

УДК 550.341

**СТАБИЛИЗАЦИЯ СРЕДНЕСРОЧНОГО ПРОГНОЗА
СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ ТИХОГО ОКЕАНА**Л.Л. РОМАШКОВА¹, В.Г. КОСОБОКОВ^{1,2}, Т. НАГАО³¹Международный институт теории прогноза землетрясений
и математической геофизики Российской академии наук, Москва;²Парижский институт физики Земли, Париж;³Исследовательский центр по прогнозу землетрясений,
Токайский Университет, Япония

Положительно решается задача стабилизации прогноза сильнейших землетрясений с помощью алгоритма М8С на северо-западе Тихого океана. Основой стабилизации служит применение алгоритма М8 в многократно перекрывающихся областях исследования, расфронтченных по местам наибольшей плотности эпицентров землетрясений малой силы. Пространственно стабилизированный прогноз получен при сохранении или уменьшении общего объема тревоги и гарантирует более высокую, по сравнению со стандартным алгоритмом М8, надежность диагностики периодов повышенной вероятности возникновения сильных землетрясений в процессе мониторинга глобальной сейсмичности.

**STABILIZATION OF THE INTERMEDIATE-TERM
PREDICTION OF THE LARGEST EARTHQUAKES
IN THE NORTH-WEST PACIFIC**L.L. ROMASHKOVA¹, V.G. KOSSOBOKOV^{1,2}, T. NAGAO³¹International Institute of Earthquake Prediction Theory
and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow;²Institute de Physique du Globe de Paris, Paris;³Earthquake Prediction Research Center, Tokai University, Japan

The problem of stabilizing prediction of the strongest earthquakes by the M8С algorithm in the North-West Pacific is solved effectively. The essence of stabilization relates to the multiple application of the algorithm M8 in the large number of circles of investigation concentrated on the local places with high level of the background seismic activity. The spatially stabilized prediction obtained with holding or even reducing the volume of alarm. It guarantees more reliable diagnostics of times of increased probability of large earthquakes during the monitoring of global seismicity in comparison with the standard algorithm M8.

Введение

Глобальный тест алгоритма М8 [1,2] по прогнозу сильнейших землетрясений мира в двух диапазонах магнитуд, определяемых нижними пороговыми значениями прогнозируемого землетрясения $M_0 = 7.5$ и $M_0 = 8.0$, ведется в реальном времени уже более 10 лет [3]. Параметры теста были зафиксированы перед началом эксперимента в 1992 году и с тех пор не менялись с целью обеспечить возможность объективного и независимого тестирования методики на реальных данных.

Напомним, что алгоритм М8 представляет собой полностью воспроизводимую автоматическую процедуру, основанную на количественном анализе временного поведения серии интегральных характеристик сейсмического потока. К внутренним параметрам алгоритма относятся:

- размеры областей – *кругов исследования*;
- функционалы, описывающие поведение сейсмического потока во времени;
- квантили, определяющие аномальность текущего состояния;
- процедура голосования при объявлении тревоги;
- пороги среднегодовой сейсмической активности в *кругах исследования*;
- размеры и шаг временного окна исследования;
- продолжительность тревоги.

Все эти параметры, в том числе и набор функционалов, были выбраны и зафиксированы на этапе разработки методики. Классическая модель распознавания образов [4,5] предполагает анализ характеристик временного потока с целью выявления тех из них, которые свойственны периодам подготовки критического события (период обучения), а затем дальнейшее тестирование полученных предвестников на независимом материале (период тестирования). В случае алгоритма М8 можно сказать, что период обучения был проведен на стадии создания алгоритма на основе экспертного анализа предшествующих сейсмических данных. Эта фаза не повторяется при каждом новом применении алгоритма, предполагая, таким образом, универсальность выбранных симптомов критического состояния литосферы в преддверии сильного землетрясения в различных тектонических регионах мира и в различные периоды времени. Возможность работы в нескольких диапазонах магнитуд и в регионах с разным уровнем сейсмической активности обеспечивается в алгоритме М8 путем автоматической нормализации его внутренних параметров.

