

УДК 550.341

ПАРАМЕТРЫ КОНЦЕНТРАЦИИ ОЧАГОВ В АЛГОРИТМЕ СРЕДНЕСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Л.Л. Ромашкова, В.Г. Кособоков

*Международный институт теории прогноза землетрясений
и математической геофизики Российской академии наук*

Наблюдаемые среднесрочные вариации последовательности землетрясений говорят в пользу существования предвестниковой активизации. Этот феномен положен в основу алгоритма прогноза сильных землетрясений, известного как М8. Эффективность данного подхода подтверждается в ходе многолетнего его применения. Однако алгоритм М8 не является оптимальным, а выбор его параметров единственно возможным. В предлагаемой работе произведена модификация одного из функционалов алгоритма – обратно пропорционального критерию образования магистрального разрыва (критерию Журкова). Этот функционал рассчитывается в существующей версии в соответствии с некоторыми предположениями. В статье приводятся и анализируются результаты испытания модифицированного алгоритма прогноза сильнейших землетрясений Тихоокеанского пояса сейсмичности.

SOURCE CONCENTRATION PARAMETERS IN AN INTERMEDIATE-TERM EARTHQUAKE PREDICTION ALGORITHM

L. L. Romashkova and V. G. Kossobokov

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

Intermediate-term observations of variations in sequences of earthquakes argue in favor of precursory activation of seismicity. This phenomenon forms a basis of an earthquake prediction algorithm known as M8. The efficiency of this approach is confirmed in course of substantial application. However, the M8 algorithm is neither optimal nor its parameters are the only possible. Here we modify one of the measures, i.e. a parameter inversely proportional to the major rupture occurrence criterion (the so called Zhurkov's criterion), calculated by the original version of M8 in a certain assumption. The paper presents the results of analysis and testing of the algorithm in the Circum Pacific seismic belt.

ВВЕДЕНИЕ

Алгоритм М8 был разработан для диагностики по комплексу сейсмологических предвестников периодов повышенной вероятности (ППВ) сильнейших землетрясений мира с магнитудой $M \geq 8$ [1, 2] и впоследствии адаптирован для прогноза землетрясений меньшей магнитуды [3-6]. В основе алгоритма лежит явление аномальной активизации сейсмического потока, предшествующее сильному землетрясению. По каталогу основных толчков определяются функции, характеризующие сейсмическую активность, изменение долговременного тренда сейсмической активности, концентрацию очагов и группирование землетрясений. ППВ объявляется в момент, когда большинство функций принимают свои аномально большие значения в пределах 3-летнего скользящего интервала времени. Наблюдение ведется в пространственных кругах, диаметр которых определяется по магнитуде прогнозируемых землетрясений.

Функционал пространственной линейной концентрации очагов в алгоритме М8 определяется как отношение среднего линейного размера очага l_{cp} к среднему расстоянию между очагами L_{cp} :

$$Z = l_{cp}/L_{cp}.$$

Использование этого функционала мотивируется работами по физике прочности и пластичности [7, 8], в которых установлено, что образование магистрального разрыва происходит тогда, когда отношение среднего расстояния между микротрещинами к их среднему размеру меньше некоторого критического значения. Это условие получило название критерий Журкова. Для прогноза землетрясений оно использовалось в разных формулировках в работах [1-3, 9-11].

При равномерном распределении очагов землетрясений в некотором фиксированном объеме среднее расстояние между очагами пропорционально $N^{-1/3}$ (где N – число очагов), а линейный размер очага пропорционален величине $10^{\beta M(i)}$ (где $\beta \approx 1/2$). Эти предположения используются в алгоритме М8 при вычислении функции Z_k по формуле

$$Z_k = \Sigma_{(k)} 10^{\beta M(i)} / (N_k)^{2/3},$$

где $\beta = 0.46$, а суммирование ведется по основным толчкам с $M_k \leq M(i) \leq M_0 - 0.5$, $k = 1, 2$.

