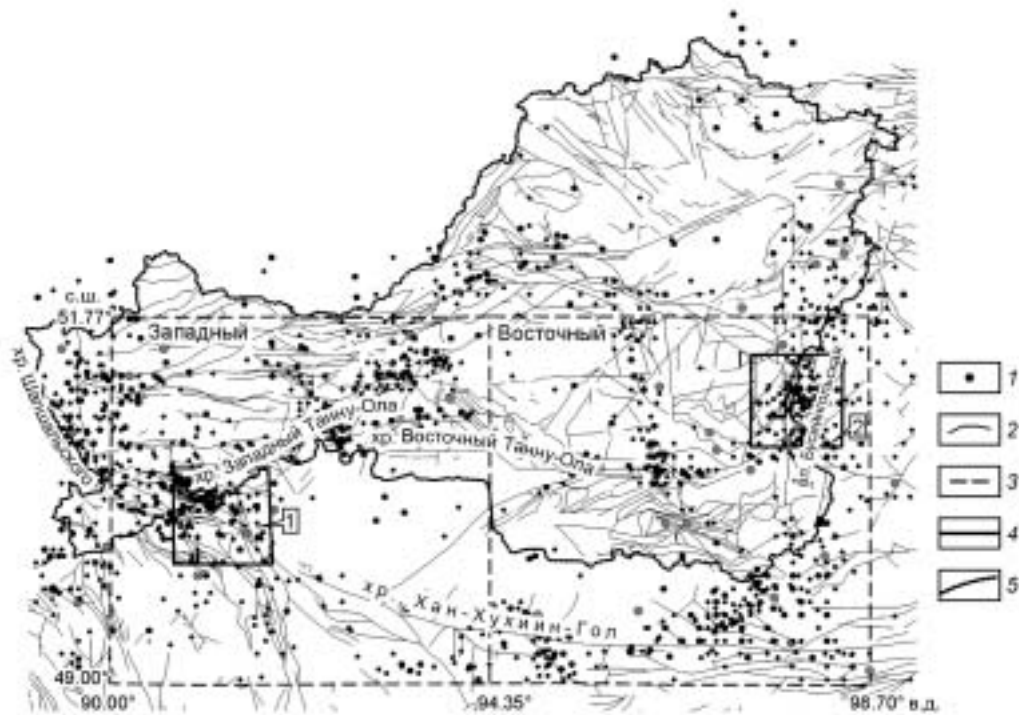
Область наиболее высокой сейсмичности охватывает всю территорию Тувы, юго-восточную часть Горного Алтая, приграничные районы Бурятии и Монголии. В обозначенных контурах максимальной активностью характеризуется Билин-Бусийнольская эпицентральный зона, расположенная на крайнем востоке Тувы, составляющая юго-западный фланг Байкальской рифтовой зоны. Она имеет субмеридио-

нальное простираение и приурочена к межгорной впадине рифтогенного происхождения. С юга к Билин-Бусийнгольской эпицентральной зоне примыкает субширотная зона Северной Монголии, простирающаяся вдоль хр. Хан-Хухийн-Гол и северных отрогов хр. Болнай-Нуру. Высокой сейсмичностью характеризуется также территория Западной Тувы и юго-восточной части Горного Алтая. Наибольшие значения сейсмической активности характерны для узлов сочленения хребтов Юстыд — Хархира, Цаган-Шибэту — Танну-Ола. Территория Центральной Тувы, включающая Кызылскую и Убсунурскую межгорные впадины, сейсмически менее активна. Однако в ее северной части фиксируются локальные сгущения эпицентров землетрясений.