Единственным внешним параметром алгоритма, который необходимо зафиксировать перед началом эксперимента, является положение

кругов исследования, диаметр которых пропорционален линейному размеру очага ожидаемого землетрясения. В практике применения алгоритма принято стандартное правило – *круги исследования* должны быть расставлены вдоль оси сейсмического пояса таким образом, чтобы покрывать всю сейсмически активную территорию региона. В глобальном тесте алгоритма М8 центры соседних *кругов исследования* разнесены на расстояния порядка 300 км, что приводит к примерно трехкратному перекрытию сейсмического пояса для прогноза с $M_0 = 7.5$ и пятикратному его перекрытию с $M_0 = 8.0$.

В работах [6, 7] нами была предложена методика, позволяющая минимизировать субъективизм при выборе последовательности *кругов исследования* и изучить устойчивость алгоритма по отношению к их пространственному расположению. Была разработана новая пространственно стабилизированная схема – алгоритм М8S, основой которой служит применение алгоритма М8 в многократно перекрывающихся областях исследования, сосредоточенных по местам наибольшей плотности эпицентров землетрясений малой силы. Тестирование схемы на территориях Италии и Калифорнии продемонстрировало возможность повышения стабильности и надежности прогнозов без каких-либо значительных потерь их эффективности. Основываясь на этих результатах, в январе 2002 года был начат совместный российско-итальянский тест алгоритма М8S по прогнозу землетрясений Италии в реальном времени в трех последовательных непересекающихся диапазонах магнитуд, определяемых нижними пороговыми значениями прогнозируемого землетрясения: $M_0 = 5.5$, $M_0 = 6.0$ и $M_0 = 6.5$ [8].

В данной работе представлены результаты эксперимента по применению алгоритма М8S для прогноза сильнейших землетрясений на северо-западе Тихого океана. Цели эксперимента:

- исследование пространственной устойчивости прогноза, полученного в рамках глобального теста алгоритма М8,
- тестирование методики пространственно стабилизированного прогноза (алгоритма М8S) на примере сильнейших землетрясений мира.

Описание эксперимента

Любой эксперимент по прогнозу землетрясений начинается с анализа частотно-магнитудных и пространственных распределений сейсмических данных, что позволяет определить допустимые временные и пространственные рамки используемого каталога. Однако это, одновременно, является дополнительной степенью свободы эксперимента в силу отсутствия строгих объективных критериев выбора. В нашем слу-

чае этот шаг опущен. Все параметры алгоритма M8, а также каталог землетрясений NEIC [9,10], взяты те же, что установлены в глобальном тесте [1,2].

Алгоритм M8S применяется на территории северо-запада Тихого океана (с границами 1°N – 57°N , 118°E – 166°E), включающей Камчатку, Курилы, Японию, Тайвань, Филиппины и Бонин-Марианскую сейсмическую дугу (рис. 1).

