

УДК 550.34

МЕГАЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПРЕДСКАЗУЕМЫ?

© 2011 г. В.Г. Кособоков^{1,2}

¹Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,
г. Москва, Россия

²Парижский институт физики Земли, г. Париж, Франция

В ходе вестущегося с 1992 г. Глобального теста среднесрочного прогноза землетрясений по алгоритмам M8 и MSc место и время каждого из мегаземлетрясений 27 февраля 2010 г. в Чили и 11 марта 2011 г. в Японии были заранее распознаны как находящиеся в состоянии повышенной вероятности таких событий. В совокупности с ретроспективным анализом ситуации перед первым из серии мегаземлетрясений XXI столетия 26 декабря 2004 г. в Индийском океане эти свидетельства дают основание для предположения о том, что алгоритмы, эффективность которых доказана для событий из магнитудных диапазонов $M7.5+$ и $M8.0+$, могут быть использованы также и для прогноза мегаземлетрясений.

Ключевые слова: землетрясение, мегаземлетрясение, прогноз, предсказание, алгоритм, проверка статистических гипотез, случайный успех, уровень значимости.

Введение

Понимание сейсмического процесса в терминах нелинейной динамики иерархической системы блоков и разделяющих их разломов уже привело к созданию воспроизводимых методов среднесрочного прогноза землетрясений средней пространственной точности, проверенных статистически в прямом экспериментальном использовании с 1992 г. по настоящее время. Мегаземлетрясение 26 декабря 2004 г. стало первым указанием на то, что алгоритм M8, разработанный для прогноза землетрясений магнитудного диапазона $M8.0+$ и проверенный в приложениях, нацеленных на события от $M8.0+$ до значительно меньших $M5.5+$, может применяться и для прогноза мегасобытий из магнитудных диапазонов $M8.5+$ и $M9.0+$.

Очевидно, что единичное событие не могло служить полным подтверждением даже при дополнительной поддержке, полученной при ретроспективном рассмотрении примеров других мегаземлетрясений $M9.0+$ (Камчатка, 1952 г.; о-ва Андреяновские, 1957 г.; Чили, 1960 г.; Аляска, 1964 г.). Однако, как показывает опыт вестущегося в реальном времени Глобального теста прогнозов землетрясений по алгоритмам M8 и MSc, места и периоды повышенной вероятности таких событий могут быть заранее диагно-

стированы: примеры мегаземлетрясений 27 февраля 2010 г. в Чили и 11 марта 2011 г. в Японии подтверждают этот результат.

В настоящей работе приводится краткая информация об алгоритмах M8 и MSc и процедурах Глобального теста прогнозов землетрясений по этим алгоритмам, рассматриваются особенности проявления мегаземлетрясений, в том числе происшедшего в Японии 11 марта 2011 г., в результатах глобального тестирования прогнозов землетрясений по обсуждаемым алгоритмам.

Глобальный тест алгоритмов среднесрочного прогноза землетрясений

Начиная с 1992 г. в МИТП РАН ведется рутинный прогноз сильнейших землетрясений мира во всех районах, где доступной информации о землетрясениях меньшей силы из Глобальной базы данных [Global..., 1989] и ее пополнения до текущего момента времени достаточно для применения алгоритмов M8 [Кейлис-Борок, Кособоков, 1986; Keilis-Borok, Kossobokov, 1990] и MSc [Kossobokov et al., 1990]. До начала эксперимента в июле 1991 г., нами совместно с сотрудниками двух центров Геологической службы США – Д.Х. Хили (Менло-Парк, Калифорния) и Д.У. Дьюи (Голден, Колорадо), были зафиксированы все параметры алгоритма и однозначно определены процедура пополнения базы данных и критерии оценки значимости результатов [Healy et al., 1992]. Каждые полгода, после очередного пополнения базы данных эксперимента, текущий прогноз обновляется и распространяется среди наблюдателей. Начиная с 1999 г. прогнозы публикуются на сайте ограниченного доступа МИТП РАН.

Краткое описание алгоритма M8 [Кейлис-Борок, Кособоков, 1986]. Прогноз ориентирован на землетрясения магнитудой из диапазона $M_{0+} = [M_0, M_0 + \Delta m]$, где $0.5 < \Delta m < 1$. Причем, если данные каталога позволяют, возможно рассмотрение нескольких перекрывающихся диапазонов, определяемых различными значениями M_0 с шагом 0.5. Территория сейсмического региона сканируется перекрывающимися областями (обычно кругами) исследования диаметром $D(M_0)$. В каждой из областей рассматривается каталог основных толчков $\{(t_k, c_k, M_k, b_k)\}$, где t_k – время возникновения, c_k – пространственные координаты, M_k – магнитуда, $b_k = b_k(e, M_a)$ – число афтершоков магнитудой от M_a и выше в первые e дней после основного толчка с порядковым номером k . Последовательность нормализована нижним порогом магнитуды $\underline{M} = M_{\min}(\tilde{N})$, где \tilde{N} – стандартное значение среднегодового числа в последовательности (таким образом, в продолжительный интервал времени последовательности из разных областей исследования примерно равны по численности).

