

УДК 550.341

ЛОКАЛЬНОЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНЫХ ЗОН КАК ПРЕДВЕСТНИК СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА МАЛОЙ АНТИЛЬСКОЙ ДУГЕ

П.Н. Шебалин¹, И.М. Ротвайн¹, В.И. Кейлис-Борок¹,
Н. Жирарден², Ж. Дюбуа²

¹Международный институт теории прогноза землетрясений
и математической геофизики Российской академии наук,

²Институт физики Земли, Париж

Статья является продолжением цикла работ по исследованию явления кратковременной активизации локально менее активных зон на фоне относительного затишья локально более активных зон, возникающего в эпицентральной зоне за несколько месяцев до землетрясения. Предложенный ранее на основе этого явления алгоритм прогноза был ретроспективно опробован в Южной Калифорнии и на Малой Антильской дуге. В данной работе предлагается модификация алгоритма, позволяющая, в частности, увеличить число рассматриваемых сильных землетрясений за счет расширения исследуемой территории. В результате ретроспективного прогноза на Малой Антильской дуге за период с января 1984 г. по август 1995 г. восемь из девяти сильных землетрясений произошли в пространственно-временных областях повышенной вероятности возникновения сильных землетрясений. Пространственно-временной объем этих областей относительно всего рассмотренного объема пространства-времени составляет 8%.

LOCAL REDISTRIBUTION OF ACTIVE ZONES AS THE PRECURSOR OF LARGE EARTHQUAKES IN LESSER ANTILLEAN ARC

P. N. Shebalin¹, I. M. Rotwain¹, V. I. Keilis-Borok¹,
N. Girardin², and J. Dubois²

¹International Institute of Earthquake Prediction Theory
and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences,

²Institut de Physique du Globe de Paris

This paper is a new one in a sequence of publications on the study of the precursory pattern of short-term activation in locally less active seismic zones on the background of relative quiescence in locally more active zones which takes place several months before a large earthquake in its epicentral zone. On the basis of this pattern we have earlier suggested a prediction algorithm and have tested retrospectively the algorithm for southern California and the Lesser Antillean Arc. The algorithm determined spatial areas of 100 km × 100 km

(approximately) in which probability of the occurrence of large earthquakes was increased for the period of one year. In the present work we suggest a modification of the algorithm which allows us to expand the territory considered and the number of large earthquakes. As the result of the retrospective prediction in the Lesser Antillean Arc for the period 1984 – August 1995, eight of the nine large earthquakes have occurred in time-space areas of increased probability. The time-space volume of TSIPs is 8% of the total considered volume.

ВВЕДЕНИЕ

Существующие алгоритмы среднесрочного прогноза землетрясений КН [1] и М8 [2] диагностируют периоды повышенной вероятности (ППВ) сильных землетрясений. При этом, как правило, линейные размеры пространственной области, соответствующей ППВ, составляют сотни километров. Средняя продолжительность ППВ составляет около 2 лет на одно сильное землетрясение, а суммарная продолжительность – около 30% рассматриваемого интервала времени. Задача пространственной и временной локализации такого прогноза является весьма актуальной. Определенный успех в этом направлении достигнут с помощью алгоритма Сценарий Мендосино [3], основанного на определении мест относительного затишья, где и прогнозируется ожидаемое сильное землетрясение. Этой же проблеме были посвящены наши две предыдущие работы [4, 5].

В работе [4] описан обнаруженный на территории Южной Калифорнии эффект кратковременной (порядка месяца) локальной активизации тех зон, которые долгое время находились в состоянии пониженной сейсмической активности, одновременно с затишьем в зонах с высокой сейсмической активностью. Пространственные размеры областей, где этот эффект наблюдается, – около 100 км². На основе обнаруженного явления был сформулирован алгоритм прогноза, диагностирующий пространственно-временные области повышенной вероятности (ПВОПВ) сильных землетрясений. В результате ретроспективного применения этого алгоритма в Южной Калифорнии было обнаружено: для шести из восьми сильных землетрясений были диагностированы ПВОПВ, составившие 7% рассмотренного пространственно-временного объема.

В работе [5] алгоритм был усовершенствован, что позволило существенно повысить устойчивость результатов. Применение алгоритма в регионе Малой Антильской дуги ретроспективно дало следующий результат: для пяти из семи сильных землетрясений были диагностированы ПВОПВ, относительный объем которых составил 7.4%.

В данной работе, являющейся естественным продолжением работы [5], предлагается модификация этого алгоритма, позволяющая, с одной стороны, его упростить и, с другой – увеличить число прогнозируемых сильных землетрясений за счет расширения территории исследуемого региона.

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Проведем качественное описание алгоритма и отличий новой его версии от предыдущей [5].

Землетрясения рассматриваемой территории делятся на два типа: события, эпи-

центры которых находятся в областях с локально более высоким уровнем фоновой сейсмичности (тип А) и с локально более низким ее уровнем (тип Н); для этого рассматриваются круги фиксированного радиуса, центры которых совпадают с эпицентрами классифицируемых землетрясений. Для них определяется плотность сглаженного распределения фоновой сейсмичности, как нормированная суперпозиция конусов единичной высоты с фиксированным радиусом основания и с центрами в эпицентрах классифицируемых землетрясений. При этом радиус основания обратно пропорционален числу эпицентров в рассматриваемом круге. Если вычисленная плотность в центре круга больше медианы распределения, то соответствующему эпицентру приписывается тип А, в противном случае – тип Н. Заметим, что благодаря такому определению количество событий двух типов в каталоге должно приблизительно совпадать.

В терминах событий типов А и Н рассматриваемое предвестниковое явление состоит в возрастании числа событий типа Н на фоне резкого сокращения числа событий типа А в некоторой пространственной области. Эта пространственная область может быть определена с помощью простейшего функционала: отношения числа событий типа Н к числу событий типа А в заданный (текущий) интервал времени в круге заданного радиуса. С определенной периодичностью по времени определяются компактные пространственные области аномально больших значений этого функционала. Если площадь такой области достаточно велика, то в ней объявляется тревога на заданный период времени. Это и составляет ПВОПВ сильного землетрясения.