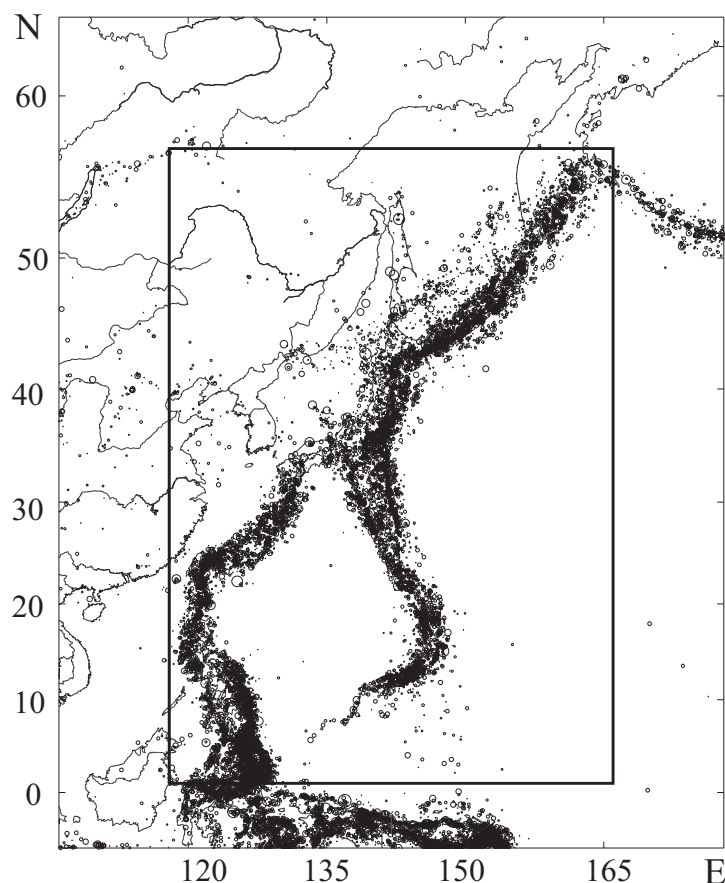


Рис. 1. Регион северо-запада Тихого океана (выделен на карте), в котором применялся алгоритм M8S

Детальное описание алгоритма M8S дано в работах [6,7]. Напомним, что суть его состоит в многократном применении стандартного алгоритма M8 в *кругах исследования*, расставленных в узлах частой пространственной сетки по всей сейсмически активной территории региона. Из набора получившихся тревог оставляются только те, которые

удовлетворяют следующему условию кластеризации: тревога в *круге исследования* подтверждается, если “большинство” рассмотренных *кругов исследования* с центрами в соседних узлах сетки также находятся в состоянии тревоги. Таким образом, тревога в отдельном *круге исследования* изначально рассматривается как случайная, и только достаточно большие кластеры тревог формируют финальную область тревоги.

При этом в алгоритме M8S возникает несколько новых свободных параметров.

1. Пространственный шаг по сетке s . Он равен линейному размеру очага прогнозируемого землетрясения.

2. Радиус малого круга $r = 28$ км и порог интенсивности $a = 0.05$ год⁻¹ основных толчков с магнитудой $M \geq \underline{M} = 4.0$ внутри этого круга (\underline{M} – нижний магнитудный порог каталога). Малый круг используется для поиска сейсмически активных узлов сетки: если число основных толчков в год внутри круга с центром в узле сетки превосходит порог a , то узел считается сейсмически активным и на следующем шаге используется в качестве центра круга исследования алгоритма M8.

3. Параметр n ($n = 75\%$) определяет понятие “большинства”, используемое в процедуре подтверждения тревоги. Для этого рассматриваются все сейсмически активные узлы сетки из квадрата 3×3 с центром в исследуемом узле. Тревога в данном узле подтверждается, если 75% множества *кругов исследования* алгоритма M8 с центрами в соседних узлах находится в состоянии тревоги.

В данном эксперименте все параметры, кроме a , взяты теми же, что зафиксированы в [8]. Порог интенсивности a при переходе из региона Италии с $\underline{M} = 3.0$ в регион северо-запада Тихого океана с $\underline{M} = 4.0$ пересчитан, исходя из закона повторяемости землетрясений с $M \geq \underline{M}$:

$$\log_{10} N(\underline{M}) = A + B \cdot (5 - \underline{M}), \quad (1)$$

где $N(\underline{M})$ – среднегодовое число землетрясений магнитуды $M \geq \underline{M}$ на единицу площади. Коэффициенты A и B зависят от региона и взяты из работы [11]. Подставляя коэффициенты A и B в уравнение (1), получаем, что среднегодовое число землетрясений с $M \geq 3.0$ на территории Италии примерно в шесть раз больше, чем число землетрясений с $M \geq 4.0$ на территории Японии, что дает порог интенсивности $a = 0.05$ год⁻¹. Этот параметр используется нами для всей территории северо-запада Тихого океана.