Для каждой из областей исследования в скользящем временном окне $(t-s, t)$ и диапазоне магнитуд (\underline{M}, M_0) вычисляются несколько средних значений, которые количественно отображают различные меры интенсивности потока землетрясений, отклонения от долговременных трендов и группируемости землетрясений. Конкретнее, в моменты времени $\{t_j\}$ с шагом $\delta t = 0.5$ года вычисляются:

- $N(t_j) = N(t_j | \underline{M}, s)$ – число основных толчков с $M_k \geq \underline{M}$ за время $(t_j - s, t_j)$;
- $L(t_j) = L(t_j | \underline{M}, s, s_+)$ – отклонение $N(t)$ от долговременного тренда в период s_+ ;
- $Z(t_j) = Z(t_j | \underline{M}, M_0 - g, s)$ – линейная концентрация очагов основных толчков $\{k\}$ из диапазона магнитуд $\underline{M} \leq M_k < M_0 - g$ в период время $(t_j - s, t_j)$ (линейная концентрация обратно пропорциональна величине критерия образования магистрального разрыва по С.Н. Журкову [Соболев, Завьялов, 1980]);

• $B(t_j) = B(t_j | M_0 - p, M_0 - q, s', e, M_a) = \max_{\{k\}} b_k(e, M_a)$ – максимальное число афтершоков у основных толчков $\{k\}$ из диапазона магнитуд $M_0 - p \leq M_k < M_0 - q$ в период времени $(t_j - s', t_j)$.

Каждая из функций N, L, Z вычисляется независимо по двум последовательностям основных толчков с $M_k \geq \underline{M} = M_{\min}(\tilde{N})$, для $\tilde{N} = 20$ и $\tilde{N} = 10$. В результате этого сейсмический поток в каждой из областей исследования робастно отображается семью функциями: парами $N1$ и $N2, L1$ и $L2, Z1$ и $Z2$ и одной функцией B .

Для каждой из семи функций по их текущему эмпирическому распределению определим Q % квантиль и назовем превышающие его значения *аномально большими*.

Тревога – период повышенной вероятности (ППВ) землетрясения из диапазона M_0+ , начинается в момент времени t_j , когда шесть из семи функций, включая B , демонстрируют аномально большие значения в каждом из двух последовательных узких интервалов времени $(t_{j-1} - \Delta t, t_{j-1})$ и $(t_j - \Delta t, t_j)$ и продолжается до $t_j + \tau$.

Заметим, что t_j – не обязательно текущий, т.е. последний в $\{t_j\}$, момент времени. Тем самым в ходе мониторинга, реального или симулирующего таковой, тревоги могут продолжаться более и, наоборот, прерываться ранее τ лет, если текущее пополнение данных вызывает изменения в определении магнитудных порогов и/или квантилей распределений у используемых семи функций.

Следующие стандартные константы определяют оригинальную версию алгоритма M8: $D(M_0) = \{\exp(M_0 - 5.6) + 1\}$ в градусах земного меридиана (т.е. 384, 560, 854 и 1333 км для $M_0 = 6.5, 7.0, 7.5$ и 8.0 соответственно), $\delta t = 0.5$ года, $s = 6$ лет, $s' = 1$ год, $\Delta t = 3$ года, $\tau = 5$ лет, $g = 0.5, p = 2.0, q = 0.2, Q = 75$ % для B и 90 % для остальных шести функций. При расчете линейной концентрации $Z(t_j)$ средний размер очага обычно грубо оценивается величиной $\frac{1}{N} \sum_{\{i\}} 10^{\beta(M_i - \alpha)}$ (где N – число основных толчков в $\{i\}$,

$\beta = 0.46$, что более точно соответствует эмпирическим данным о протяженности очага, $\alpha = 0$, что не ограничивает общности), в то время как среднее расстояние между очагами r берется пропорциональным $\sqrt[3]{1/N}$. Использование более точных оценок концентрации землетрясений в области исследования может улучшить эксплуатационные качества алгоритма [Ромашкова, Кособоков, 1996].