Интерес к сопоставлению сейсмической активности территории с фрактальной размерностью разломных полей вызван следующим. Данные о сейсмичности территории свидетельствуют о продолжающихся до настоящего времени новейших тектонических движениях. Кроме того, выявлена корреляция высокосейсмичных зон с активизировавшимися в новейшее время участками глубинных разломов [Рычкова и др., 2002]. Это наиболее характерно для узлов сопряжения Цаган-Шибэту-Хархириной сдвиговой зоны с Южно-Таннуольским (юг Тувы) и Хан-Хухэйским (северо-запад Монголии) разломами; Билин-Бусийнгольского рифта и Шишихидгольской системы разрывных нарушений; Агардагско-Окинской и Каахемской зон глубинных разломов. Эпицентрами землетрясений фиксируется сопряжение Агардагской и Хан-Хухэйской зон разломов. В то же время часть крупных разломов в сейсмическом отношении себя не проявляют. Еще меньшая зависимость интенсивности сейсмических событий выявляется при сопоставлении землетрясений, пространственно совпадающих с локальными разрывными структурами низкого порядка. На территории Тувы наблюдаются отдельные скопления эпицентров землетрясений, которые не увязываются с закартированными элементами разрывной тектоники [Жалковский и др., 1995; Рычкова и др., 2002].

Для анализа связи сейсмической активности региона с фрактальной размерностью систем разломов были выбраны два полигона: Западный и Восточный (рис. 1). Размер полигонов равен  $300 \times 300$  км. В их пределах находятся основные высокосейсмичные зоны Тувы.

С использованием технологий геoinформационных систем (ГИС) и разработанной нами программы FracFault расчета фрактальных показателей системы кривых на плоскости, сопряженной с ГИС, проведен совместный пространственный анализ распределения значений фрактального показателя поля разломов и распределения эпицентров землетрясений энергетического класса  $K \geq 9$ . Исследована корреляционная связь между величиной показателя фрактальной размерности поля разломов и уровнем сейсмичности. Она рассчитана с использованием электронной карты сейсмического районирования территории Тувы (ОСР-97).



**Рис. 1.** Электронная карта разломов с эпицентрами землетрясений.

1 — эпицентры землетрясений, 2 — разломы, 3 — границы полигона  $300 \times 300$  км, 4 — границы полигона  $75 \times 75$  км, 5 — граница Тувы.

## АНАЛИЗ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ПОЛЯ РАЗЛОМОВ

Основой для проведения расчетов фрактальных показателей поля разломов и выявления корреляции между величиной показателя и характеристикой сейсмичности (числом эпицентров землетрясений с энергетическим классом  $K \geq 9$ ) является электронная карта, созданная нами на основе тектонической карты м-ба 1:500 000 (под ред. П.А. Никитчина). Электронная карта создана как элемент геоинформационной системы „Тектоника Тувы“. Нами были использованы слой разломов различных рангов, слой эпицентров землетрясений с  $K \geq 9$ , всего 2171 (данные представлены КНИИГИМС, г. Красноярск). При создании электронной карты использовались программы PC ArcInfo и ArcView, а для расчета фрактальных показателей разломов нами была разработана программа FracFault, написанная на языке FOXPRO-6.0 и ориентированная к применению ГИС.

В отличие от [Стаховский, Белоусов, 1996, 1997], где расчет индексов фрактальной размерности производился путем подсчета числа „пикселей“ при отображении разломов множеством точек на экране монитора, применение геоинформационных технологий существенно расширяет инструментарий для исследований, в частности, позволяет провести пространственный анализ сейсмичности и геометрии разломной тектоники непосредственно в географической системе координат.

Анализ поверхностной структуры разломов (траекторий разрывов в плане) проводился без учета их мощности и глубины. С этих позиций поле разломов в целом или его части рассматривались как некоторые системы геометрических кривых на плоскости, включенных в квадратные ячейки (боксы). В этом случае можно говорить о самоподобии, а не о самоафинности рассматриваемых множеств.

Для подсчета фрактальной размерности (клеточной размерности)  $D$  использовано соотношение  $D = \frac{\log N_L}{\log N_K}$ , где  $N_L$  — число ячеек, покрывающих совокупность разломов внутри рассматриваемого квадрата (бокса), а  $N_K$  — число ячеек, покрывающих сторону этого квадрата.

При расчете фрактальной размерности разломных полей выбранный (Восточный или Западный) полигон разбивался на более мелкие квадраты путем деления стороны исходного полигона на два, четыре и т. д. до размеров, сопоставимых с точностью определения координат эпицентра землетрясения. Расчет был закончен при размере квадрата 37.5 км, т. е. исходный полигон был разделен на 64 квадрата. При этом размер покрывающих ячеек принимался равным 1 км, что сопоставимо с расчетами, производимыми для пиксельных образов [Стаховский, Белоусов, 1997]. Для каждого 37.5-километрового квадрата определялись фрактальная размерность  $D$  и количество эпицентров, входящих в данный квадрат. Затем производилась классификация квадратов по фрактальной размерности  $D$  с шагом  $D = 0.2$ . На следующем этапе составлялось распределение числа эпицентров по интервалам фрактальной размерности, начиная с интервала 0.0—0.2 до интервала 1.8—2.0.