Новый вариант алгоритма отличается от предыдущего [5] способом построения компактных областей с высокими значениями функционала. Если в [5] проводилось сканирование всей рассматриваемой территории с некоторым шагом, то теперь рассматривается объединение кругов с центрами в эпицентрах произошедших землетрясений, значение функционала в которых превышает заданный порог.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРЕДВЕСТНИКОВОГО ЯВЛЕНИЯ

Перейдем теперь к параметризации явления и формальному описанию алгоритма. Задача состоит в построении пространственно-временных областей, в которых повышена вероятность возникновения сильных землетрясений. Сильные землетрясения определяются условием $M \geq M_0$.

Классификация эпицентров типа А и Н. Для каждого момента t в точке с географическими координатами (φ, λ) будем рассматривать эпицентры землетрясений с $M \geq M_{\min}$ в интервале времени $C = [t - T_c, t]$ в круге R радиуса R с центром в точке (φ, λ) . Назовем этот интервал времени и соответствующие сейсмические события "текущими". Пусть событие j произошло в момент времени $t_j \in C$, и его эпицентр имеет географические координаты $(\varphi_j, \lambda_j) \in R$. Рассмотрим для этого события "фоновую" сейсмичность: события с $M \geq M_{\text{фон}}$ в течение интервала времени $B_j = [t_j - T_b - T_c, t_j - T_c]$ внутри круга D_j радиуса D с центром (φ_j, λ_j) .

В круге D_j определим плотность сглаженного распределения фоновой сейсмичности $p_j(\varphi, \lambda)$:

$$p_j(\varphi, \lambda) = \alpha \sum_{k, d(\varphi, \lambda, \varphi_k, \lambda_k) \leq r_j} \{1 - d(\varphi, \lambda, \varphi_k, \lambda_k)/r_j\}. \quad (1)$$

Здесь: α – нормировочный коэффициент, который выбирается так, чтобы $\int_{D_j} p_j(\varphi, \lambda) = 1$; k – номер фонового события, (φ_k, λ_k) – его эпицентр; $d(\varphi, \lambda, \varphi_k, \lambda_k)$ – расстояние между точками (φ, λ) и (φ_k, λ_k) .

Величина r_j зависит от числа эпицентров в интервале времени B_j в круге D_j и определяется по формуле

$$r_j = D(N_0/N_j)^{1/2}, \quad (2)$$

где N_j – число эпицентров с $M \geq M_{\text{фон}}$ в круге D_j и интервале времени B_j ; N_0 – задаваемая константа.

Определим медиану $p_{1/2}$ плотности $p_j(\varphi, \lambda)$, т.е. такое ее значение, что интеграл $p_j(\varphi, \lambda)$ по точкам внутри круга D_j , в которых $p_j(\varphi_j, \lambda_j) < p_{1/2}$, равен интегралу по остальным точкам внутри круга. В расчетах интегрирование заменяется суммированием с шагом 0.01° по широте и долготе.

Текущий эпицентр j классифицируется как тип Н, если $p_j(\varphi_j, \lambda_j) < p_{1/2}$; в противном случае он относится к типу А.

Формулировка алгоритма. Выделим последовательные моменты времени с постоянным шагом τ : $t_0, t_1 = t_0 + \tau, t_2 = t_0 + 2\tau \dots$ и соответствующие интервалы времени $[t_i - T_c, t_i]$. Для каждого такого интервала рассмотрим круги радиуса R с центрами в эпицентрах землетрясений с $M \geq M_{\min}$, для которых выполняется условие

$$f(t_i, \varphi_j, \lambda_j) = n_H/(n_A + 1) \geq F, \quad (3)$$

где (φ_j, λ_j) – центр круга, n_H и n_A – соответственно число эпицентров типа Н и А внутри круга R за интервал времени C , а F – заданный порог.

Пусть Ω – объединение пересекающихся кругов, выделенных условием (3). В области Ω объявляется тревога сроком на период времени T , если выполняется условие: площадь $\Omega \geq S_{\min}$. Соответствующий пространственно-временной объем составляет элементарную ПВОПВ. Объединение всех пересекающихся в пространстве и времени элементарных ПВОПВ и составляет собственно ПВОПВ.

Если сильное землетрясение с $M \geq M_0$ происходит внутри ПВОПВ, это считается успехом, и после сильного землетрясения тревога отменяется. Если внутри ПВОПВ не происходит ни одного сильного землетрясения – это ложная тревога. Если сильное землетрясение происходит вне ПВОПВ – это пропуск цели.

Параметры M_0, τ, F, T и $S_{\min}$ вместе с параметрами $M_{\min}, M_{\text{фон}}, T_c, T_b, D, R$ определения функционала f составляют полный список параметров алгоритма.

Однородность каталога и ограничения рассматриваемой территории. Каталог землетрясений имеет разную представительность в разных частях рассматриваемой территории, интервалах времени и диапазонах магнитуды. Это связано с изменениями сейсмической сети, процедуры определения гипоцентров и магнитуд и т.д. Все эти факторы могут влиять на оценку сейсмической активности [6–8].

Увеличение однородности каталога обычно достигается введением ограничений по магнитуде, пространству и времени. Однако при исследовании пространственно-временных особенностей сейсмичности, такой способ, на наш взгляд, не решает проблемы. Достичь приемлемой однородности каталога одновременно для достаточно большой территории, периода времени и диапазона магнитуд практически невозможно. Поэтому необходимо введение характеристик потока землетрясений, которые мало чувствительны к этой неоднородности. Соотношение числа событий типов А и Н в небольших пространственно-временных объемах представляется именно такой устойчивой характеристикой.

Однако введение формальных границ рассматриваемой территории необходимо для исключения дополнительных степеней свободы при манипулировании данными. Очевидно, что алгоритм неприменим в тех местах, где каталог землетрясений содержит мало событий либо из-за удаленности сейсмических станций, либо из-за особенностей сейсмичности. Во обоих случаях в таких местах, в принципе, возможны сильные землетрясения. Поэтому для оценки эффективности алгоритма необходимо ввести формальное правило для исключения таких мест из рассмотрения. Для всего исследуемого интервала времени введем единую формальную границу рассматриваемого региона как огибающую области, образованной центрами кругов радиуса R , в которых в течение 30 лет (с 1965 по 1995 г.) произошло не менее 100 событий с $M \geq M_{\min}$.

Поясним теперь отдельные детали алгоритма с помощью рисунков.

