

## ДИАГНОСТИКА ПЕРИОДОВ ПОВЫШЕННОЙ ВЕРОЯТНОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С $M \geq 5.5$ НА МАЛЫХ АНТИЛЬСКИХ ОСТРОВАХ

*Н. Жирарден, И.М. Ротвайн*

### DIAGNOSIS OF THE TIMES OF INCREASED PROBABILITY FOR EARTHQUAKES WITH $M \geq 5.5$ IN THE LESSER ANTILLES ARC

*N. Girardin and I.M. Rotwain*

The 1979–1992 earthquake catalog issued by Department of Observatories, Institute of Physics of the Earth, Paris, provides an opportunity for intermediate-term prediction of earthquakes with magnitude  $M \geq 5.5$  in the Lesser Antilles arc. The CN algorithm, when applied to this catalog identified two Times of Increased Probability (TIP) of such earthquakes; one TIP precedes the only large earthquake (3.16.1985,  $M_l = 6.2$ ), which occurred during the period considered; the second TIP is an alarm still in force. During both TIPs the seismic activity increased above 40 km depth and decreased below it.

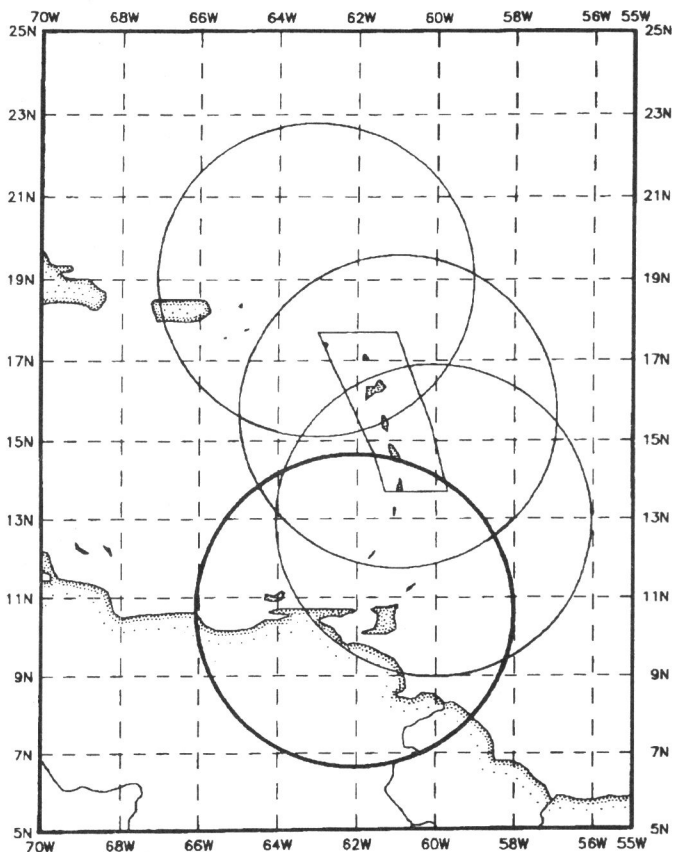
**Введение.** Малые Антильские острова – восточная часть Карибской плиты, предположение о существовании которой было высказано Морганом [1], а затем подтверждено исследованиями Молнара и Сайкса [2]. Эта островная дуга возникла в результате опускания Американской плиты под Карибскую. Особенности этой зоны субдукции являются малая скорость опускания (2 см/год) при относительно большом угле наклона [3] и отсутствие сейсмических событий с глубинами более 200 км.

Данные об ощутимых землетрясениях на Малых Антильских островах известны с 1530 г. [4–6]. Инструментальные записи землетрясений начались в 1936 г. с установки первой сейсмостанции на о. Мартиника. Локальная французская телеметрическая сеть была установлена здесь только в 1973 г. Она состояла из семи станций, расположенных на островах Мартиника, Доминика и Гваделупа и в 1978 г. была увеличена до 11 станций.