Однако хорошо известно, что гипоцентры землетрясений распределены в пространстве далеко не равномерно. Сейсмичность сконцентрирована в основном вдоль границ тектонических плит. Если рассматривать сейсмичность в более крупном масштабе, она также не равномерна, а сосредоточена на активных разломах. На участках разломов, в свою очередь, тоже выделяются зоны сгущения и разрежения сейсмичности. Поэтому оценка среднего расстояния между гипоцентрами в предположении об их равномерном распределении, вообще говоря, не соответствует неоднородности сейсмичности. В этой работе вместо оценочного L_{cp} вычисляется по координатам и глубинам основных толчков среднее расстояние между гипоцентрами $L_{cp} = 2\Sigma \rho_{ij} / (N(N-1))$ и затем полученные значения используются при подсчете функционалов концентрации очагов в алгоритме М8.

ДАННЫЕ

Рассмотрен Тихоокеанский пояс сейсмичности, представленный каталогом [11] и его пополнением до 1 января 1994 г. Предварительная обработка каталога для определения дублирований землетрясений и афтершоков основных толчков выполнена с помощью алгоритмов, подробно описанных в [6]. Набор кругов, на территории которых проводился анализ, тот же, что и в тесте алгоритма М8 [6]. Изначально рассматривалось 189 кругов, равномерно и довольно редко расположенных по оси пояса сейсмичности (300–400 км между соседними центрами) и покрывающих весь Тихоокеанский сейсмический пояс. Однако в 42 кругах радиусом 427 км повторяемость основных толчков с $M \geq 4.0$ оказалась недостаточной для прогноза землетрясений с магнитудой от 7.5 и выше. Поэтому эти круги исключены из рассмотрения. Для прогноза землетрясений с магнитудой от 8.0 и выше использовались круги радиусом 668 км с теми же центрами. В этом случае статистики основных толчков с $M \geq 4.0$ оказалось достаточно для применения алгоритма М8 в 170 кругах.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОГНОЗА ПО РАЗНЫМ ВЕРСИЯМ АЛГОРИТМА М8

Было рассмотрено три версии алгоритма М8: стандартная [6] и две версии с модифицированными функционалами концентрации очагов. Во второй версии, М8а, все параметры алгоритма М8, включая константы голосования, кроме функционалов концентрации очагов, стандартные. В третьей версии, М8z, константы голосования изменены.

Сравнение версий алгоритма производится по результатам прогноза сильнейших землетрясений Тихоокеанского пояса. При этом анализируется не только общее соотношение числа "предсказанных" землетрясений и пространственно-временной объем ППВ, но и конкретное распределение ППВ по регионам. Для упрощения расчетов, как и в [6], единица пространственно-временного объема определяется как один круг исследования в течение полугода. Такой подсчет соответствует простейшей гипотезе о независимости диагностики в рассматриваемых кругах. Гипотезу можно принять в качестве первого приближения, поскольку пересечение даже соседних кругов составляет менее половины от их объединения.

Результаты применения стандартного алгоритма М8 и версии М8а для прогноза землетрясений с $M \geq 7.5$ представлены в табл.1 и 2. Из 16 произошедших землетрясений стандартный алгоритм М8 предсказывает 11, а алгоритм М8а – 7 землетрясений (см. табл. 1).

Пространственно-временной объем ППВ в стандартном алгоритме М8 составляет 19, а для М8а – 10% по отношению к общему пространственно-временному объему исследования (см. табл.2). ППВ версии М8а, как правило (в 89% случаев), приходится на ППВ алгоритма М8 и выделяют из них менее половины. В целом симметрическая разность результатов прогноза по М8 и М8а, т.е. расхождение классификации, составляет менее 11% от общего пространственно-временного объема, причем 9.8% из них приходится на ППВ М8 и 1.2% на ППВ М8а.

Во многих регионах, таких как Яванский желоб, Южные Сандвичевы о-ва, Филиппины, Новая Гвинея, Тайвань-Япония, Тонга-Кермадек, Курилы-Камчатка,

ТАБЛИЦА 1. Сильные землетрясения с $M \geq 7.5$, случившиеся на территории 147 кругов тестирования с 1 января 1985 г. по 1 января 1994 г.