Рис. 1 иллюстрирует рассматриваемое явление. На рис. 1,а,б приведены карты сейсмичности в периоды времени, предвещающие два сильных землетрясения, на рис. 1,в,г – карты сейсмичности в спокойные периоды времени за 3 года до тех же сильных землетрясений. В первом случае (рис. 1,а,б) в выделенных кругах отношение числа эпицентров типа Н и типа А составляет 19:1 и 17:1, что соответствует значениям функционала $f = 9.5$ и $f = 8.5$. Во втором случае (рис. 1,в,г) это отношение равно соответственно 4:2 и 22:6, а значения функционала $f = 1.33$ и $f = 3.15$. Большие значения функционала в периоды, предшествующие сильным землетрясениям, обусловлены возрастанием числа эпицентров типа Н и практически полным отсутствием событий типа А. В спокойные периоды либо невелико число событий обоих типов (рис. 1,в), либо достаточно велико число событий типа А (рис. 1,г).

На рис. 2 приведен график изменения функционала f по времени для точки с координатами 17.0°N , 62.0°W . На графике отчетливо видна корреляция anomalously больших значений функционала и моментов возникновения сильных землетрясений в круге радиусом 75 км с центром в той же точке.

Рис. 3 иллюстрирует способ сглаживания, предлагаемый в данной работе. В северной части Малой Антильской дуги выделено три круга радиусом 25 км (рис. 3,а) с тремя уровнями сейсмической активности. На рис. 3,б заштрихованные части кругов образованы точками, в которых $p(\varphi, \lambda) \geq p_{1/2}$ при разных величинах r_j . В кругах 1, 2, 3, расположенных по диагонали рисунка (от верхнего левого к нижнему правому кругу), эти значения вычислены по формуле (2) при $N_0 = 20$. Как видно на рис. 3,б, при этих значениях заштрихованные области компактны и вместе с тем достаточно контрастны. Напротив, при использовании каких-либо фиксированных, но малых значений r_j заштрихованные области могут оказаться

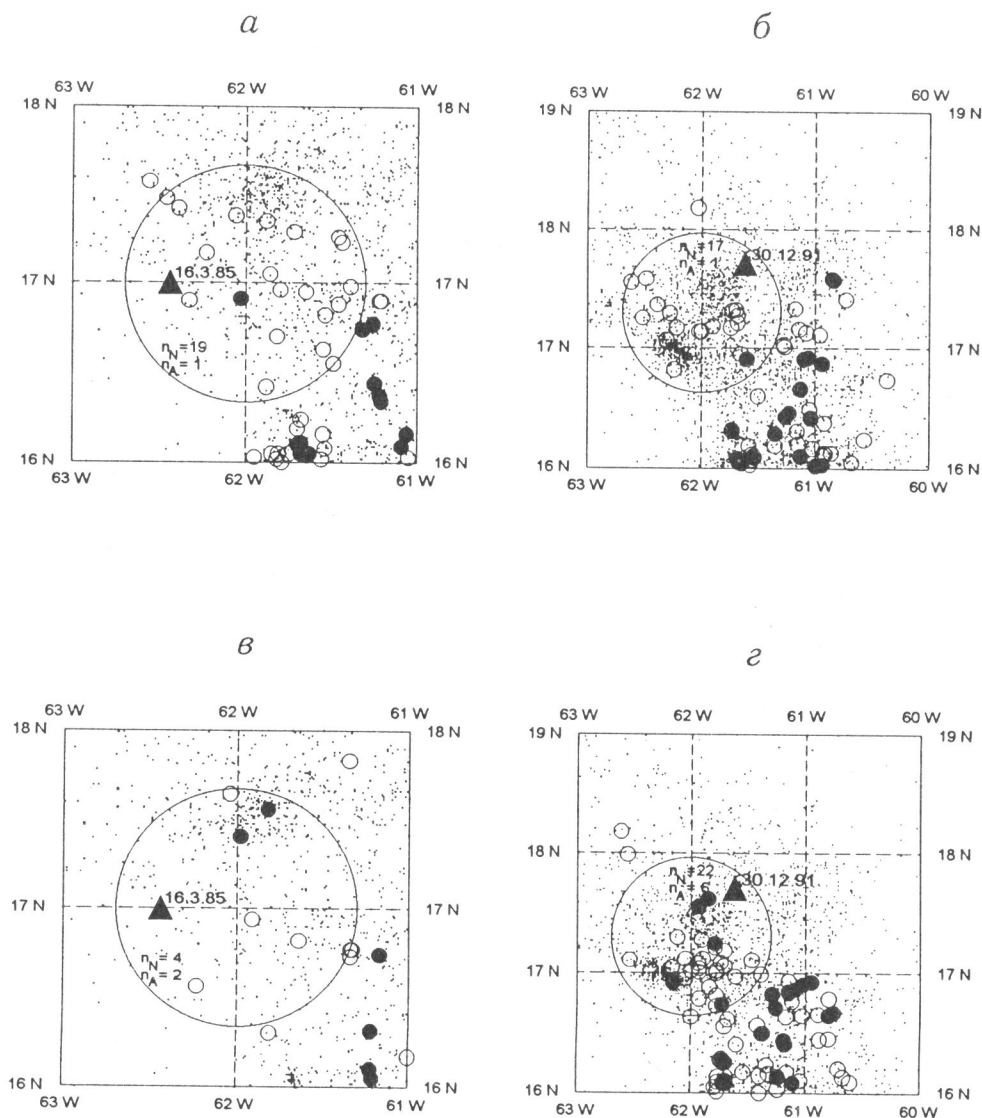


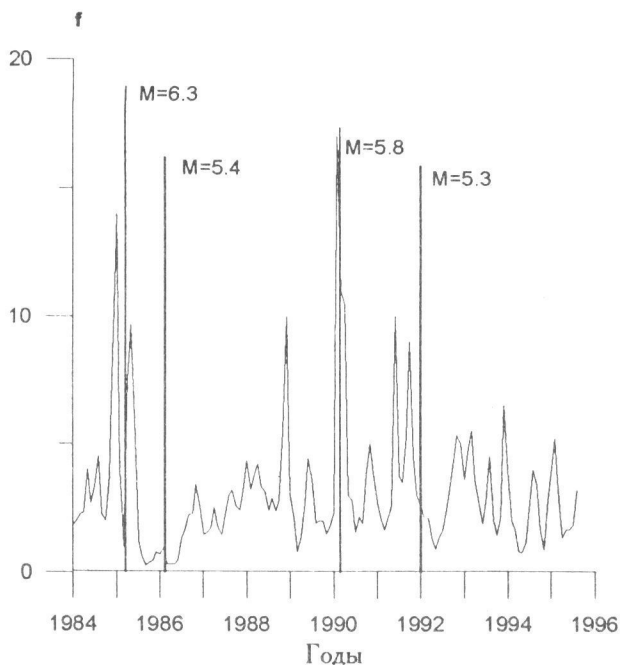
Рис. 1. Карты эпицентров типов Н и А в 3-месячные интервалы времени

а – 01.10.1984 г. – 01.01.1985 г. (за 2,5 мес до землетрясения 16.03.1985 г.); б – 01.07.1991 г. – 01.10.1991 г. (за 3 мес до землетрясения 30.12.1991 г.); в – 01.01.1982 г. – 01.04.1982 г. (за 3 года до землетрясения 1985 г.); г – 01.10.1987 г. – 01.01.1988 г. (за 3 года до землетрясения 1991 г.)