Анализ исторической и современной сейсмичности Малых Антильских островов показывает, что сильные поверхностные землетрясения, вызывающие здесь значительные разрушения, возникают только в северной части региона (севернее  $14^\circ\text{N}$ ) [7]. По данным NEIC [8] в этом регионе в нашем веке произошло 23 землетрясения с магнитудой  $M \geq 5.5$ , два из них с  $M \geq 7.5$ . Изучение проблемы прогноза землетрясений в этом регионе началось с работы [7] по прогнозу мест, где можно ожидать сильные землетрясения ближайшего будущего (в [7] была использована концепция сейсмической брешы [9]). Отсутствие землетрясений с  $M \geq 5$  в интервале широт  $16.1^\circ$ – $16.6^\circ\text{N}$  в течение 29 лет (1950–1978 гг.) позволило автору работы предположить, что местом будущего землетрясения с  $M \geq 7.5$  может стать этот интервал широт. В работе использованы глобальные каталоги NEIC и ISC за период 1950–1973 гг. и локальный каталог за период 1973–1978 гг.

Позже в этом регионе был применен алгоритм M8 [10] в рамках работы по среднесрочному прогнозу сильных землетрясений для Тихоокеанского сейсмического пояса. Этот алгоритм диагностировал для Малых Антильских островов период повышенной вероятности землетрясений с  $M \geq 7.5$ , начиная с 1987 г., в области, показанной на рис. 1. Анализ текущей сейсмичности позволил сузить эту область до круга с радиусом 427 км, центр которого имеет координаты  $10.5^\circ\text{N}$ ,  $62^\circ\text{W}$ . Таким образом, в настоящее время область тревоги захватывает только южную часть Малых Антильских островов.

В предлагаемой работе использован другой алгоритм среднесрочного прогноза сильных землетрясений – КН [11]. Оба алгоритма M8 и КН, так же как и другие ал-



Р и с. 1. Зоны тревог для Малых Антильских островов по [10]

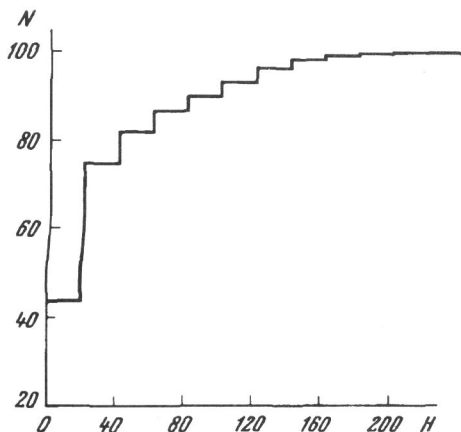
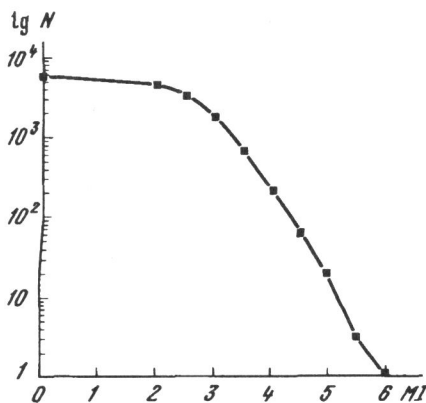
Круги – зоны, где диагностированы тревоги по алгоритму М8 (выделен круг, где диагностирована текущая тревога); многоугольник – регион, где применялся алгоритм КН

горитмы этого типа, основаны на пространственно-временных вариациях сейсмичности. Они рассматривают в качестве предвестниковых явлений увеличение сейсмической активности, группирование и нерегулярности в последовательности землетрясений.

Отличительное свойство алгоритмов такого типа – введение нормализации в определение предвестниковых явлений таким образом, чтобы алгоритм был применим к регионам с различным уровнем сейсмической активности.

Схема работы алгоритмов может быть кратко изложена следующим образом. Последовательность землетрясений в регионе представлена некоторыми характеристиками сейсмического потока. Каждая из этих характеристик представляется одной или несколькими функциями, значения которых вычисляются в скользящем временном окне. Период повышенной вероятности сильных землетрясений (ППВ) диагностируется, когда эти характеристики встречаются в некоторых комбинациях, типичных для предвестниковых явлений. Анализ сейсмичности, лежащий в основе этих алгоритмов, делается намеренно грубо, чтобы исключить индивидуальные особенности возникновения отдельных сильных землетрясений.