Дата	Широта, град	Долгота, град	Магнитуда	Глубина, км	Предсказано	
					M8	M8a
03.03.1985	33.13 S	71.87 W	7.8	33	Да	Нет*
28.11.1985	13.98 S	166.18 E	7.6	33	Да	Да
07.05.1986	51.52 N	174.78 W	7.9	33	Нет	Нет
20.10.1986	28.12 S	176.37 W	8.3	29	Да	Да
08.02.1987	6.09 S	147.69 E	7.6	54	Да	Да
16.10.1987	6.26 S	149.06 E	7.7	47	Да	Да
30.11.1987	58.67 N	142.78 W	7.7	10	Да	Нет*
05.04.1990	15.12 N	147.59 E	7.5	11	Да	Да
16.07.1990	15.68 N	121.17 E	7.8	25	Нет	Нет
22.04.1991	9.68 N	83.07 W	7.6	10	Да	Нет
17.05.1992	7.17 N	126.86 E	7.5	33	Да	Да
28.06.1992	34.18 N	116.51 W	7.6	1	Нет	Да
12.12.1992	8.48 S	121.90 E	7.5	27	Нет	Нет
15.01.1993	43.30 N	143.69 E	7.6	102	Да	Нет
12.07.1993	42.85 N	139.20 E	7.7	16	Нет	Нет
08.08.1993	12.96 N	144.78 E	8.2	60	Да	Нет

* Землетрясения, которые предсказываются при пониженном пороге голосования (версия M8z).

ТАБЛИЦА 2. ППВ землетрясений с $M \geq 7.5$ на территории 170 кругов тестирования с 1 января 1985 г. по 1 января 1994 г.

Регион	Число сильных событий	Внутри ППВ		Объем ППВ, %	
		M8	M8a	M8	M8a
Тонга-Кермадек	1	1	1	43	28
Новая Гвинея	3	3	3	17	10
Яванский желоб	1	-	-	4	0
Филиппины	1	1	1	6	2
Тайвань-Япония	1	-	-	27	16
Япония-Бонины	2	1	-	7	5
Марианский желоб	2	2	1	32	14
Курилы-Камчатка	-	-	-	24	21
Алеуты-Аляска	2	1	-	27	4
Запад Северной Америки	1	-	1	34	29
Центральная Америка	1	1	-	15	12
Южная Америка	1	1	-	15	4
Южные Сандвичевы о-ва	-	-	-	17	0
Все регионы	16	11	7	19	10

нам удалось не потерять ни одного события по сравнению со стандартным алгоритмом М8 и при этом значительно сократить пространственно-временной объем ППВ. На Западе Северной Америки алгоритм М8а предсказывает землетрясение в Калифорнии 28 июня 1992 года (Ландерс), которое пропускается в тесте [6] стандартной версией М8, и при этом сокращает объем ППВ на 15%. (Разделение на регионы и их названия здесь условные, те же, которые использованы в тесте алгоритма М8 [6].)

При детальном рассмотрении пространственного расположения областей тревог видно, что в некоторых регионах (например, Тайвань–Япония, Тонга–Кермадек) картина практически не изменилась. В других районах, таких как Яванский желоб, Алеуты–Аляска, Центральная Америка, Новая Гвинея, Южные Сандвичевы острова, Марианский желоб, наблюдается качественное сокращение площади, находящейся в состоянии текущей тревоги.

