

## ИЗМЕНЕНИЕ ВО ВРЕМЕНИ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ГИПОЦЕНТРОВ КАМЧАТСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

*Воропаев П.В.*

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН*

*Научный руководитель: к.ф.-м.н. Салтыков В.А.*

В работе исследуется изменение во времени величины фрактальной размерности распределения гипоцентров землетрясений Камчатки с 1966 по 2008 гг. Из Камчатского регионального сейсмического каталога, очищенного от афтершоков, была сделана выборка координат гипоцентров землетрясений. С использованием корреляционного интеграла был определен диапазон фрактальных свойств полученной выборки. Величина фрактальной размерности определялась наклоном корреляционного интеграла в двойном логарифмическом масштабе, вычислявшимся для плавающих окон размером 400 и 800 землетрясений. Продвижение плавающего окна производилось путем включения 10 последующих землетрясений выборки с исключением 10 начальных событий. Изучение вариаций фрактальной размерности позволило определить две аномалии, проявившиеся в периоды с 1975 по 1979 гг., и с 1983 по 1987 гг. Данные аномалии характеризуются резким уменьшением фрактальной размерности с достижением локального минимума, и по истечении определенного времени резки возвратом к первоначальным значениям. Сопоставление найденных аномалий с сейсмическим режимом, показывает проявление данных аномалий перед двумя сильными ( $M=6.9$ ,  $M=7.0$ ) землетрясениями Камчатки. Данный метод может быть использован для выявления необычной сейсмической активности предшествующей сильным землетрясениям Камчатки.

### Введение

Фрактальный анализ является методом изучения самоподобных явлений и процессов. Одним из примеров самоподобной структуры является сейсмический режим, то есть совокупность землетрясений, рассматриваемых как точки в пространстве-времени [4]. Степень неоднородности гипоцентрального распределения землетрясений может быть выражена величиной фрактальной размерности  $D$  [3, 5]. Данная величина не постоянна во времени. Вариациям  $D$  может быть дана следующая сейсмологическая интерпретация: при неравномерном распределении и росте концентрации гипоцентров землетрясений в определенном объеме, величина  $D$  увеличивается, при стремлении гипоцентров землетрясений распределиться равномерно, величина  $D$  будет уменьшаться. Известны случаи аномального поведения величины  $D$ , предшествующие сильному землетрясению [6]. Как следствие, изучение особенностей поведения величины  $D$  пространственно-временного распределения землетрясений представляет собой актуальную задачу.

### Использованные данные

В работе использованы данные Камчатского регионального каталога землетрясений Камчатского филиала геофизической службы РАН за период с 1966 по 2008 год. Представительным классом для данного каталога является  $K_S^{\Phi 68} = 8.5$  [1]. Данный каталог

был очищен от афтершоковых последовательностей с помощью методики Молчана-Дмитриевой [2] с использованием компьютерной программы, составленной и любезно предоставленной к. ф.-м. н., доцентом МГУ им. Ломоносова В. Б. Смирновым.

### Методика и результаты

Фрактальная размерность  $D$  гипоцентрального распределения землетрясений вычислялась методом корреляционного интеграла. Корреляционный интеграл  $C(r)$  определяется следующим выражением:

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N H(r - R_{ij}) \quad (1)$$

где  $N$  – число землетрясений в выборке,  $r$  – размер ячейки разбиения фазового пространства (в данном случае  $r$  – заданное линейное расстояние, с которым сравниваются все расстояния между землетрясениями из данной выборки),  $R_{ij}$  – расстояние между двумя землетрясениями из выборки с индексами  $i$  и  $j$ .  $H$  – функция Хевисайда (данная функция  $H(x)=0$  при  $x < 0$  и  $H(x)=1$  при  $x > 0$ ). Фактически корреляционный интеграл представляет собой нормированное на  $N^2$  количество пар точек, расстояние между которыми меньше  $r$ .

В случае если гипоцентрального распределение является фрактальной структурой, то будет удовлетворяться следующее выражение:

$$C(r) \sim r^D \quad (2)$$

С целью выяснения фрактальных свойств гипоцентрального распределения землетрясений Камчатки была выбрана зона, включающая в себя полуостров Камчатка с прилегающими территориями. Данная зона ограничена следующими координатами: с юга - 50 град. с.ш., с севера - 60 град. с.ш., с востока - 150 град. в.д., с запада - 170 град. в.д. Из Камчатского регионального каталога землетрясений, очищенного от афтершоковых последовательностей, для данной зоны была сделана выборка землетрясений, которая составила 28942 события, с энергетическим классом  $K_S^{\Phi 68} \geq 8.5$ .