По сравнению с работой [8] нам потребовалась дополнительная процедура технического характера. Перед началом работы алгоритма координаты всех землетрясений пересчитываются в новую сферическую систему координат с экватором, расположенным вдоль оси сейсмиче-

ского пояса региона. После получения результата все координаты восстанавливаются. Необходимость этого шага обусловлена использованием в алгоритме M8S прямоугольной пространственной сетки. Шаг по сетке пропорционален линейному размеру очага прогнозируемого землетрясения, пересчитанному в градусы широты (по долготе шаг берется с поправкой на среднюю широту региона). При работе в небольших регионах такая сетка может условно рассматриваться как равномерная. В данном эксперименте протяженность региона по широте составляет около 60° , что приводит к значительному (почти в два раза) несоответствию линейного размера шага по долготе на севере и на юге. Использование промежуточной процедуры поворота координат позволяет уменьшить несоответствие до 5%.

Нами ретроспективно моделировался эксперимент по прогнозу вперед, расчеты относились к периодам, оканчивающимся через каждые полгода с января 1985 года по июль 2003 года. Прогноз велся в двух последовательных непересекающихся диапазонах магнитуд для $M_0 = 7.5$ и $M_0 = 8.0$.

Обсуждение результатов

Параметры основных толчков с магнитудой 7.5 и выше, произошедших в регионе за исследуемый период времени, а также результаты их прогноза по алгоритмам M8 и M8S представлены в следующей таблице:

Землетрясения с магнитудой 7.5 и выше
на северо-западе Тихого океана, 1985–2003 гг.

Дата	Регион	Координаты		Глубина, км	Магнитуда	Алгоритмы	
		Широта N, град	Долгота E, град			M8	M8S
08.08.1993	о. Гуам	12.98	144.80	59	8.2	Да	Да
04.10.1994	о. Шикотан	43.77	147.32	14	8.1	Да	Да
25.09.2003	о. Хоккайдо	41.78	143.91	27	8.1	Нет	Нет
05.04.1990	о. Гуам	15.13	147.60	11	7.5	Да	Да
16.07.1990	Филиппины	15.68	121.17	25	7.8	Нет	Нет
07.05.1992	Филиппины	7.19	126.76	33	7.5	Да	Да
15.01.1993	о. Хоккайдо	43.30	143.69	102	7.5	Да	Да
12.07.1993	о. Хоккайдо	42.85	139.20	16	7.6	Нет	Нет
28.12.1994	Сев. Япония	40.53	143.42	26	7.5	Нет	Нет
03.12.1995	о. Итуруп	44.66	149.30	33	7.9	Да	Да
05.12.1997	Камчатка	54.84	162.04	33	7.6	Нет	Нет
20.09.1999	Тайвань	23.77	120.98	33	7.7	Нет	Нет

Видно, что наборы предсказанных и пропущенных землетрясений в этих двух экспериментах полностью совпадают. Два сильнейших события региона: Гуамское землетрясение 8 августа 1993 года с магнитудой

8.2 и землетрясение вблизи о. Шикотан 4 октября 1994 года с магнитудой 8.1 – предсказаны. Предсказано также четыре из девяти событий с магнитудой меньше 8.0. Землетрясение с магнитудой 8.1, произошедшее недавно – 25 сентября 2003 года – у берегов о.Хоккайдо, пропущено двумя алгоритмами. Область тревоги в обоих случаях располагалась на 150–200 км южнее этого землетрясения.

Сравнительные характеристики работы алгоритмов M8 и M8S на северо-западе Тихого океана приведены ниже:

M_0		8.0	7.5
Всего событий		3	9
Предсказано		2	4
Пространственно-временной объем тревоги, %	M8	38	28
	M8S	28	27

В тесте с $M_0 = 8.0$ средний по всему периоду исследования пространственно-временной объем тревоги, полученный по алгоритму M8S, примерно в 1.3 раза меньше, чем по алгоритму M8. В тесте с $M_0=7.5$ пространственно-временные объемы тревоги, полученные по этим двум алгоритмам, приблизительно одинаковы.