Однако в целом сокращение пространственно-временного объема ППВ в 2 раза достигается ценой увеличения числа пропущенных событий в 1.5 раза (см. табл. 2). Попробуем проанализировать причины этих пропусков. Оказывается, что в двух из пяти дополнительных (по отношению к стандартному алгоритму М8) случаев пропуска цели наблюдается характерное возрастание сейсмической активности перед сильным землетрясением. И эти события можно предсказать, минимально ослабив правило объявления тревоги. Напомним, что в алгоритме М8 для объявления ППВ необходимо, чтобы для двух последовательных моментов времени с интервалом в полгода повторилась ситуация, когда в течение предыдущих трех лет по крайней мере шесть из семи функционалов, обязательно включая взрыв афтершоков, имеют экстремально большие значения. В ослабленном правиле предлагается понизить порог до 5 для одного из двух моментов времени, сохранив порог 6 для другого. Такое ослабление порогов голосования может быть отчасти обосновано тем, что модифицированные функционалы концентрации меньше, чем стандартные, коррелируются как с другими функционалами алгоритма М8, так и между собой. Модификацию алгоритма М8а с ослабленным правилом объявления ППВ мы назвали М8z.

Из табл. 1 и 2 можно заключить, что М8z предсказывает 9 из 16 событий, увеличивая пространственно-временной объем ППВ до 12.5% от общего пространственно-временного объема. При этом расхождение классификаций по М8 и М8z практически не изменилось (составляет 10.7% от общего пространственно-временного объема вместо 11% для М8 и М8а). На рис. 1 приведены территории ППВ, определенные алгоритмами М8 и М8z при прогнозе землетрясений с магнитудой от 7.5 и выше.

Отметим, что пропущенное событие 15.01.1993 г. в регионе Япония–Бонины (см. табл. 1) имеет глубину 102 км, т.е. не является поверхностным. Возможно, что способ вычисления критерия Журкова, предложенный в данной работе, подходит для коровых землетрясений и неприменим для мантийных.

ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ДВУХ ДИАПАЗОНАХ МАГНИТУД

Еще одно пропущенное алгоритмом М8а (по сравнению со стандартной версией М8) землетрясение 08.08.1993 г. на о-ве Гуам в Марианском желобе имеет магнитуду 8.2. Очевидно, что предложенный здесь способ подсчета функционалов