Расчеты показали (рис. 2), что значения фрактального показателя разломных полей Западного полигона приходятся в основном на интервал  $D = 1.4 - 1.6$ , а Восточного — на  $D = 1.2 - 1.6$ .

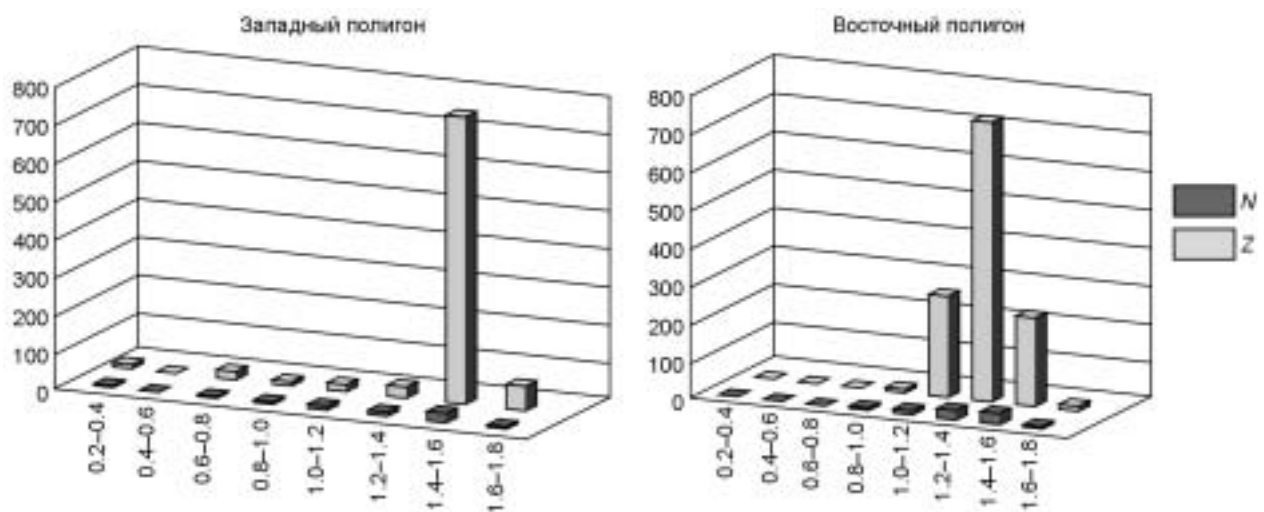


Рис. 2.  $N = N(D)$ -гистограмма распределения числа ячеек размером  $37.5 \times 37.5$  км по интервалам показателя фрактальной размерности  $D$ ,  $Z = Z(D)$  — гистограмма распределения числа эпицентров землетрясений (попадающих в эти ячейки) по интервалам показателя фрактальной размерности  $D$ .

Обращает на себя внимание то, что найденные распределения  $N = N(D)$  и  $Z = Z(D)$  характеризуются немонотонным поведением и имеют явно выраженный максимум. При этом для Западного и Восточного полигонов имеет место отличие распределений  $N(D)$ ,  $Z(D)$  как по форме, так и по локализации положения максимумов в зависимости от значений  $D$ . В Западном полигоне распределение  $Z(D)$  представляет собой узкий пик, так как 81.9 % землетрясений от общего числа, принадлежащих этому полигону, локализовано в интервале  $D = 1.4 - 1.6$ . В Восточном полигоне распределение  $Z(D)$  более широкое, при этом 20 % от числа землетрясений здесь приходится на интервал  $D = 1.0 - 1.2$ , наибольшее количество (58 %) на интервал  $D = 1.2 - 1.4$  и 19 % принадлежит интервалу  $D = 1.4 - 1.6$ . Таким образом, Восточный полигон характеризуется более симметричным распределением  $Z(D)$  числа эпицентров по показателю  $D$ . Величина среднего показателя фрактальной размерности (среднеарифметическое по разбиению на 64 ячейки) для Западного и Восточного полигонов соответственно равна 1.64 и 1.61.