Эти алгоритмы имеют серьезные недостатки: большая территориальная неопределенность прогноза и большое число ложных тревог. В то же время они сформулированы одинаковым образом, полностью воспроизводимы и могут быть использованы для практических целей.



Р и с. 2. График повторяемости землетрясений для Малых Антильских островов

Р и с. 3. Зависимость числа землетрясений от глубины  $H$   
По вертикальной оси – число событий с глубинами  $\geq H$

Подробное описание этих алгоритмов и их применение к различным сейсмоактивным регионам мира можно найти в [11, 12].

Остановимся на некоторых деталях алгоритма КН, которые необходимы для дальнейшего изложения работы. Назовем интервалы времени, предшествующие сильным землетрясениям,  $D$ -интервалами, интервалы времени вдали от сильных землетрясений –  $N$ -интервалами. В каждый момент времени с шагом 2 мес. мы считаем величины  $n_D$  и  $n_N$  – количество признаков сейсмического потока, характерных для  $D$  и  $N$  интервалов (соответственно), встретившихся в данный момент времени.

ППВ сильного землетрясения диагностируется в момент времени  $t$ , сроком на один год при выполнении следующих условий:

$$\Delta(t) = n_D - n_N \geq \bar{\Delta}, \quad (1)$$

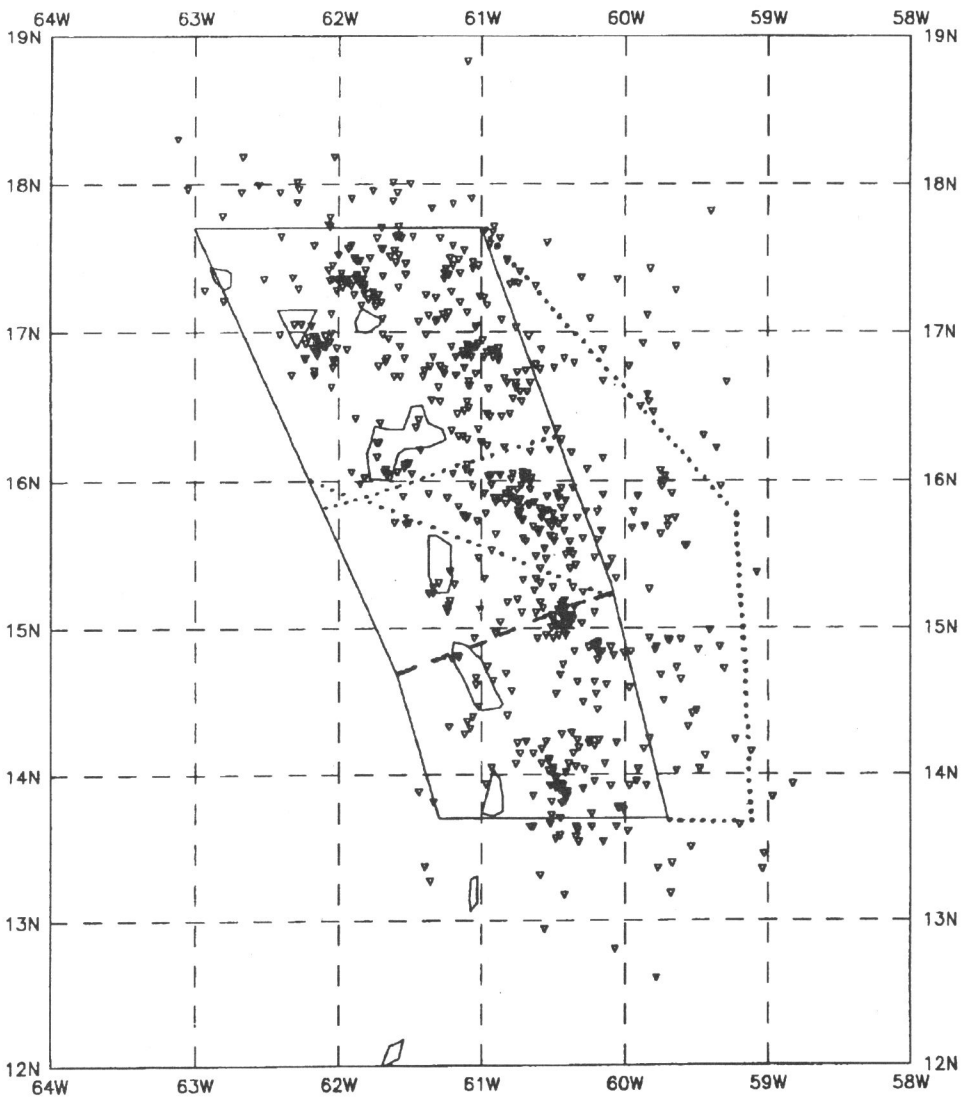
$$\sigma(t) = 10^{-(M_0-4.5)} \sum 10^{(M_i-4.5)} < \bar{\Sigma}. \quad (2)$$