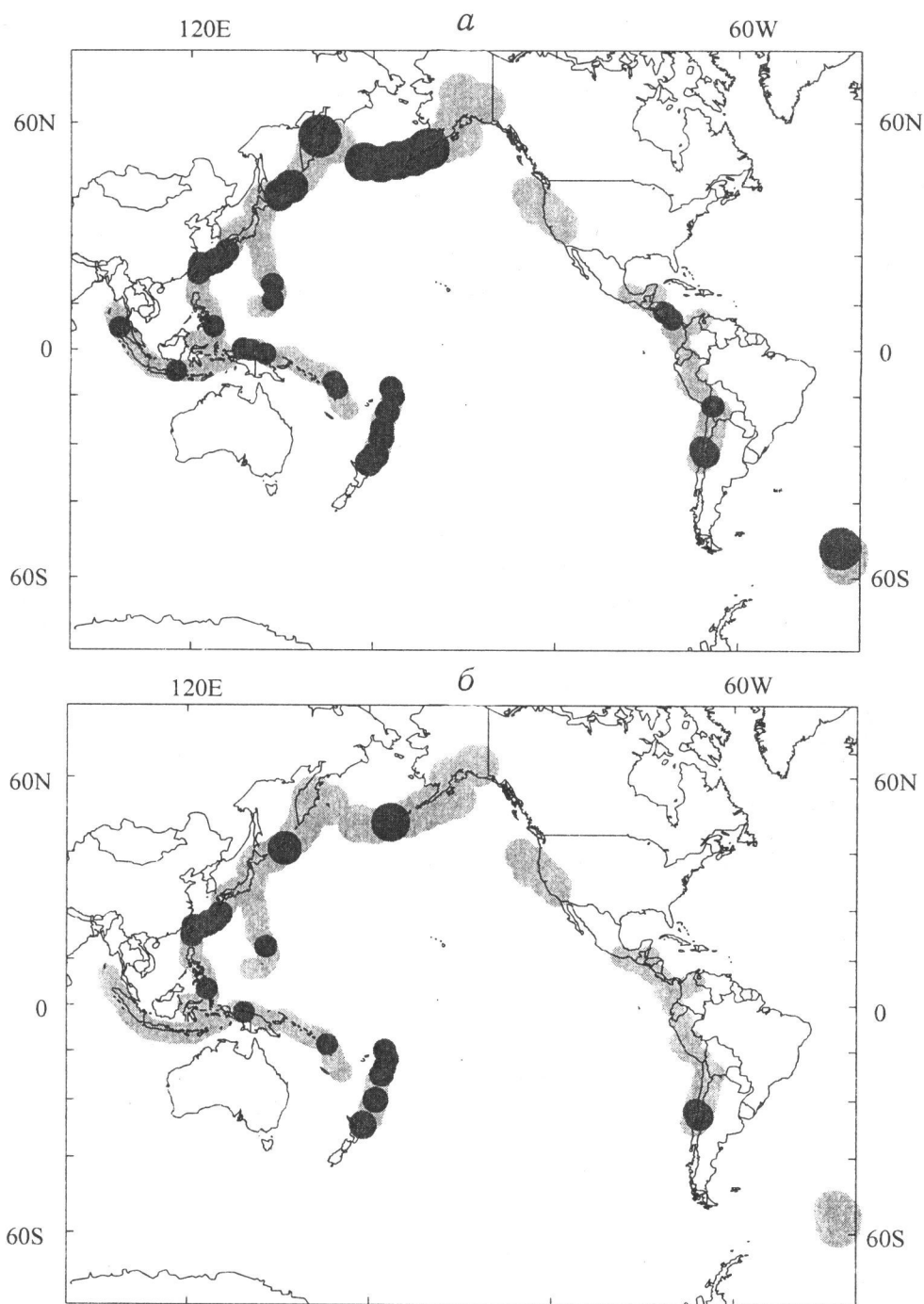


Рис. 1. Области повышенной вероятности землетрясений с $M \geq 7.5$ в I половине 1994 г., определенные в ходе текущей проверки алгоритма M8 (a) [6] и по алгоритму M8z (б)
Заштрихованы все 147 кругов тестирования; темной штриховкой показаны круги, находившиеся в состоянии тревоги с 1 января по 1 июля 1994 г.

концентрации очагов более адекватно отражает пространственную кластеризацию событий и, следовательно, более критичен к размерам области подготовки будущего события, чем старый способ, опиравшийся на предположение о равномерном распределении очагов землетрясений. В масштабе среднесрочного прогноза линейный размер области подготовки землетрясения с магнитудой 8 может в 1.5–2 раза превышать линейный размер области подготовки землетрясения с магнитудой 7.5. Поэтому мы рассмотрели вариант, в котором алгоритмы М8 и М8z применялись для предсказания событий в двух диапазонах магнитуд – от 7.5 до 8.0 и от 8.0 до 8.5. Диагностика ППВ для первого диапазона совпадает с рассмотренной в предыдущем пункте диагностикой для интервала магнитуд от 7.5 и выше (пример такой диагностики приведен на рис. 1).

В табл. 3–6 приведены результаты прогноза отдельно по двум диапазонам магнитуд. Алгоритмы М8 и М8z предсказывают 11 из 17 землетрясений, магнитуда которых превосходит 7.5. По сравнению со стандартной версией М8, М8z предсказывает на одно событие меньше в диапазоне магнитуд от 7.5 до 8.0 и на одно событие больше в диапазоне от 8.0 и выше (землетрясение на о-ве Гуам). В этих двух диапазонах М8z сокращает пространственно-временной объем ППВ на 33 и 16%, соответственно. Процент ППВ для разных диапазонов магнитуд отличается в 2–2.5 раза, что неплохо согласуется с повторяемостью землетрясений этих диапазонов. По совокупности двух диапазонов ППВ, диагностированные алгоритмами М8 и М8z, составляют 12.4 и 9.0% от общего пространственно-временного объема, соответственно. Пример диагностики ППВ по состоянию на 1 января 1994 г., определенной алгоритмами М8 и М8z при прогнозе землетрясений с магнитудой от 8.0 и выше, приведен на рис. 2.