Белые кружки – тип Н, черные – тип А, точки – "фоновая" сейсмичность за 30-летний интервал времени; выделены круги радиусом 75 км и в них приведены соответствующие значения n_H и n_A числа событий типов Н и А. Значения функционала $f = n_H / (n_A + 1)$ на рис. 1, а, б в несколько раз превышают его значения на рис. 1, в, г

Рис. 2. График значений функционала f для точки (17°N , 62°W)

Вертикальные отрезки – моменты землетрясений с $M_{\text{комб}} \geq 5.25$ в северной части региона (высота отрезка пропорциональна магнитуде). Использованы значения параметров как в основном результате (см. табл. 1)



состоящими из большого числа пятен, а результат классификации неустойчивым (круг 2 при $r_j = 3.5$ км). При больших фиксированных значениях r_j заштрихованные области могут захватить и малосейсмичные части круга (круг 1 при $r_j = 13$ км).

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ ТЕСТ АЛГОРИТМА

Приведенный выше алгоритм был использован для ретроспективного прогноза сильных землетрясений на территории Малой Антильской дуги за период с января 1984 г. по август 1995 г. Ниже приводится описание исходных данных, значения параметров алгоритма, основного результата, а также результатов контрольного эксперимента со случайным каталогом.

Каталог землетрясений. В работе использовался локальный каталог землетрясений IGP [9], подготовленный Отделением вулканологических обсерваторий Парижского института физики Земли (Departement des Observatoires volcanologiques, Institut de Physique du Globe de Paris, IGP). В каталоге зарегистрированы землетрясения лишь с 1979 г., поэтому были использованы дополнительные данные за более ранний период. Кроме того, расположение сейсмических станций не обеспечивает одинаковой полноты данных в центральной части региона (от о-ва Гваделупа до о-ва Мартиника) и южной части (к югу от о-ва Мартиника). Поэтому дополнительные данные были использованы и для периода с 1979 г.

В качестве дополнительного источника данных использован каталог Восточного Карибского бассейна [10], продолженный данными NEIC [11]. Записи, относящиеся к одному и тому же землетрясению в разных каталогах, определялись по следую-

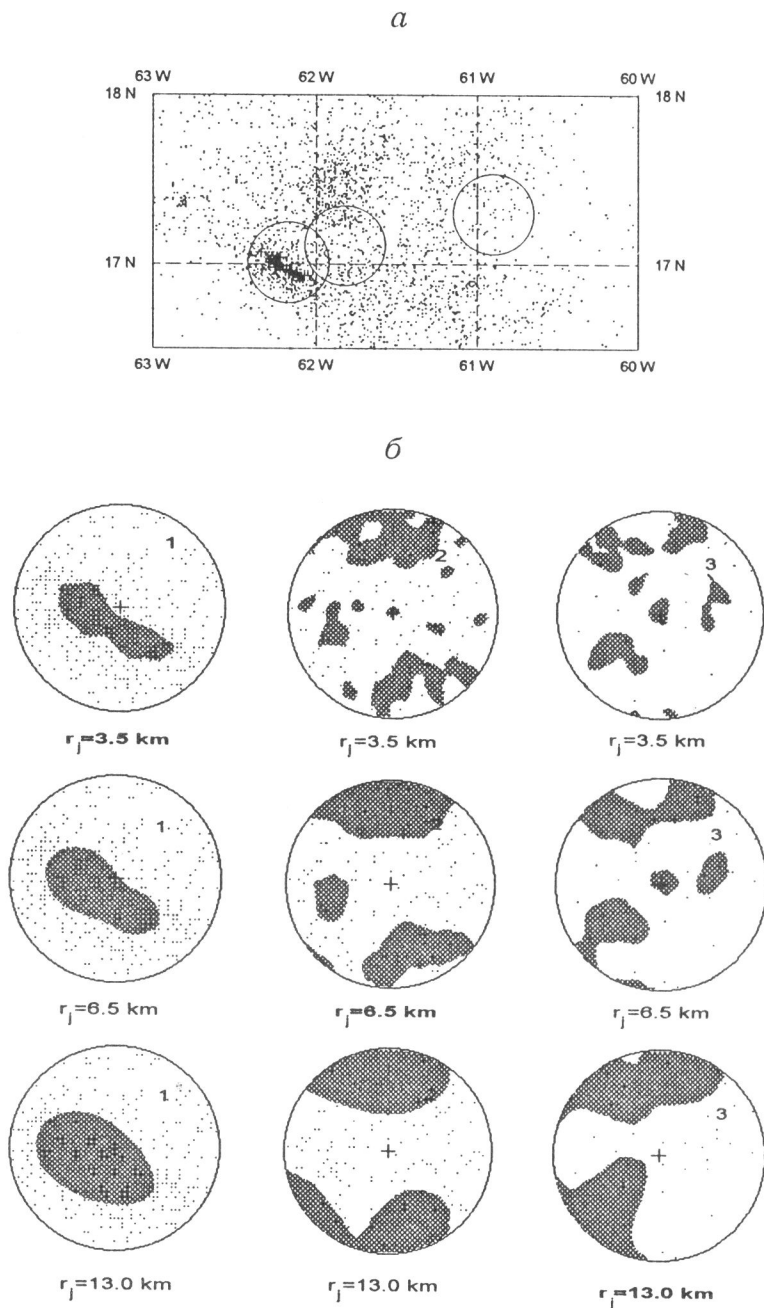
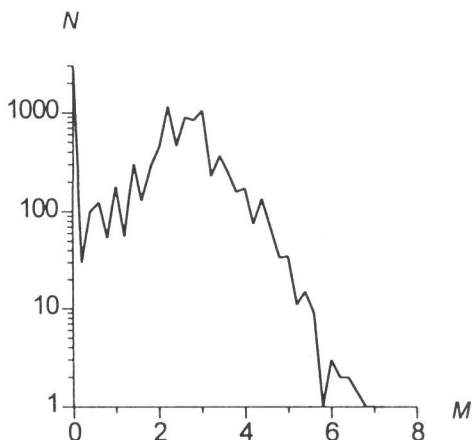