Пространственно-временное распределение тревог, полученных по алгоритмам M8 и M8S для $M_0 = 8.0$ в 1985–2003 гг. на двух сегментах сейсмического пояса северо-запада Тихого океана, показано на рис. 2. В качестве пространственной координаты рассматривается расстояние вдоль оси пояса. Из рис. 2 видно, что распределения тревог в двух тестируемых алгоритмах в целом похожи. Уменьшение объема тревоги в алгоритме M8S достигается, главным образом, за счет сокращения длительности тревог при общем сохранении их пространственного расположения. Наиболее значительное сокращение получено для региона Японии и Бонин-Марианской сейсмической зоны. На Курилах, Камчатке, Тайване и Филиппинах объем тревог по двум алгоритмам практически совпадает.

Проиллюстрируем динамику развития тревоги по алгоритму M8S на примере участка Бонин-Марианского желоба, на котором 8 августа 1993 года произошло землетрясение с магнитудой 8.2. На рис. 3 показана диагностика тревог на участке желоба в последовательные полугодные периоды времени, начиная с 01.07.1988 (за 5 лет до сильнейшего события) и по 01.01.1996. Диагностика проведена на момент работы алгоритма M8S, предшествующий процедуре выбора “достаточно больших” кластеров тревог. Можно видеть, что первые 2.5 года в регионе присутствует лишь несколько тревог в отдельных *кругах исследования*. Все они рассматриваются алгоритмом M8S как случайные и исключаются из финальной области тревоги.