Суммирование в (2) проводилось для основных толчков, которые произошли в течение трех лет до момента  $t$ . Сильные землетрясения определяются условием  $M \geq M_0$  ( $\bar{\Delta}, \bar{\Sigma}, M_0$  – численные параметры алгоритма КН).

Условие (1) отражает ситуацию, типичную для периодов, предшествующих сильным землетрясениям. Условие (2) означает, что землетрясения, произошедшие за предшествующие три года, освободили не слишком большую часть площади возможных очагов.

Признаки  $D$  и  $N$  и все численные параметры алгоритма были найдены при ретроспективном анализе сейсмичности Калифорнии и Невады [12], а затем перенесены на ряд других сейсмоактивных регионов мира [12–15]. Результаты применения алгоритма КН к 20 регионам мира можно коротко резюмировать следующим образом: ППВ предвещали 56 из 68 сильных землетрясений, длительность ППВ составляла в среднем 30% от рассматриваемого интервала времени (около двух лет на одно сильное землетрясение при среднем интервале времени между сильными землетрясениями около 8 лет). Данные результаты позволяют предположить, что предвестники возникновения сильных землетрясений в различных регионах подобны. Это и стимулировало попытку применения алгоритма КН к территории Малых Антильских островов.

**Исходные данные.** В работе использован локальный каталог Департамента Обсер-



Р и с. 4. Схема регионализации территории Малых Антильских островов

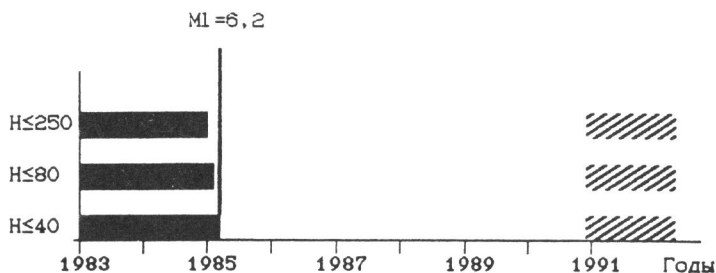
Сплошная линия – граница рассмотренного региона; штриховая – граница между северным и южным подрегионами; пунктирная – варианты границ в контрольных экспериментах; треугольник – эпицентр землетрясения: маленький – с  $M \geq 3$ , большой – с  $M \geq 5.5$

ваторий Парижского Института Физики Земли [16] с 1979 по 1992 гг. Точность определения эпицентра и глубины землетрясений составляет около 20 км. Приведенная в каталоге локальная магнитуда вычисляется по формуле [17]:

$$M_l = -0.87 + 2 \log D + 0.0035d, \quad (3)$$

где  $D$  – длительность коды волны (с);  $d$  – расстояние до эпицентра (км).

Расположение сейсмостанций на рассматриваемой территории не позволяет с достаточной степенью точности определять локализацию землетрясений с  $M \geq 4.5$  к северу от острова Гваделупа и к югу от острова Мартиника. Это приводит к значительным ошибкам в определении локальной магнитуды. Для таких событий локальная маг-



Р и с. 5. Диагностика ППВ в зависимости от глубины используемых землетрясений

Вертикальная линия – момент сильного землетрясения; прямоугольники: сплошной – ППВ, предшествующий сильному землетрясению; штрихованный – текущая тревога. По вертикальной оси слева даны ограничения по глубине



Р и с. 6. Диагностика ППВ для южного и северного подрегионов  
Обозначения, как на рис. 5

нитуда подсчитывалась по формуле (3) с использованием координат эпицентров из каталога NEIC [8].