В Западном и Восточном полигонах, как видно из рис. 1, выделяются две области самого плотного размещения эпицентров землетрясений. Поэтому мы выбрали два бокса (на рис. 1 они выделены сплошной линией и пронумерованы соответственно цифрами 1 и 2), которые вмещают эти зоны, и вычислили величину фрактального показателя  $D$  для них. Расчеты показали, что значения  $D$  для этих областей различны.

Бокс 1 (на карте он слева) относится к Шапшало-Цаган-Шибетинской зоне, имеет фрактальную размерность 1.53. Число эпицентров, попадающих в эту область, составляет 479, что соответствует 51.28 % от числа землетрясений, включенных в Западный полигон. Бокс 2 (на карте справа) принадлежит Билин-Бусийнгольской зоне и имеет более низкое значение фрактальной размерности разломных полей —  $D \approx 1.27$ . Бокс 2 содержит 469 эпицентров землетрясений, что составляет 39.5 % от числа землетрясений Восточного полигона. В целом Восточный полигон имеет более низкий показатель фрактальной размерности разломных полей, но количественно содержит большее число землетрясений.

Таким образом, для территории Тувы установлена количественная взаимосвязь между распределением величины показателя фрактальной размерности поля разломов и распределением числа эпицентров землетрясений энергетического класса  $K \geq 9$ . Характерной особенностью является приуроченность максимума числа землетрясений к областям, где фрактальная размерность поля разломов принадлежит определенному интервалу. На примере Западного и Восточного полигонов показано, что количественные характеристики этой связи зависят от локализации разломов. Интервал  $D$ , на который приходится максимумы распределения  $Z(D)$ , лежит между значениями  $1.2 \leq D \leq 1.6$ . Причем для Восточного полигона, на который приходится большее число землетрясений, этот интервал сужается в область меньших значений  $D$  —  $1.2 \leq D \leq 1.4$ . Полученные результаты согласуются с расчетами, приведенными в работах [Стаховский, Белоусов, 1996, 1997] для других сейсмически-активных горных систем. Отметим также, что найденное среднее значение  $D$  для Восточного полигона количественно близко к значению фрактальной размерности  $D = 1.68$ , установленное в работе [Шерман, Гладков, 1999] для Байкальской рифтовой зоны. Отклонение составляет  $\approx 4$  %.

#### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ПОЛЯ РАЗЛОМОВ ПО ЗОНАМ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ

В данном разделе предлагается еще один подход для выявления связи между распределением значений фрактального показателя системы разломов и сейсмоактивностью территории. С этой целью воспользуемся схемой сейсморайонирования ОСР-97 (рис. 3). В соответствии с ней территория Тувы принадлежит к 8—10-балльным зонам по шкале интенсивности сотрясений MSK-64. Электронный вариант схемы сейсморайонирования является компонентом упоминавшейся ранее геоинформационной системы. С ее помощью и пакета FracFault проведен совместный „пространственный“ анализ слоев „система разломов + границы зон сейсморайонирования“, приведенных к одному масштабу. Фрактальная размерность системы разломов

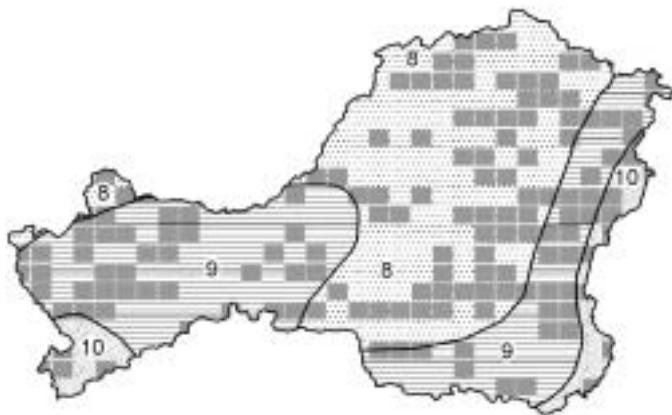


Рис. 3. Размещение ячеек, имеющих фрактальную размерность  $D = 1.2 - 1.4$  по зонам 8—10 баллов.