Вычисление корреляционного интеграла  $C(r)$  производилось в два этапа: 1) создана матрица гипоцентральных расстояний между землетрясениями из указанной выборки, 2) на основании полученной матрицы вычислялся корреляционный интеграл  $C(r)$  для  $r$  лежащем в интервале от 1 до 500 км, с шагом в 1 км. В результате строилась зависимость  $C(r)$ , на которой определялся участок, соответствующий выражению (2). Такое соответствие проявляется для  $10 \text{ км} \leq r \leq 40 \text{ км}$ . (рис. 1). Зависимость  $C(r)$  на указанном интервале аппроксимируется следующей функцией:  $C(r) = 5 \cdot 10^{-6} r^{2.917}$ , при этом коэффициент детерминации  $R^2 = 0.999$ , что говорит о наличии фрактальных свойств гипоцентрального рас-

пределения землетрясений Камчатки на данном интервале разбиения. Исходя из обнаруженных особенностей гипоцентрального распределения землетрясений, для вычисления изменений величины  $D$  во времени использовались значения  $r$  равные 10, 20 и 30 км.

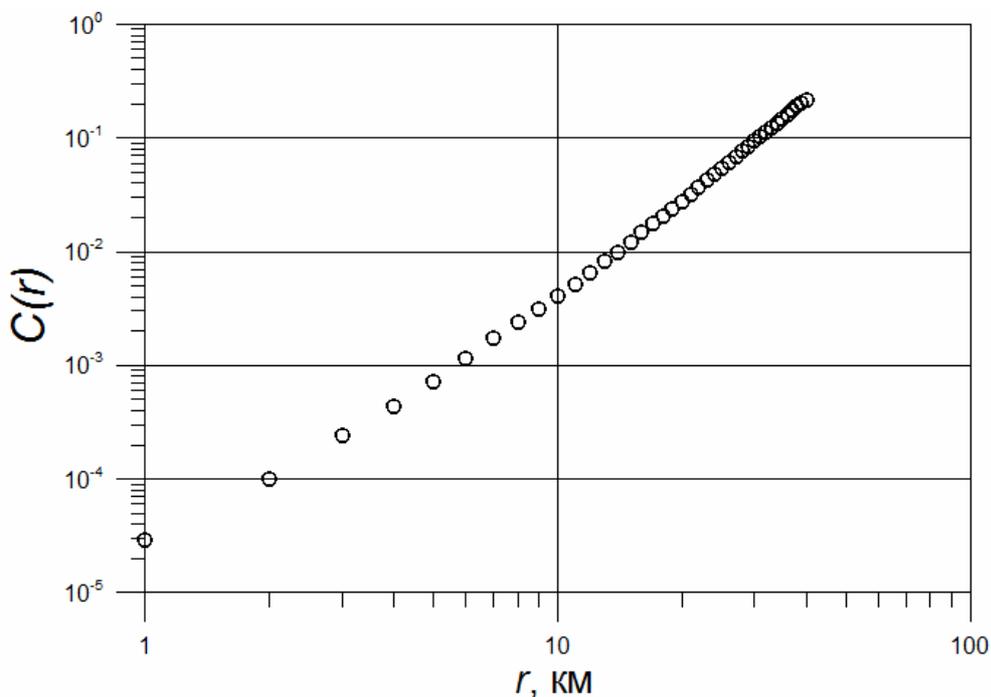


Рис.1. Зависимость  $C(r)$ , в двойном логарифмическом масштабе построенная на основании 5000 последовательных землетрясений для зоны, ограниченной координатами: 50 град. с.ш., 60 град. с.ш., 150 град. в.д., 170 град. в.д.

Для вычисления вариаций  $D$  во времени был использован метод плавающего окна. Использовано два типа окон, включавших в себя 400 и 800 последовательных землетрясений. Продвижение окна заключалось в добавлении 10 последующих событий между каждым вычислением  $D$ , при этом вычисленное значение  $D$  сопоставлялось времени окончания каждого временного окна. При рассмотрении графиков вариаций  $D$  во времени указанной зоны (рис. 2 а, б), выделяются две аномалии (I, II), проявившиеся в периоды с 1975 по 1979 гг., и с 1983 по 1987 гг. Данные аномалии характеризуются резким уменьшением величины  $D$ , с достижением локального минимума и по истечении определенного времени (в зависимости от величины временного окна), резким возвратом к первоначальным значениям.