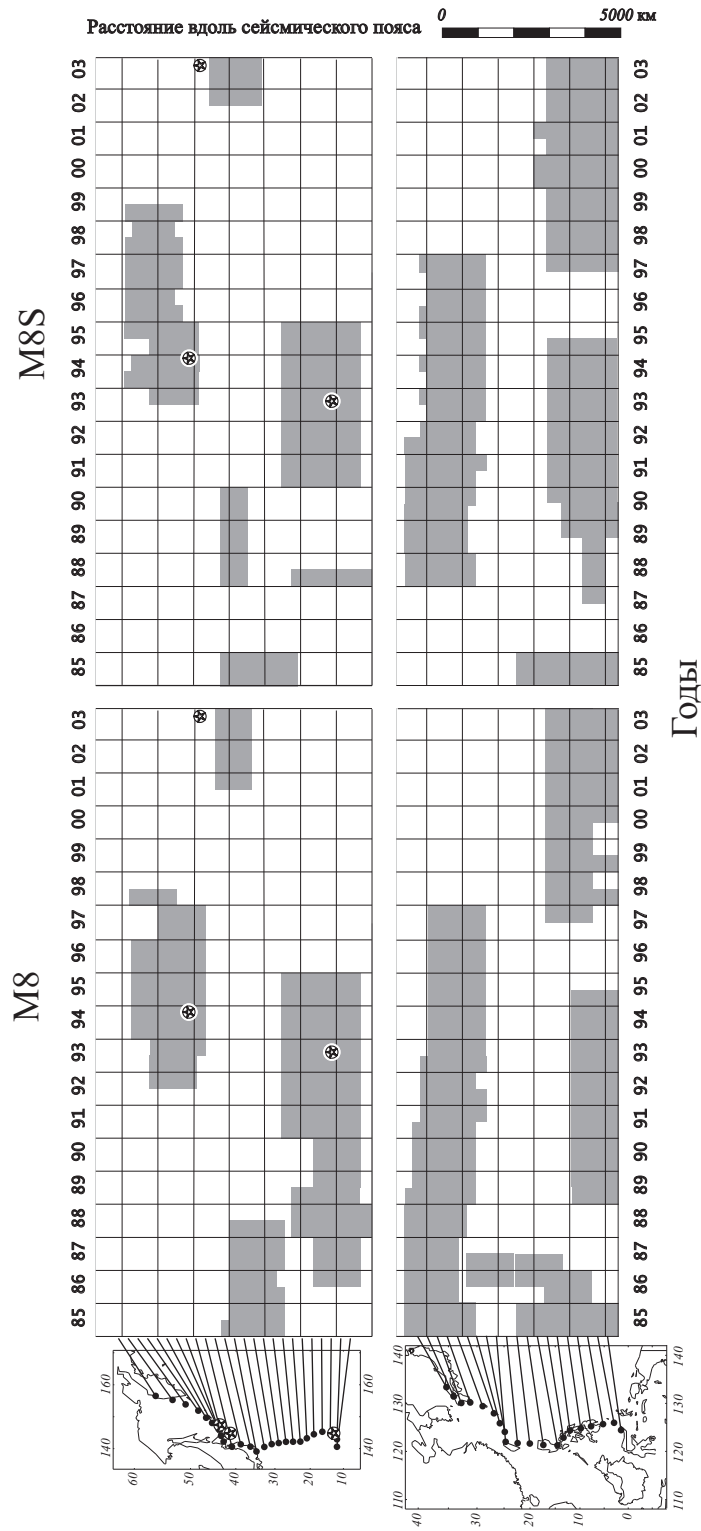


Рис. 2. Пространственно-временное распределение тремов, объявленных алгоритмами M8 и M8S в 1985–2003 гг. в тесте с $M_0 = 8.0$ на двух сегментах сейсмического пояса северо-запада Тихого океана.
 Слева показаны регионы и положения центров *крупнейших исследований*, используемых в глобальном тесте алгоритма M8; звездочками отмечены сильнейшие землетрясения, произошедшие за это время