**Рис. 4. Распределение фрактальных показателей  $D$  по сейсмозонам (8—10 баллов).**

Штрихпунктирной линией изображено модельное гауссово распределение  $\lambda(D)$ .

подсчитывалась для боксов размером  $22 \times 22$  км. Размер покрывающих боксов равнялся  $1 \times 1$  км. Графически выделялись боксы, принадлежащие к одному интервалу фрактальной размерности (например  $1.2—1.4$ , см. рис. 3).

Количество полученных боксов подсчитывалось в каждой из сейсмозон для интервалов значений  $D$  от  $0.2—0.4$  до  $1.8—2.0$ . Результаты вычисления относительной частоты (вероятности)

$\lambda_i = \frac{n_i}{N_i}$ , где  $n_i$  — число ячеек данной фрактальной

размерности, попадающей в зоны  $i$ -й балльности ( $i = 8, 9, 10$ ),  $N_i$  — общее число ячеек в  $i$ -й зоне, представлены на рис. 4. Здесь для удобства математической обработки полученных графиков функций  $\lambda_i$  изменен масштаб по оси абсцисс. В соответствии с этим интервал  $1 \leq D \leq 9$ , на котором задано распределение  $\lambda_i$ , строго соответствует интервалу  $0.2 \leq D \leq 2.0$ .

Характерной особенностью установленной зависимости распределений  $\lambda_i$  от интервалов значений фрактальной размерности  $D$  является немонотонное поведение с отчетливо выраженным максимумом. Существенно, что максимумы трех распределений  $\lambda_8, \lambda_9, \lambda_{10}$  лежат в области значений  $5 < D < 8$  (или что эквивалентно  $1.2 \leq D \leq 1.6$ ). На рис. 4 штрихпунктирной линией представлено „эффективное“ (модельное) распределение  $\lambda = \lambda(D)$ , полученное аппроксимацией по методу наименьших квадратов найденных распределений гауссовым распределением:

$$\lambda(D) = \frac{A}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(D - D_c)^2}{2\sigma^2}\right) + B, \quad (1)$$

где  $A, B$  — постоянные, соответственно равные  $A = 0.9385 \pm 0.07181$ ,  $B = 0.00683 \pm 0.00697$ . Параметры  $D_c$  и  $\sigma$  имеют смысл математического ожидания и стандартного отклонения. Для них получено  $D_c = 6.23811 \pm 0.03165$  и  $2\sigma = 1.63269 \pm 0.07181$ . Значение  $D_c = 6.23811 \pm 0.03165$ , при котором аппроксимирующее распределение имеет максимум, приходится на промежуток  $1.2 \leq D \leq 1.4$ . Величина  $\lambda(D_c) = 0.45864$ .

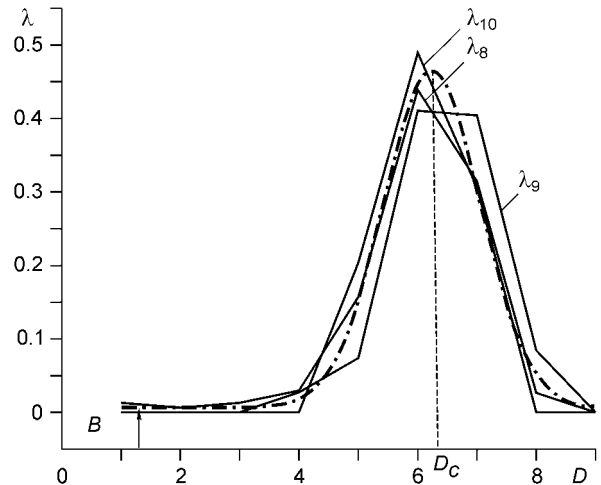
Таким образом, проведенный в этом параграфе анализ показывает, что одномодовый характер распределения  $\lambda = \lambda(S)$  обуславливает приуроченность сильных землетрясений (с интенсивностью сотрясений 8—10 баллов) к разломам, сеть которых характеризуется определенным интервалом значений фрактальной размерности. Установленный здесь интервал значений  $1.2 \leq D \leq 1.4$ , на который приходится максимум модельного распределения, хорошо согласуется с результатами предыдущего раздела и цитированных выше работ [Стаховский, Белоусов, 1996, 1997].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для территории Тувы установлена количественная взаимосвязь между распределением величины показателя фрактальной размерности поля разломов и распределением:

- 1) числа эпицентров землетрясений энергетического класса  $K \geq 9$ ;
- 2) зон балльности 8—10 по шкале интенсивности сотрясений MSK-64.