Разбиение исследуемой площади на фрагменты, позволило выделить две зоны, ограниченные следующими координатами: 1) 55 град. с.ш., 60 град. с.ш., 150 град. в.д., 160 град. в.д., (рис. 3); 2) 50 град. с.ш., 55 град. с.ш., 150 град. в.д., 160 град. в.д. (рис. 5), на которых четко выделяются аномалии (I, II) значений  $D$  (рис. 2 в, г).

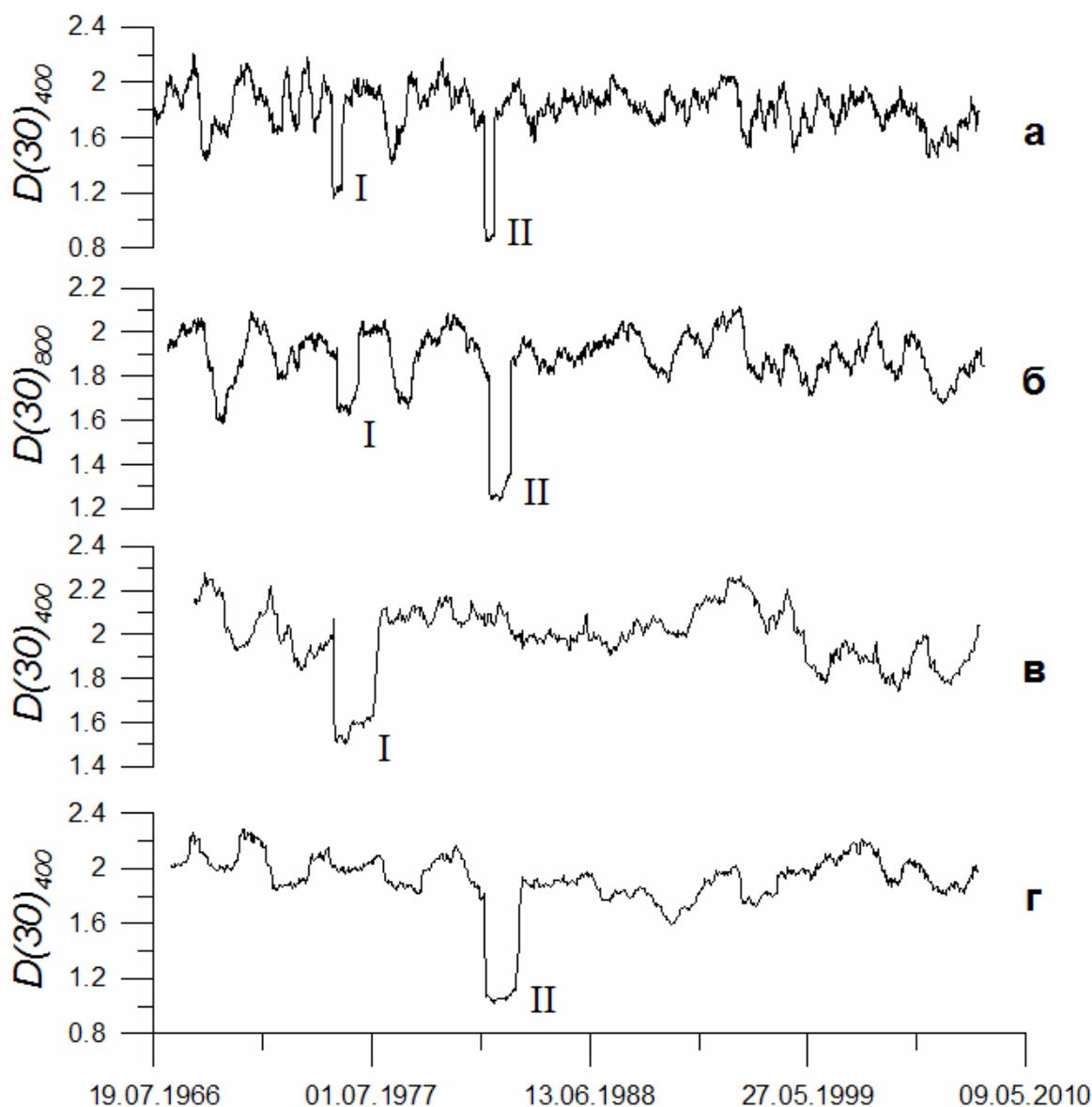


Рис.2. Вариации  $D$  при  $r=30$  км во времени. а, б – для зоны, ограниченной координатами: 50 град. с.ш., 60 град. с.ш., 150 град. в.д., 170 град. в.д., с величиной временного окна 400 и 800 суток соответственно; в – для зоны 55 град. с.ш., 60 град. с.ш., 150 град. в.д., 160 град. в.д., г – для зоны 50 град. с.ш., 55 град. с.ш., 150 град. в.д., 160 град. в.д., с величиной временного окна 400 суток. I, II – области аномальных значений  $D$ .