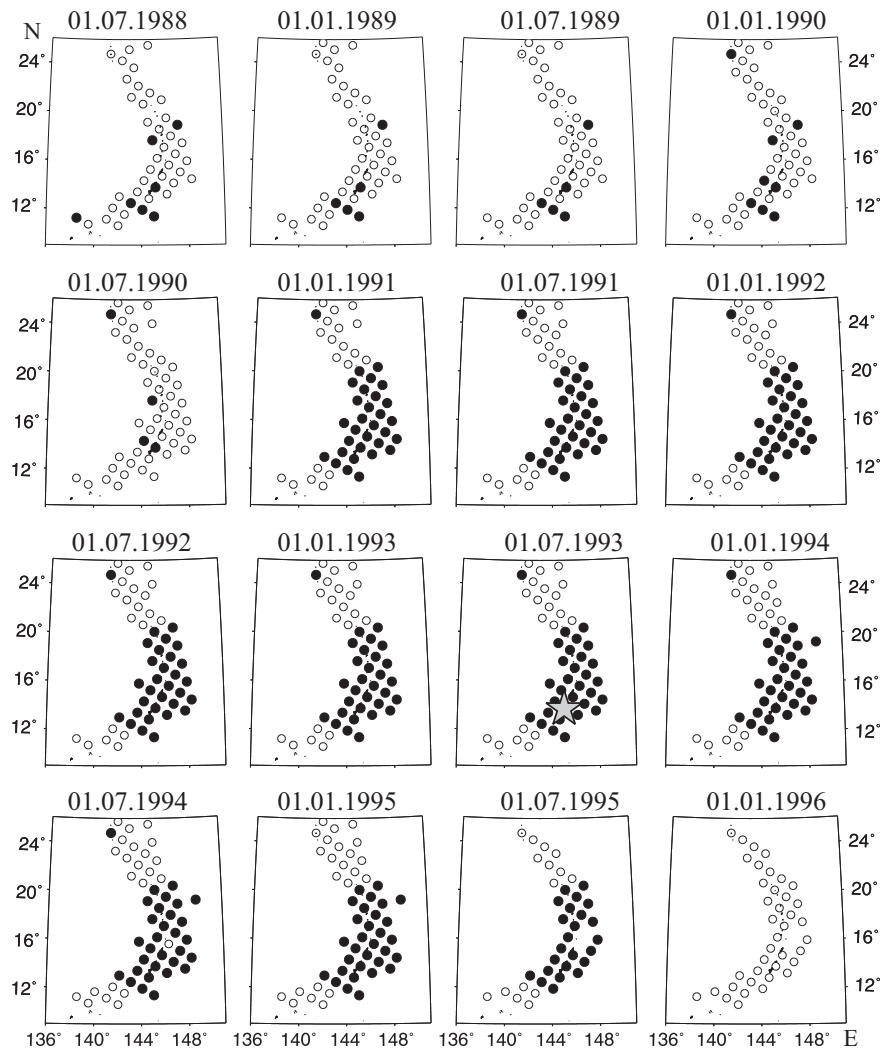


Рис. 3. Динамика формирования области тревоги по алгоритму М8S на участке Бонин-Марианского желоба.

Кружками показаны все центры *кругов исследования*, черными кружками – те из них, в которых алгоритм М8 объявил тревогу; звездочкой отмечен эпицентр землетрясения на о. Гуам, 08.08.1993, $M = 8.2$

Начиная с 1 января 1991 года, в регионе появляется большой и устойчивый во времени кластер тревог, который формирует область тревоги по алгоритму М8S. Эта тревога “накрывает” эпицентр Гуамского землетрясения, произошедшего 2.5 года спустя после ее объявления – 8 августа 1993 года. Тревога длится еще 2.5 года и 1 января 1996 года полностью исчезает. Отметим, что после 1995 года и вплоть до

конца 2003 года в регионе не было отмечено ни одного, даже единичного, *круга исследования* в состоянии тревоги по алгоритму M8 и одновременно не произошло ни одного сильного землетрясения. Таким образом, тревога, идентифицированная глобальным тестом алгоритма M8 в одном из *кругов исследования* на участке Бонин-Марианского жёлоба (01.07.1986 – 01.01.1996), имеет неоднородную по времени структуру. Начало ее (до 01.01.1991) сформировано изолированной в пространстве тревогой; продолжение же, включающее сильное событие, образовано тревогой, находящейся в центре большого пространственного кластера тревог. Этот пример иллюстрирует механизм уменьшения пространственно-временного объема тревог в алгоритме M8S по сравнению с алгоритмом M8. Одновременно он показывает, что сильнейшее землетрясение предсказывается устойчивым во времени и достаточно большим по пространству кластером тревог.

Тот факт, что все шесть сильных событий с магнитудой 7.5 и выше, предсказанные в глобальном тесте алгоритма M8, одновременно предсказываются алгоритмом M8S, является подтверждением высокой пространственной стабильности диагностики по M8 и отвергает гипотезу случайного прогноза. Отсутствие новых, по сравнению с M8, успехов говорит об отсутствии случайных пропусков цели в алгоритме M8, т.е. пропусков событий, которые ассоциируются, тем не менее, с хорошо сформированными областями их подготовки. В то же время отметим, что не всегда пространственно устойчивые кластеры тревог влекут за собой сильное событие. Примерами тому являются три продолжительные ложные тревоги, объявленные в течение исследуемого периода времени алгоритмом M8S в тесте с $M_0 = 8.0$: одна на юге Японии и две на Филиппинах. (Внутри одной из этих тревог произошло событие из предыдущего магнитудного диапазона: Филиппины, 17 мая 1992 года, $M = 7.5$.) Такие тревоги должны стать предметом дополнительного исследования, поскольку их идентификация может существенно повысить эффективность прогноза. Не исключено, однако, что наличие “ложных” тревог является естественным объективным следствием динамического процесса, отражающим возможность перехода системы разломов и блоков из одного стационарного состояния в другое, минуя катастрофу.