Характерной особенностью является приуроченность сильных землетрясений к областям, где фрактальная размерность поля разломов принадлежит определенному интервалу. Применительно к рассматриваемой территории это интервал значений  $1.2 \leq D \leq 1.6$ . Анализ показывает также, что имеется существенная пространственная зависимость формы и параметров распределений  $Z(D)$  и  $\lambda_i(D)$  от расположения сейсмоактивных областей. Например, для Западного полигона распределение  $Z(D)$  асимметрично и локализовано в интервале  $D = 1.4 - 1.6$ . Здесь распределение имеет резкий максимум, а вклад от прилегающих областей  $D = 1.0 - 1.2$  слева и  $D = 1.6 - 1.8$  справа более чем на порядок меньше.



Для Восточного полигона распределение  $Z(D)$ , наоборот, существенно более широкое и практически симметричное. Оно локализовано в области  $D = 1.0 - 1.6$ , где максимум приходится на интервал  $D = 1.2 - 1.4$ . Вопрос о физических причинах такой пространственной зависимости требует специального исследования, которое будет проведено в другой работе.

Представляется важным и то, что распределения  $\lambda_i(D)$ , полученные в результате совместной обработки поля разломов и схемы сейсморайонирования, с высокой точностью могут быть аппроксимированы гауссовым распределением (1). Это обстоятельство можно использовать в дальнейшем при более детальном математическом моделировании корреляционной зависимости между фрактальными характеристиками разломных полей и переменными, характеризующими сейсмоактивность территории.

Отметим, что приведенные в работе результаты исследования для территории Тувы согласуются с результатами, полученными в работах [Стаховский, Белоусов, 1996, 1997] для других сейсмически-активных горных систем Кавказа, Памира и Тянь-Шаня, а также работы [Шерман, Гладков, 1999] для Байкальской рифтовой зоны.

Подчеркнем также, что использованный в работе инструментарий геоинформационных систем существенно упрощает и расширяет возможности скейлингового анализа сеймотектонических процессов.

Авторы благодарны рецензентам за ряд важных замечаний, способствовавших улучшению работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

**Борняков С.А., Гладков А.С., Адамович А.Н., Матросов В.А., Клепиков В.А.** Информационная энтропия и фрактальная размерность как критерий самоорганизации систем разрывов в зонах разломов (по результатам моделирования) // Докл. РАН, 2003, т. 391, № 2, с. 250—253.

**Жалковский Н.Д., Кучай О.А., Мучная В.И.** Сейсмичность и некоторые характеристики напряженного состояния земной коры Алтае-Саянской области // Геология и геофизика, 1995, т. 36 (10), с. 20—30.

**Иванова В.С.** Универсальность свойств самоорганизации диссипативных структур живой и неживой природы // Синергетика, 1992, № 2, с. 85—98.

**Рычкова К.М., Лебедев В.И., Чупикова С.А.** Сейсмичность Тувы и проблемы прогнозирования землетрясений // Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. Кызыл, ТувИКОПР СО РАН, 2002, с. 62—68.

**Стаховский И.Р., Белоусов Т.П.** Масштабные инварианты в сеймотектонике // Докл. РАН, 1996, т. 347, № 2, с. 252—256.

**Стаховский И.Р., Белоусов Т.П.** Параметры локального самоподобия систем активных разломов и пространственное распределение сейсмичности // Докл. РАН, 1997, т. 354, № 4, с. 545—548.

**Федер Е.** Фракталы. М., Мир, 1991, 254 с.

**Хакен Г.** Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. М., Мир, 1991, 240 с.

**Шерман С.И., Гладков А.С.** Анализ фрактальных размерностей разломов и сейсмичности в Байкальской рифтовой зоне // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (1), с. 28—35.

*Поступила в редакцию 26 июля 2004 г.,  
после доработки — 1 марта 2006 г.*