Сопоставление аномалий (I, II) с сейсмическим режимом Камчатки показывает, что аномалия I предшествовала землетрясению 21.12.1975 г. ( $M=6.9$ ) (рис. 4), I проявившись за 86 суток до землетрясения, аномалия II предшествовала землетрясению 17.08.1983 г. ( $M=7.0$ ) (рис. 6), проявившись за 93 дня до землетрясения.

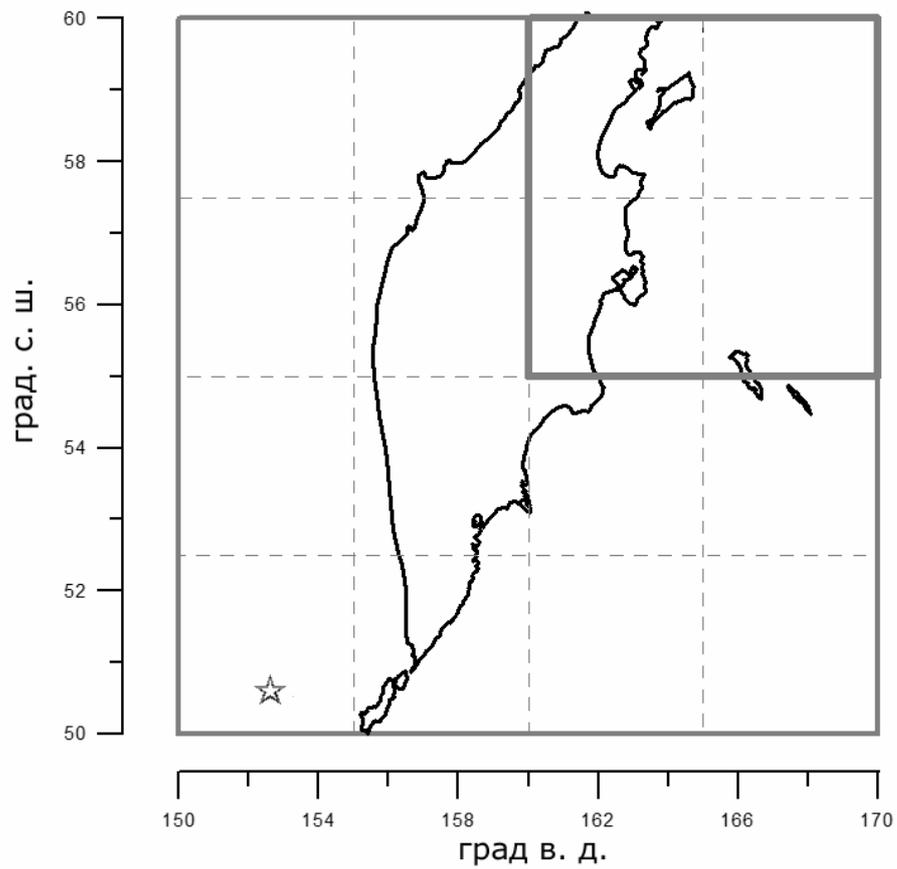


Рис.3. Фрагмент разбиения исследуемой площади (выделен жирной рамкой), ограниченный координатами: 55-60° с. ш., 160-170° в. д. Символом «звезда» обозначено землетрясение 21.12.1975, (M=6.9).



Рис.4. Изменение величины фрактальной размерности  $D$ , вычисленной при  $r=30$  км в плавающем окне в 400 землетрясений для зоны: 55-60° с. ш., 160-170° в. д. Стрелкой обозначено землетрясение 21.12.1975, (M=6.9).