Рис. 3. К правилу сглаживания плотности эпицентров

a – эпицентры фоновых землетрясений и круги 1,2,3 радиусом 25 км – области с различной активностью; *б* – зоны в соответствующих кругах, где $p(\varphi, \lambda) \geq p_{1/2}$ – заштрихованы, r_j – радиус сглаживания. Значения r_j даны жирным шрифтом, если они вычислены по формуле (2) при $N_0 = 20$

Рис. 4. График повторяемости землетрясений результирующего каталога, 1955–1994 гг.



шему правилу: расхождение по времени не должно превышать 2 мин, в случае расхождения менее 2 мин расхождение в координатах эпицентра не должно быть более 2° . Из нескольких записей, относящихся к одному землетрясению, предпочтение отдавалось данным каталога IPGP. Результирующий каталог содержит 12033 события, из них 8098 событий из каталога IPGP с января 1979 г. по август 1995 г.

Каждому событию приписывалась магнитуда, равная максимальному значению из приведенных в использованном каталоге. На рис. 4 показан график повторяемости, построенный по результирующему каталогу для периода 1955–1994 гг., из которого следует, что можно говорить о полноте каталога при $M \geq 2.5$.

Параметры алгоритма. В предложенном алгоритме используются три магнитудных порога: $M_{\min}$, $M_{\text{фон}}$ и M_0 . В работе [5] было показано, что вариации величин $M_{\min}$, $M_{\text{фон}}$ мало влияют на результат. Именно поэтому при расчетах функционала f использовалась максимальная из зарегистрированных магнитуд вне зависимости от их типа.

Однако для оценки качества прогноза, т.е. подсчета числа успехов и ложных тревог, существенна как величина магнитуды, приписанной сильному землетрясению, так и вариация значений M_0 . К сожалению, в рассматриваемом регионе для всех сильных землетрясений невозможно использовать магнитуду какого-либо одного типа. Для большинства сильных землетрясений известна магнитуда, записанная в каталоге IPGP, определенная по коду волны, однако и ее величина не всегда надежна. Это связано с тем, что землетрясения с $M \geq 4.5$ часто сопровождаются мгновенными афтершоками и выделение коды основного толчка затруднено. Таким образом, необходимо использовать некую комбинированную магнитуду ($M_{\text{комб}}$). Опишем формальное правило ее определения.

Рассматриваются следующие типы магнитуды и соответствующие источники данных:

- 1) магнитуда по длительности коды (duration magnitude) из каталога IPGP;
- 2) магнитуда по длительности коды, определенная в Университете Вест-Индии (данные любезно предоставлены доктором L.L. Lynch);

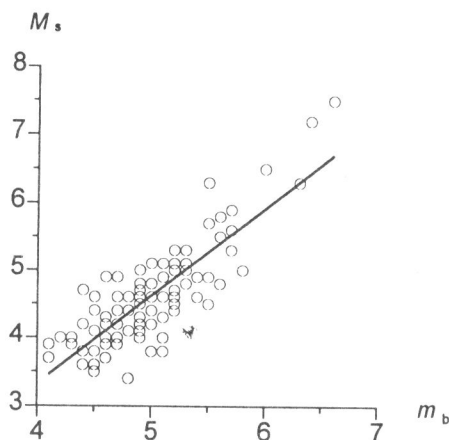


Рис. 5. Соотношение между M_S и m_b в каталоге NEIC для рассматриваемой территории с 1968 по 1994 г., прямая соответствует ортогональной регрессии M_S на m_b

3) магнитуа M_S по поверхностным волнам PDE/NEIC;

4) магнитуа m_b по объемным волнам PDE/NEIC, пересчитанная по формуле ортогональной регрессии $M = 1.34 m_b - 2.13$. Коэффициенты регрессии найдены по данным каталога NEIC для рассматриваемой территории с 1968 по 1994 г. (рис. 5). В качестве значения $M_{комб}$ берется максимум из четырех вышеприведенных магнитуд.

Значения параметров, которые были использованы для получения основного результата, приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Параметры алгоритма и их значения

Параметр	Обозначение	Значение
Порог для магнитуды $M_{комб}$ сильных землетрясений	M_0	5.25
Параметры для определения функционала f		
Минимальная магнитуа текущих событий	M_{min}	0
Минимальная магнитуа фоновых событий	M_b	0
Длительность интервала B_j , годы	T_b	30
Длительность интервала C , дни	T_c	90
Радиус кругов D_j , км	D	25
Радиус кругов R , км	R	75
Параметр сглаживания плотности эпицентров	N_0	20
Параметры для определения ПВОПВ		
Шаг по времени, мес	τ	1
Порог функционала	F	5.5
Длительность тревоги, мес	T	12
Минимальная площадь тревоги, км ²	S_{min}	10000

Алгоритм может быть применен лишь с 1984 г., так как каталог недостаточно полон, чтобы построить распределение фоновой сейсмичности для классификации эпицентров до 1984 г. Значение M_0 для определения сильных землетрясений выбрано из условия, что среднее время повторяемости землетрясений с $M \geq M_0$ равно двум годам, это соответствует $M_0 = 5.25$.

По сравнению с предыдущей версией алгоритма число параметров сокращено на три. Смысл параметра R расширен, так как этот параметр используется теперь не только при вычислении функционала f , но и для построения ПВОПВ. По сравнению с [5] изменено только значение параметра $S_{\min}$ – оно увеличено вдвое. Значения остальных параметров остались без изменения.

Результаты основного теста. В течение рассматриваемого периода с января 1984 по август 1995 г. на Малых Антильских о-вах произошло 9 сильных землетрясений (табл. 2), 8 из которых произошли в ПВОПВ, диагностированных алгоритмом. Всего было диагностировано 11 ПВОПВ (рис. 6), из них две ложные тревоги и одна текущая. Относительный объем ПВОПВ составил 7.9% от всего рассматриваемого пространственно-временного объема.