Во время подготовки данной статьи на юге Курильских островов произошло еще одно сильное землетрясение. Его координаты 43.67°N, 147.36°E, магнитуда 8.2 и глубина 45 км. Так же, как и в случае с землетрясением на о-ве Гуам, это событие предсказывается обеими версиями алгоритма при прогнозе землетрясений с магнитудой от 8.0 и выше и лишь стандартной версией алгоритма М8 при прогнозе землетрясений в диапазоне магнитуд от 7.5 и выше. Отметим, что области ППВ, приведенные на рис. 1 и 2, содержат очаг этого землетрясения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Механическая подстановка модифицированного функционала концентрации очагов в тест алгоритма М8 для $M \geq 7.5$ по Тихоокеанскому поясу сейсмичности не дает положительных результатов. Если стандартный алгоритм М8 предсказывает 69% землетрясений в 19% пространства-времени, то новая версия – М8а предсказывает только 44% землетрясений, хотя и в 10% пространства-времени. Статистика значительно улучшается в модификации М8z, когда мы ослабляем правило объявления тревоги, а также рассматриваем отдельно два диапазона магнитуд [7.5,8.0) и [8.0,8.5). Алгоритм М8z позволяет существенно (почти в 1.5 раза) сократить пространственно-временной объем тревоги, предсказывая событий столько же, сколько и стандартная версия алгоритма М8. При этом М8z, возможно, более точно оценивает силу готовящегося события.