Представленный на рис. 2 график повторяемости землетрясений данной территории показывает, что каталог полон только для землетрясений с  $M \geq 3$ . Около 80% землетрясений имеет глубины до 40 км (рис. 3), поэтому мы использовали события с магнитудой  $M \geq 3$  и глубинами не более 40 км. Рассмотренная территория показана на рис. 4. Северная, западная и южная границы не вызывают сомнений, поскольку вне их использованный каталог не репрезентативен. Влияние выбора восточной границы и порога по глубине на результаты прогноза будет обсуждаться ниже.

Величина  $M_0$ , определяющая сильные ("прогнозируемые") события, обычно выбирается в регионе таким образом, чтобы средний интервал времени между ними составил около семи лет. В рассматриваемом регионе это соответствует  $M_0 = 5.5$ . За период времени с 1979 по 1992 г. произошло одно сильное землетрясение с параметрами:

дата – 16.03.1985; время –  $14^{\text{h}}54^{\text{m}}2.05^{\text{s}}$ ; координаты –  $\varphi = 17.2^{\circ}\text{N}$ ,  $\lambda = 62.29^{\circ}\text{W}$ ; глубина (H) – 8 км;  $M_l = 6.2$ .

**Результаты.** Используя локальный каталог с 1979 г., можно диагностировать ППВ только с 1983 г. (здесь и далее алгоритм КН применяется без каких-либо изменений численных параметров [12]). Результаты диагностики ППВ, приведенные на рис. 5 и в таблице для Малых Антильских островов, показывают, что диагностировано два периода повышения вероятности сильных землетрясений: один предшествует единственному сильному землетрясению 1985 г., второй – с 01.09.1990 г. и по настоящее время является текущей тревогой. Продолжительность ППВ составляет

Начало ППВ	Сильное землетрясение		Конец ППВ	Продолжительность ППВ, мес (* — текущая тревога)
	Дата	М		
Малые Антильские острова				
01.01.1983	16.03.1985	6.2	—	26.5
01.09.1990	—	—	01.01.1993	14.0*
Северный подрегион				
01.01.1983	—	—	01.03.1985	26.0
—	16.03.1985	6.2	—	—
Южный подрегион				
01.09.1990	—	—	01.01.1993	27.0*

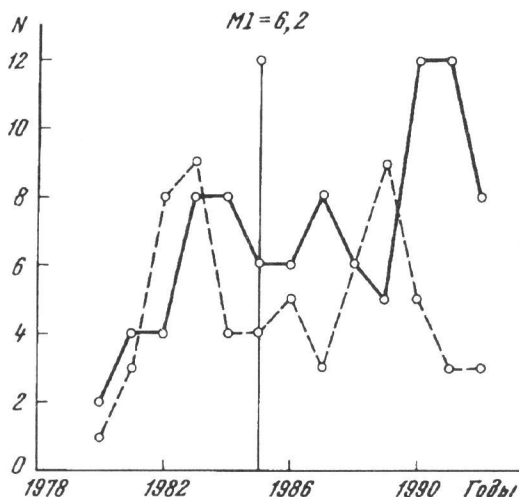
около двух лет, что соответствует результатам, полученным по другим регионам мира.

Для локализации текущей тревоги регион был разделен на два подрегиона: северный и южный (см. рис. 4). Результаты применения алгоритма КН к каждому из подрегионов в отдельности приведены в таблице и на рис. 6. В северном подрегионе диагностирован ППВ, предшествующий землетрясению 1985 г. и заканчивающийся за 16 сут. до него. Таким образом, формально сильное землетрясение 1985 г. в этом случае является пропуском цели. Однако результат удовлетворительный, поскольку связь диагностированного ППВ с данным сильным землетрясением очевидна. Текущая тревога в северном подрегионе не диагностируется. В южном подрегионе, наоборот, диагностируется только текущая тревога. Таким образом, есть основание полагать, что будущее сильное землетрясение произойдет, скорее всего, в южном подрегионе.