ТАБЛИЦА 2. Сильные землетрясения Малых Антильских о-вов, 1984–1995 гг.

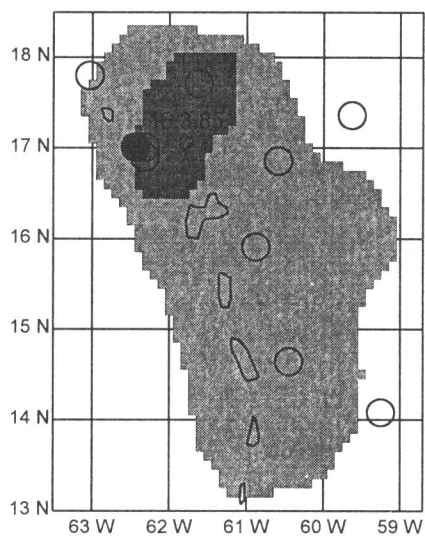
Дата	Координаты		Глубина, км	$M_{\text{комб}}$	m_b	M_S	M_D (IPGP)	M_D (TRN)
	$\varphi^0 N$	$\lambda^0 W$						
16.03.1985 ⁺)	17.01	62.44	13	6.31	6.3	6.3	6.2	—
12.02.1986 ⁺)	17.01	62.32	22	5.40	5.2	5.3	5.4	5.1
21.02.1990 ⁺)	16.90	62.32	109	5.78	5.9	—	4.9	5.1
12.07.1990 ⁺)	14.64	60.45	28	5.70	5.5	5.7	5.1	5.7
18.11.1990 ⁺)	17.80	63.03	92	5.30	5.5	—	5.3	5.3
19.04.1991 ⁻⁾	16.86	60.59	16	5.30	5.5	4.9	4.3	5.3
30.12.1991 ⁺)	17.71	61.62	47	5.30	5.1	4.9	5.1	5.3
03.08.1992 ⁺)	15.91	60.88	43	5.37	5.6	4.8	4.5	—
08.03.1995 ⁺)	16.60	59.47	33	6.31	6.3	6.2	6.2	6.1

⁺) Землетрясения, которые попадают в ПВОПВ. ⁻⁾ Пропуск цели. M_D – магнитуда, вычисленная по длительности коды; аббревиатура TRN использована для Университета Вест-Индии.

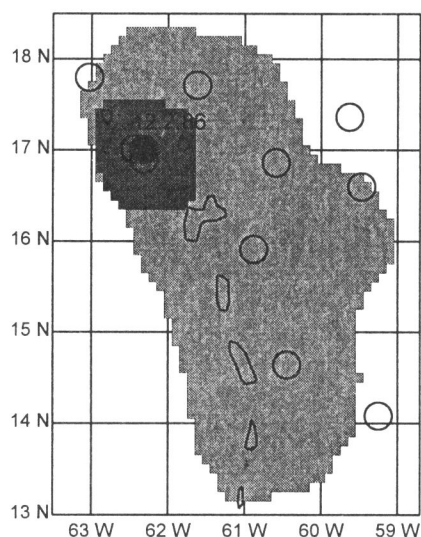
Отметим, что магнитуда единственного пропущенного землетрясения определена в локальном каталоге IPGP как 4.3, что значительно ниже порога M_0 .

Тест со случайным каталогом. В работе [5] была исследована зависимость результатов от варьируемых значений параметров алгоритма. Поскольку при тестировании нового варианта алгоритма в настоящей работе изменено значение только одного параметра ($S_{\min}$), здесь такое исследование не проводилось. Вместе с тем повторен тест со случайным каталогом.

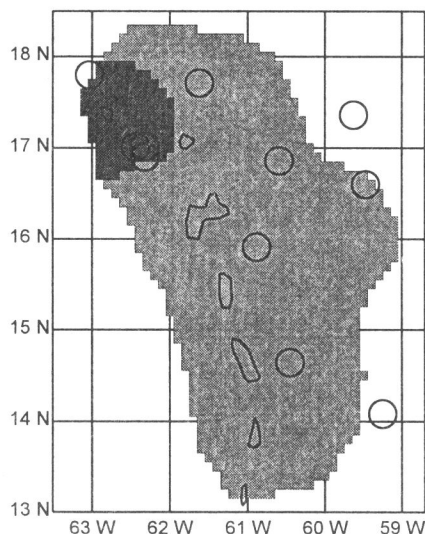
Напомним, что случайный каталог генерируется из реального следующим образом: число событий в каталоге и моменты их возникновения оставляются без изменения, а координаты эпицентров случайным образом перемешиваются для интервала времени 1984–1995 гг. Перемешивание осуществляется с помощью датчика