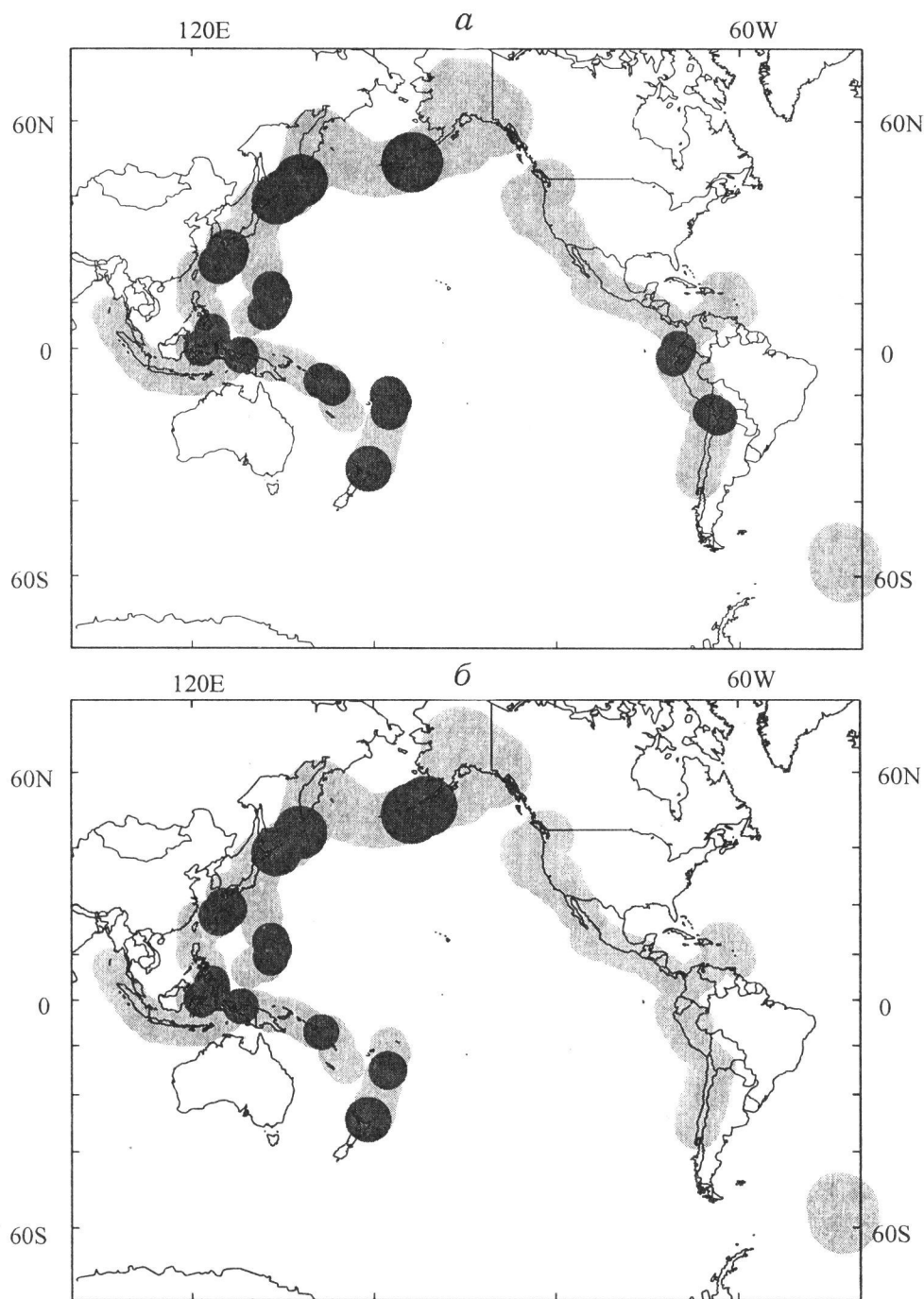


Рис. 2. Области повышенной вероятности землетрясений с $M \geq 8$ в I половине 1994 г., определенные по алгоритму M8 (a) [6] и по алгоритму M8z (б)

Заштрихованы все 170 кругов тестирования; темной штриховкой показаны круги, находившиеся в состоянии тревоги с 1 января по 1 июля 1994 г.

ТАБЛИЦА 3. Сильные землетрясения с $7.5 \leq M < 8.0$, случившиеся на территории 147 кругов тестирования с 1 января 1985 г. по 1 января 1994 г.

Дата	Широта, град	Долгота, град	Магнитуда	Предсказано	
				M8	M8z
03.03.1985	33.13 S	71.87 W	7.8	Да	Да
28.11.1985	13.98 S	166.18 E	7.6	Да	Да
07.05.1986	51.52 N	174.78 W	7.9	Нет	Нет
08.02.1987	6.09 S	147.69 E	7.6	Да	Да
16.10.1987	6.26 S	149.06 E	7.7	Да	Да
30.11.1987	58.67 N	142.78 W	7.7	Да	Да
05.04.1990	15.12 N	147.59 E	7.5	Да	Да
16.07.1990	15.68 N	121.17 E	7.8	Нет	Нет
22.04.1991	9.68 N	83.07 W	7.6	Да	Нет
17.05.1992	7.17 N	126.86 E	7.5	Да	Да
28.06.1992	34.18 N	116.51 W	7.6	Нет	Да
12.12.1992	8.48 S	121.90 E	7.5	Нет	Нет
15.01.1993	43.30 N	143.69 E	7.6	Да	Нет
12.07.1993	42.85 N	139.20 E	7.7	Нет	Нет

ТАБЛИЦА 4. ППВ землетрясений с $7.5 \leq M < 8.0$ на территории 147 кругов тестирования с 1 января 1985 г. по 1 января 1994 г.

Регион	Число сильных событий	Внутри ППВ		Объем ППВ, %	
		M8	M8z	M8	M8z
Тонга-Кермадек	-	-	-	43	37
Новая Гвинея	3	3	3	17	12
Яванский желоб	1	-	-	4	3
Филиппины	1	1	1	6	3
Тайвань-Япония	1	-	-	27	17
Япония-Бонины	2	1	-	7	5
Марианский желоб	1	1	1	32	14
Курилы-Камчатка	-	-	-	24	22
Алеуты-Аляска	2	1	1	27	15
Запад Северной Америки	1	-	1	34	29
Центральная Америка	1	1	-	15	12
Южная Америка	1	1	1	15	4
Южные Сандвичевы о-ва	-	-	-	17	0
Все регионы	14	9	8	19	13

Таким образом показано, что алгоритм M8 допускает модификации, основанные на более адекватном представлении о линейной концентрации очагов землетрясений в период подготовки сильного события. Однако не стоит забывать, что такое значительное сокращение объема ППВ в M8z достигнуто не только за счет нового

ТАБЛИЦА 5. Сильные землетрясения с $M \geq 8.0$, случившиеся на территории 170 кругов тестирования с 1 января 1985 г. по 1 января 1994 г.