Заметим, что эти выводы не противоречат описанным выше результатам, полученным в работе [10], где текущая тревога распространяется только на южную часть Малых Антильских островов.

**Контрольные эксперименты.** Проверка устойчивости результатов прогноза к вариации границ региона показала, что изменение восточной границы (см. рис. 4) практически не влияет на результаты прогноза. Они остаются неизменными и при небольших вариациях границы между северным и южным подрегионами. При значительном смещении этой границы к северу, результаты прогноза становятся неопределенными: ППВ, предшествующий сильному землетрясению 1985 г., диагностируется теперь в южном подрегионе, в то время как оно произошло в северном. Этот результат позволяет предположить, что предвестниковые эффекты, предшествующие данному сильному землетрясению, локализованы в центральной части региона.

До сих пор алгоритм КН использовался только для прогноза поверхностных сильных землетрясений (исключение составляет регион Вранча, где прогнозировались сильные землетрясения с промежуточными глубинами очага [12]). В данной работе впервые была сделана попытка применить алгоритм КН в зоне субдукции, где глубина землетрясений может стать существенной для результатов прогноза. Из рис. 5 видно, как меняются результаты прогноза при изменении порога по глубине рассматриваемых событий. Несомненно, что показатели прогноза ухудшаются по мере увеличения глубин рассматриваемых событий. Возможное объяснение этого эффекта можно найти во временном изменении числа землетрясений с глубинами до и более 40 км (рис. 7). В период, предшествующий сильному землетрясению, число поверхностных землетря-



Р и с. 7. Изменение числа землетрясений во времени для двух ограничений по глубине:  $H \leq 40$  км (сплошная линия),  $H > 40$  км (пунктир)

Вертикальная линия – момент сильного землетрясения

сений увеличивается, в то время как число землетрясений с промежуточными глубинами уменьшается. Таким образом, сейсмическая активизация, характерная для периодов подготовки сильных землетрясений, проявляется здесь только в поверхностных событиях.

Заметим, что аналогичная ситуация возникла и в период текущей тревоги: соотношение числа поверхностных и промежуточных землетрясений увеличилось в пользу поверхностных событий.

\* \* \*

Итак, изложенные результаты позволяют предположить, что использованный алгоритм среднесрочного прогноза (КН) может быть применен и в зонах субдукции для прогноза поверхностных сильных землетрясений. Для Малых Антильских островов диагностика ППВ землетрясений с  $M \geq 5.5$  при ретроспективном анализе успешна: тревога предшествует единственному сильному землетрясению, ложные тревоги отсутствуют. Однако проведенный анализ ограничен кратковременным периодом ретроспекции (1979–1992 гг.) и малым числом сильных землетрясений в рассмотренный период. Поэтому окончательные выводы о качестве прогноза для Малых Антильских островов можно будет сделать только по результатам мониторинга сейсмичности рассматриваемого региона.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Morgan W.J. Rises, trenches great faults and crustal blocks // J. Geophys. Res. 1968. Vol. 73, N 6. P. 1959–1982.
2. Molnar P., Sykes L. Tectonics of the Caribbean and middle America region from focal mechanisms and seismicity // Bull. Geol. Soc. Amer. 1969. Vol. 80, N 9. P. 1639–1684.
3. Minster J., Jordan T.H. Present day plate motions // J. Geophys. Res. 1978. Vol. 83, N B11. P. 5331–5354.
4. Poey M.A. Catalog chronologique des tremblements de terre ressentis dans les Indes Occidentales de 1530 a 1837 // Ann. Soc. Meteor. France. 1837. N 5. P. 75–127.
5. Perrey A. Sur les tremblements de terre aux Antilles // Mem. Acad. Dijon. 1845. P. 325–392.
6. Robson G.R. An earthquake catalogue for the Eastern Caribbean 1530–1960// Bull. Seismol. Soc. Amer. 1964. N 54. P. 785–832.
7. Dorel J. Seismicity and seismic gap in the Lesser Antilles arc and earthquake hazard in Guadeloupe // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1981. Vol. 67, N 3. P. 679–695.