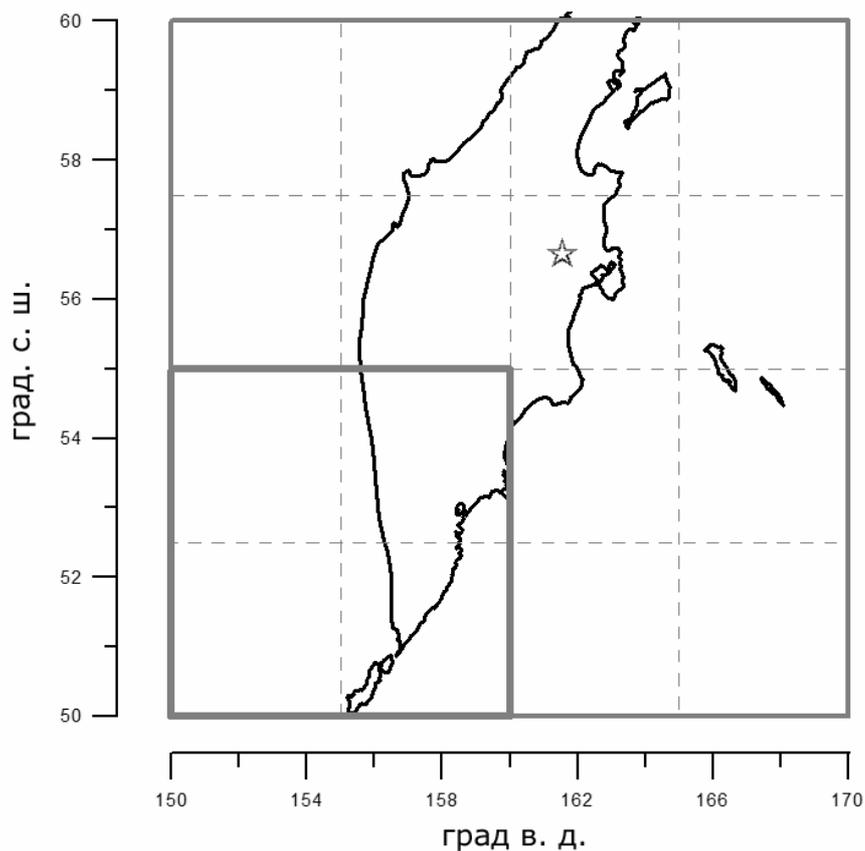


Рис.5. Фрагмент разбиения исследуемой площади (выделен жирной рамкой), ограниченный координатами: 50-55° с. ш., 150-160° в. д. Символом «звезда» обозначено землетрясение 17.08.1983, (M=7.0).



Рис.6. Изменение величины фрактальной размерности  $D$ , вычисленной при  $r=30$  км в плавающем окне в 400 землетрясений для зоны: 50-55° с. ш., 150-160° в. д. Стрелкой обозначено землетрясение 17.08.1983, (M=7.0).

### Заключение

Применение фрактального анализа к каталогу камчатских землетрясений позволило выделить аномалии во временном ряде величины фрактальной размерности гипоцен-

трального распределения очагов землетрясений  $D$ , предшествующих двум сильным землетрясениям Камчатки.

Данные аномалии заключаются в резком уменьшении величины  $D$  с достижением локального минимума и по истечении определенного времени резким возвратом к первоначальным значениям.

Таким образом, данный метод дает возможность выявить необычную сейсмическую активность, предшествующую сильным землетрясениям Камчатки.

### Литература

1. Гордеев Е. И., Чебров В. Н., Левина В. И. и др. Система сейсмологических наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 11-42.
2. Молчан Г. М. Дмитриева О. Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Современные методы обработки сейсмологических данных (Вычислительная сейсмология Вып 24). М.: Наука, 1991, С. 19-50.
3. Морозов А. Д. Введение в теорию фракталов. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. 160с.
4. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М., Наука, 1991, 96 с.
5. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 254с.
6. Murase K. A Characteristic Change in Fractal Dimension Prior to the 2003 Tokachi-oki Earthquake (Mj=8.0), Hokkaido, Northern Japan // Earth Planets Space. 2004, № 56, 401-405 pp.

### TEMPORAL CHANGES IN SPATIAL FRACTAL DIMENSION OF HYPOCENTER DISTRIBUTION OF THE KAMCHATKA EARTHQUAKES

*Voropaev P. V.*

In this work temporal changes in spatial fractal dimension of hypocenter distribution of the Kamchatka earthquakes with 1966 for 2008 is investigated. From the Kamchatkan regional seismic catalogue cleared from aftershocks, sample of co-ordinates of the hypocentres of earthquakes has been made. Using correlation integral the range of fractal properties of the received sample has been defined. The value of fractal dimension was defined by an inclination of correlation integral in the double logarithmic scale using floating windows for the size of 400 and 800 earthquakes. Advancement of a floating windows was made by inclusion of 10 subsequent earthquakes of sample with an exception of 10 initial events between each calculation. Analysis of fractal dimension variations has allowed to determine two anomalies shown during the periods with 1975 for 1979, and with 1983 for 1987. The given anomalies are characterized by sharp reduction of fractal dimension with achievement of a local minimum, and after certain time they sharp return to initial values. Comparison of the found anomalies to a seismic regime, shows display of the given anomalies before two strong (M=6.9, M=7.0) earthquakes of Kamchatka. The given method can be used for revealing of unusual seismic activity of Kamchatka previous strong earthquakes.