Дата	Широта, град	Долгота, град	Магнитуда	Предсказано	
				M8	M8z
19.09.1985	18.19 N	102.53 E	8.1	Да	Да
20.10.1986	28.43 S	165.92 W	8.3	Нет	Да
08.08.1993	12.96 N	144.78 E	8.2	Да	Да

ТАБЛИЦА 6. ППВ землетрясений с $M \geq 8.0$ на территории 170 кругов тестирования с 1 января 1985 г. по 1 января 1994 г.

Регион	Число сильных событий	Внутри ППВ		Объем ППВ, %	
		M8	M8z	M8	M8z
Тонга-Кермадек	1	-	1	19	17
Новая Гвинея	-	-	-	9	10
Яванский желоб	-	-	-	0	3
Филиппины	-	-	-	11	10
Тайвань-Япония	-	-	-	10	2
Япония-Бонины	-	-	-	8	9
Марианский желоб	1	1	1	20	14
Курилы-Камчатка	-	-	-	1	1
Алеуты-Аляска	-	-	-	4	8
Запад Северной Америки	-	-	-	2	0
Центральная Америка	1	1	1	0	0
Южная Америка	-	-	-	4	0
Южные Сандвичевы о-ва	-	-	-	0	0
Все регионы	3	2	3	7	6

способа подсчета функционала концентрации, но и использования, хотя и не без оснований, двух дополнительных изменений. При этом все остальные параметры алгоритма M8 оставались такими, какими их зафиксировали в 1986 г. [1]. Окончательные выводы о прогностических свойствах модификации алгоритма M8z можно будет сделать только после тестирования ее в реальном времени.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Международного научного фонда (грант MCI000) и ИНТАС (грант INTAS 93-457).

ЛИТЕРАТУРА

1. Долгосрочный прогноз землетрясений: методические рекомендации /Под ред. акад. М.А.Садовского // М.: ИФЗ АН СССР. 1986. 128 с.
2. Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г. Периоды повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира // Математические методы в сейсмологии и геодинамике. М.: Наука, 1986. С.48-58. (Вычисл. сейсмология; Вып.19).

3. Аллен К.А., Кейлис-Борок В.И., Ротвайн И.М., Хаттен К. Комплекс долгосрочных сейсмологических предвестников (Калифорния и другие регионы) // Математические методы в сейсмологии и геодинамике. М.: Наука, 1986. С.23-37. (Вычисл. сейсмология; Вып.19).
4. Гизике А., Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г., Кузнецов И.В. Диагностика периодов повышенной вероятности сильнейших землетрясений Южной Америки по комплексу сейсмологических параметров // Математические методы в сейсмологии и геодинамике. М.: Наука, 1988. С.25-32. (Вычисл. сейсмология; Вып.21).
5. Keilis-Borok V.I., Kossobokov V.G. Premonitory activation of seismic flow: Algorithm M8 // Phys. Earth Planet. Inter. 1990. Vol.61. P.73-83.
6. Healy J.H., Kossobokov V.G., Dewey J.W. A test to evaluate the earthquake prediction algorithm, M8 // USGS Open-File Rep. 1992. N 401. 23p.
7. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности // Вестн. АН СССР. 1968. Вып.3. С.46-52.
8. Физика прочности и пластичности // Под ред. С.Н.Журкова. Л.: Наука, 1986. 152с.
9. Соболев Г.А., Завьялов А.Д. О концентрационном критерии сейсмогенных разрывов // ДАН СССР. 1980. Т.252, N 1. С.69-82.
10. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 320с.
11. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. и др. К вопросу о прогнозировании разрушения горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. N 6. С.118-130.
12. Global Hypocenters Data Base CD-ROM. Denver. Co. 1989. NEIS/USGS.