8. Global Hypocenter Data Base CD-ROM, 1989. NEIC-USGS and continuation.
9. Kelleher J., Sykes L., Oliver J. Possible criteria for predicting earthquake locations and their application to major plate boundaries of the Pacific and Caribbean // J. Geophys. Res. 1973. N 78. P. 2547–2585.
10. Healy J.H., Kossobokov V.G., Dewey J.W. A test to evaluate the earthquake prediction algorithm, M8 // U.S. Geological Survey Open-File Report. 92–401, 1992. 121 p.
11. Keilis-Borok V.I., Kossobokov V.G. Premonitory activation of earthquake flow: algorithm M8 // Phys. Earth and Planet. Inter. 1990. Vol. 61, N 1–2. P. 73–83.
12. Keilis-Borok V.I., Rotwain I.M. Diagnosis of time of increased probability of strong earthquakes in different regions of the world: algorithm CN // Phys. Earth and Planet. Inter. 1990. Vol. 61, N 1–2. P. 57–72.
13. Кейлис-Борок В.И., Кузнецов И.В., Пацца Д., Ротвайн И.М. Диагностики периодов повышенной вероятности сильных землетрясений в Центральной Италии // Теория и алгоритмы интерпретации геофизических данных. М.: Наука, 1989. С. 24—28. (Вычисл. сейсмология, вып. 22).
14. De Bekker M., Dmitrieva O., Keilis-Borok V. et al. Premonitory seismicity patterns in a platform region (Ardenne–Rehinish and Brabant massifs, lower Rhine graben) // Phys. Earth and Planet. Inter. 1989. Vol. 57, N 3–4. P. 260–265.
15. Arieh E., Rotwain I., Steinberg J. et al. Diagnosis of time of increased probability of strong earthquakes in Jordan–Dead Sea rift zone // Tectonophysics. 1992. Vol. 202. P. 351–359.
16. Bulletins sismiques 1979–1991 – Observatoires volcanologiques. Paris: France.
17. Girardin N., Fevillard M., Viode J.P. Réseau regional sismique de l'arc de Petites Antilles. Seismicité superficielle (1981–1988) // Bull. Geol. Soc. France. N 162. P. 1003–1015.

УДК 550.341

## **ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ЭПИЦЕНТРОВ: "МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫЙ" ПОДХОД**

*Е.М. Блантер, М.Г. Шнирман*

### **A SPATIO-TEMPORAL CLUSTERING OF EPICENTERS: THE "MULTIFRACTAL" APPROACH**

*E.M. Blanter and M.G. Shnirman*

We suggest a multifractal approach to describe seismicity and study self-similarity properties of clustering in space and time. We construct models (synthetic catalogs), two fractal and two multifractal, and compare them with four real subcatalogs from southern California. The parameters of the models are found by fitting generalized dimensions. Relations are shown between the models and real catalogs.

Настоящая работа продолжает начатое в [1] изучение кластеризационных свойств как модельных, так и реальных точечных полей при помощи современной мультифрактальной технологии. В последние годы широкое распространение получила идея о самоподобии сейсмического процесса. Однако, как правило, пространственное распределение эпицентров и распределение событий во времени исследуются по отдельности. Между тем, если рассматривать сейсмический процесс в пространстве—времени, то очевидна корреляция между событиями, связанными, например, с возникновением после землетрясения серии афтершоков. В рамках только пространственной или только временной модели сейсмичности эту корреляцию учесть невозможно. Поэтому мы исследуем кластеризационные свойства поля эпицентров в пространстве—времени. Пространственно-временная кластеризация использовалась также Дэвисом и Фрелихом [2] для выделения афтершоков. Они проводили кластеризацию событий, вводя

ST-метрику  $D = \sqrt{d^2 + c^2 t^2}$ , где  $d$  – расстояние между гипоцентрами землетрясений,  $t$  – длина интервала времени между ними, измеряемая в сутках, а  $c$  – оцениваемая константа, которая получилась равной 1 км/сут. Объединение двух событий в кластер определялось неравенством  $D < D_{\text{best}}$  (характерные значения  $D_{\text{best}} \approx 70$  км). Мы решили не вводить ST-метрики, а кластеризацию определять