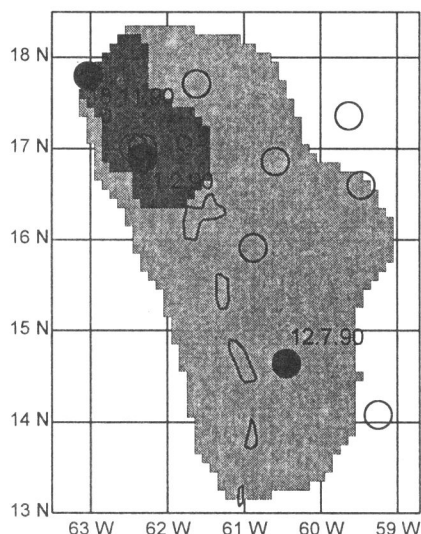
1.2.1985



1.5.1985



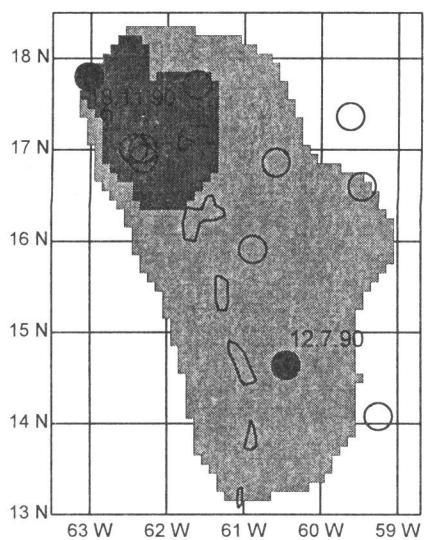
1.12.1988



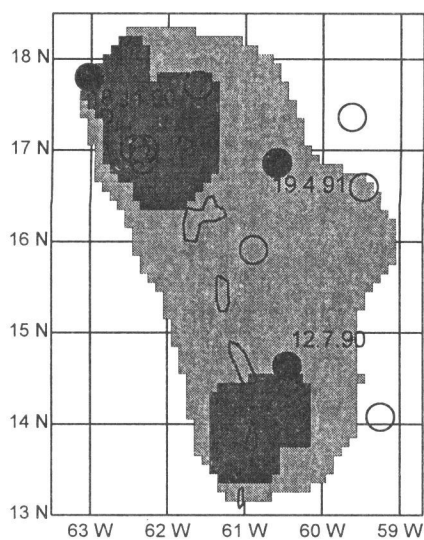
1.2.1990

Рис. 6. Пространственно-временные области повышенной вероятности сильных землетрясений на Малой Антильской дуге, январь 1984 г. – август 1995 г.

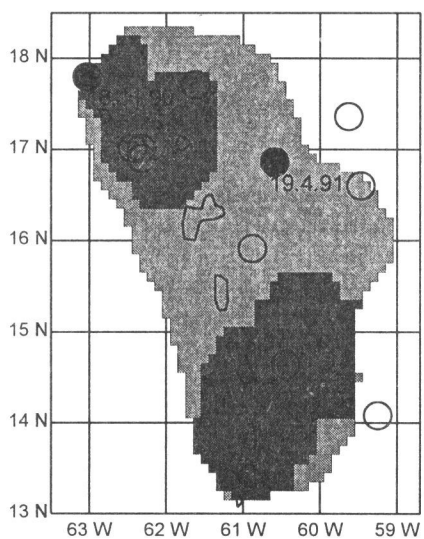
Светло-серым тоном показана формально определенная рассматриваемая территория, темным – пространственные области ПВОПВ; кружки – эпицентры землетрясений с $M_{комб} \geq 5.25$, темные – если землетрясение происходит в течение года с момента объявления данной тревоги



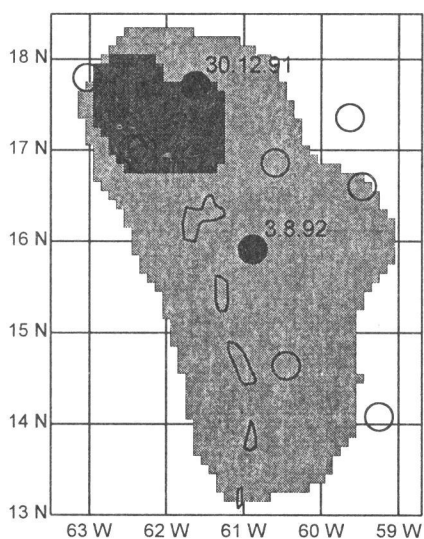
1.4.1990



1.7.1990

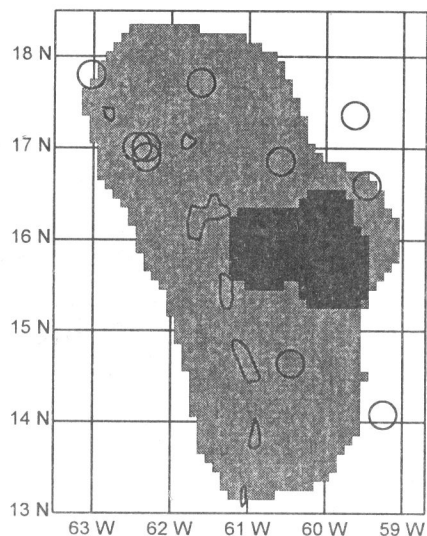


1.9.1990

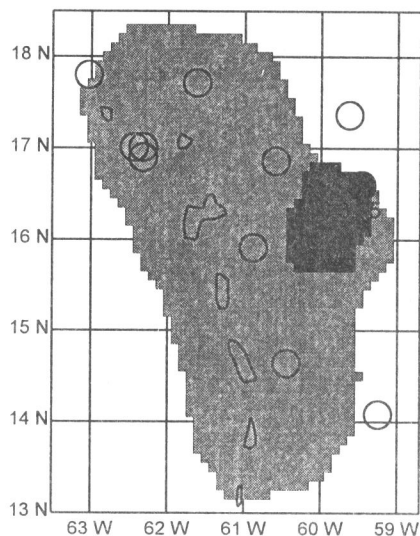


1.10.1990

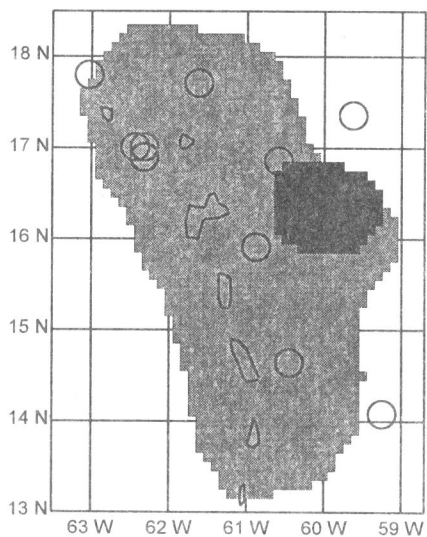
Рис. 6. (продолжение)



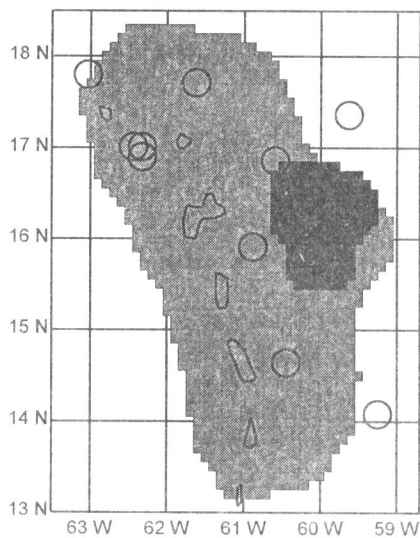
1.4.1992



1.10.1994



1.5.1995



1.8.1995

Рис. 6. (окончание)

псевдослучайных чисел (стандартная функция языка C). Для этого каждому эпицентру в указанном интервале времени приписывается случайный номер и затем пары координат эпицентра (широта и долгота) переставляются в порядке возрастания приписанных им номеров. Таким образом, пространственное распределение эпицентров за весь рассматриваемый период в случайном и реальном каталогах совпадает.