Таким образом, применение алгоритма M8S на северо-западе Тихого океана позволило:

- 1) подтвердить высокую пространственную устойчивость прогноза сильнейших землетрясений мира, полученного в рамках глобального теста алгоритма M8;

- 2) получить пространственно стабилизированный прогноз сильнейших землетрясений северо-запада Тихого океана при сохранении или

уменьшении пространственно-временного объема тревоги, что гарантирует более высокую надежность диагностики периодов повышенной вероятности землетрясений в процессе мониторинга глобальной сейсмичности.

Авторы признательны Г.М.Молчану за высказанные замечания и предложения по улучшению содержания статьи.

Работа выполнена при частичной поддержке Международного научно-технического центра (проект 1538-00 МНТЦ), ИНТАС (проект 01-0748), Фонда Джеймса С. МакДонелла (проект “Understanding and Prediction of Critical Transitions in Complex Systems” в рамках программы “The 21st Century Collaborative Activity Award for Studying Complex Systems”), гранта Президента РФ НШ-1269.2003.5 и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН N 13 “Изменение окружающей среды и климата: природные катастрофы”.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Healy J.H., Kossobokov V.G., Dewey J.W.* A test to evaluate the earthquake prediction algorithm, M8. USGS. Open-File Report 92-401. 23 p.
2. <http://www.mitp.ru/predictions.html>
3. *Kossobokov V.G., Romashkova L.L., Keilis-Borok V.I., Healy J.H.* Testing earthquake prediction algorithms: statistically significant advance prediction of the largest earthquakes in the Circum-Pacific, 1992-1997 // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1999. Vol.111. P.187-196.
4. *Gelfand I.M., Guberman Sh.A., Keilis-Borok V.I., Knopoff L., Press F., Ranzman E.Ya., Rotwain I.M., Sadovsky A.M.* Pattern recognition applied to earthquake epicenters in California // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1976. Vol.11. P.227-283.
5. *Keilis-Borok V.I., Soloviev A.A. (Eds.)* Nonlinear dynamics of the lithosphere and earthquake prediction. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. 338 p.
6. *Ромашкова Л.Л., Кособоков В.Г.* Пространственно стабилизированная схема применения алгоритма М8: Италия и Калифорния // *Проблемы теоретической сейсмологии и сейсмичности*. М.: Наука, 2002. С.162-185. (Вычисл. сейсмология; Вып.33).
7. *Kossobokov V.G., Romashkova L.L., Panza G.F., Peresan A.* Stabilizing intermediate-term medium-range earthquake predictions // *J. of Seismology and Earthquake Engineering*. 2002. Vol.4, N 2, N 3. P.11-19.
8. http://www.mitp.ru/m8s/M8s_italy.html
9. Global Hypocenters Data Base, CD-ROM NEIC/USGS, Denver: CO, 1989 and its updates through January 2002.
10. *Shebalin P.N.* Automatic duplicate identification in set of earthquake catalogues merged together. USGS. Open-File Report 92-401. Appendix II.
11. *Nekrasova A., Kossobokov V.* Generalized Gutenberg-Richter recurrence law: Global map of parameters. EGS – AGU – EUG Joint Assembly. Nice. 2003. Abstracts EAE03-A-03801.

Подписи к рисункам.

Рис. 1. Регион северо-запада Тихого океана (выделен на карте), в котором применялся алгоритм М8S

Рис. 2. Пространственно-временное распределение тревог, объявленных алгоритмами М8 и М8S в 1985–2003 гг. в тесте с $M_0 = 8.0$ на двух сегментах сейсмического пояса северо-запада Тихого океана.

Слева показаны регионы и положения центров *кругов исследования*, используемых в глобальном тесте алгоритма М8; звездочками отмечены сильнейшие землетрясения, произошедшие за это время

Рис. 3. Динамика формирования области тревоги по алгоритму М8S на участке Бонин-Марианского желоба.

Кружками показаны все центры *кругов исследования*, черные кружки соответствуют центрам *кругов исследования*, в которых алгоритм М8 объявил тревогу; звездочкой отмечен эпицентр землетрясения на о. Гуам, 08.08.93, $M = 8.2$