Как и в предыдущей работе, было сгенерировано последовательно три варианта каталога (три серии псевдослучайных чисел) и алгоритм применялся к каждому из случайных каталогов. В результате получено 4, 5 и 4 ПВОПВ с относительным объемом 5.7, 6.1 и 5.4% и числом успехов 1, 3 и 2 из 9, соответственно. Заметим, что относительный объем ПВОПВ для случайных каталогов уменьшился незначительно по сравнению с уменьшением числа успехов и увеличением числа пропусков цели. Этот результат является доводом в пользу неслучайности полученных результатов в ретроспективном тесте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая модификация алгоритма прогноза, основанного на обнаруженном ранее эффекте локального перераспределения сейсмичности перед сильными землетрясениями, позволяет сократить число свободных параметров алгоритма.

Применение этого алгоритма практически без изменения значений параметров дает существенно лучший результат ретроспективного прогноза сильных землетрясений в регионе Малой Антильской дуги.

Изменение формального правила определения границ территории позволило включить в рассмотрение дополнительно два сильных землетрясения, в том числе и землетрясение 8 марта 1995 г. Оба землетрясения успешно ретроспективно предсказываются. Предсказывается также и одно из двух сильных землетрясений, пропускавшихся в предыдущей работе.

Наиболее очевидным физическим механизмом этого явления может служить срыв "зацепов" (break-up of asperities) перед сильными землетрясениями [12], широко обсуждаемый в литературе. "Зацепы" (asperities) соответствуют спокойным зонам (где возникают эпицентры типа Н), и их срыв выражается в активизации этих зон.

Такая активизация происходит на фоне более ширококомасштабного затишья, которое выражается в уменьшении числа эпицентров типа А. Явление сейсмического затишья перед отдельными событиями в их эпицентральной зоне неоднократно отмечалось в литературе [13–15], и для него предлагались различные физические механизмы [16, 17]. Затишье, о котором здесь идет речь (уменьшение числа событий типа А), происходит на большей площади, чем очаговая зона. Линейные размеры области затишья составляют около 100 км для землетрясений с M от 5 до 6.5, т.е. по крайней мере на порядок больше линейных размеров очага. Такой масштаб характерен для среднесрочных алгоритмов прогноза, таких как КН, М8, Сценарий Мендосино (см. [1–3]). Нелокальный характер среднесрочных предвестников отмечался и в литературе [18].

Перестройка пространственно-временной структуры процессов, частный случай которой мы рассмотрели в этой работе, является одним из признаков критических состояний во многих хаотических системах.

Благодарности. Эта работа является результатом совместного исследования,

проведенного частично во время пребывания П.Н. Шебалина и И.М. Ротвайна в Парижском институте физики Земли в рамках соглашения института с Российской академией наук. Мы благодарны проф. Ле Муэлю, ответственному за сотрудничество с французской стороны. Авторы благодарны составителям каталога IPGP Ж. Виоде и М. Фейару, а также Дж. Шеферду и Л. Линчу за любезно предоставленные данные. Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 96-05-64800).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Keilis-Borok V.I., Kossobokov V.G.* Premonitory activation of earthquake flow: algorithm M8 // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1990. Vol.61. P.73-83.
2. *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 Planet. Inter.* 1990. Vol.61. P.57-72.
3. *Kossobokov V.G., Keilis-Borok V.I., Smith S.W.* Localization of intermediate-term earthquake prediction // *J.Geophys. Res.* 1990. Vol.95, N B12. P.19763-19772.
4. *Кейлис-Борок В.И., Ротвайн И.М., Шебалин П.Н.* Пространственное перераспределение слабой сейсмичности в области подготовки сильных землетрясений // Математическое моделирование сейсмотектонических процессов в литосфере, ориентированное на проблему прогноза землетрясений. Вып.1. Гос. науч.-тех. программа "Глобальные изменения природной среды и климата". М., 1993. С.46-52.
5. *Shebalin P.N., Girardin N., Rotwain I.M., Keilis-Borok V.I., Dubois J.* Local overturn of active and non-active seismic zones as a precursor of large earthquakes in Lesser Antillean Arc // *PEPI.* 1996. Vol.97. P.163-175.
6. *Habermann R.E.* Consistency of teleseismic reporting since 1963 // *Bull. Seism. Soc. Amer.* 1982. Vol.72. P.93-111.
7. *Habermann R.E.* Seismicity rate variations and systematic changes in magnitudes in teleseismic catalogues // *Tectonophysics.* 1991. N 193. P.277-289.
8. *Perez O.J., Scholz C.H.* Heterogeneity of the instrumental seismicity catalog (1904-1980) for strong shallow earthquakes // *Bull. Seism. Soc. Amer.* 1984. Vol.74. P.669-686.
9. *Bulletins sismiques des observatoires des Antilles, 1979-1994.* Departement des observatoires volcanologiques, Institut de Physique du Globe de Paris.
10. *Shepherd J.B., Linch L.L., Tanner J.G.* A revised earthquake catalogue for the Eastern Caribbean region // *Proceedings of the Caribbean conference on natural hazards.* 1993. Trinidad and Tobago. 1994.
11. *PDE Monthly Listings, 1968-1995.* NEIC/USGS.
12. *Kanamori H.* The nature of seismicity patterns before large earthquakes // *Earth. Prediction.* Wash.: AGU, 1981. P.1-19.
13. *Mogi K.* Earthquake prediction. Tokyo: Academic Press, 1985. 283p.
14. *Wiemer S., Wyss M.* Seismic quiescence before the Landers (M=7.5) and Big Bear (M=6.5) 1992 earthquakes // *Bull. Seism. Soc. Amer.* 1994. Vol.84. P.900-916.
15. *Wyss M., Habermann R.E.* Precursory seismic quiescence // *PAGEOPH.* 1988. Vol.126. P.319-332.
16. *Sholz C.H.* Mechanism of seismic quiescence // *PAGEOPH.* 1988. Vol.126. P.701-718.
17. *Stuart W.D.* Diffusionless dilatancy model for earthquake precursors // *Geophys. Res. Lett.* 1994. Vol.1. P.261-263.
18. *Press F., Allen C.* Patterns of seismic release in the Southern California region // *J.Geophys. Res.* 1995. Vol.100, N B4. P.6421-6430.