Краткое описание алгоритма MSc [Kossobokov et al., 1990]. Область тревоги сканируется равномерно одинаковыми квадратами $\{S_{ij} | 1 \leq i, j \leq 16\}$ со стороны $3 \times D(M_0)/16$ так, что центр S_{ij} совпадает с центром C_{ij} . Начиная с момента за 6 лет до начала объявленной тревоги рассматриваются перекрывающиеся двухмесячные интервалы, оканчивающиеся в моменты времени $\{t_k\}$, с шагом в 1 мес ($t_{k+1} - t_k = 1$ мес). Для каждого квадрата S_{ij} решается вопрос, находится ли он в состоянии «аномального затишья». При этом предполагается, что возникновение ожидаемого основного толчка наиболее вероятно в районе «достаточно большого кластера аномальных затиший». Проекция вдоль оси времени всех таких кластеров начиная с момента за 1 год до объявления тревоги до текущего момента определяет уточненную область прогноза V на территории ППВ.

Формальное определение «аномального затишья» таково. Поскольку выделение асейсмичных территорий не входит в нашу задачу, а ищется та часть области, которая принимала и продолжает принимать наиболее активное участие в формировании тревоги, определим «аномальное затишье» в терминах 10-процентного квантиля эмпирического распределения числа землетрясений магнитудой $M_0 - 4.0$ за 2 мес в пределах S_{ij} ,

сформированного по выборке $\{n_{ij,k}\}$, который обозначим \underline{n}_{ij} . Будем считать, что квадрат S_{ij} находится в состоянии «аномального затишья» в момент времени t_k , если $n_{ij,k} \leq \underline{n}_{ij}$, иными словами, если значение $n_{ij,k}$ меньше, чем для 90 % от всех определений числа землетрясений $\{n_{ij,k}\}$.

Формальное определение «достаточно большого кластера аномальных затиший» таково. Определим $S_{ij,k}$ как S_{ij} в момент времени t_k . Назовем соседними квадраты $S_{ij,k}$ и $S_{lm,n}$, если $|k-n| + |i-1| + |j-m| = 1$. Рассмотрим совокупность $Q = \{S_{ij,k}\}$ всех $S_{ij,k}$, находившихся в состоянии «аномального затишья» начиная с момента за 1 год до объявления тревоги до текущего момента времени. Разобьем Q на кластеры Q_1, Q_2, \dots, Q_p согласно условию, что соседи принадлежат одному кластеру. (В этом случае квадраты $S_{ij,k}$ и $S_{lm,n}$ принадлежат одному кластеру, если в Q существует последовательность квадратов-соседей, начинающаяся с $S_{ij,k}$ и кончающаяся в $S_{lm,n}$. Очевидно, что в таком определении кластеры Q_1, Q_2, \dots, Q_p являются соответствующими классами отношения эквивалентности квадратов из совокупности Q .) Определим размер кластера количеством принадлежащих ему квадратов $S_{ij,k}$. Наконец, назовем Q_q «достаточно большим кластером аномальных затиший», если его размер не меньше порогового значения n_Q ($n_Q = 4$).

Проекция вдоль оси времени всех «достаточно больших кластеров аномальных затиший» определяет уточненную область прогноза V .

Приведенные здесь определения и значения свободных параметров алгоритма – шаг разбиения по пространству ($D(M_0)/16$), шаг по времени (1 мес), размер пространственно-временного объединения при расчете $n_{ij,k}$ (3 шага по пространству и 2 по времени), выбор квантиля (10 %), а также задание отношения эквивалентности и порог n_Q – мотивированы результатами детального анализа пространственно-временных вариаций сейсмичности в области прогноза перед землетрясением Юрика 1980 г. у мыса Мендосино, в ходе которого удалось найти простой набор отличительных признаков очага готовящегося основного толчка. Алгоритм диагностики этих признаков и локализации уточненной зоны тревоги получил название MSc (Mendocino Scenario) – сценарий Мендосино.

Алгоритмы M8 и MSc диагностируют пространственно-временные области тревоги, которые полностью соответствуют общепринятому определению прогноза землетрясений в редакции Комиссии по прогнозу землетрясений Национальной академии наук США [Allen et al., 1976], которая предполагает однозначное определение диапазона магнитуд, интервала времени и географической области предсказания, а также его доверительный уровень. Тревоги M8 являются среднесрочными во времени и средней протяженности в пространстве по отношению к длине разрыва ожидаемого землетрясения L_e (табл. 1). При наличии достаточно полных каталогов землетрясений алгоритм MSc в состоянии уточнить пространственную локализацию до малой протяженности, а в отдельных случаях и до практически точного определения области будущего очага.

Таблица 1. Классификация прогнозов землетрясений по временной и пространственной определенности

Прогноз	Время, годы	Размер очага	L_e
Долгосрочный	10	Большой протяженности	До 100
Среднесрочный	1	Средней протяженности	5–10
Краткосрочный	0.01–0.1	Малой протяженности	2–3
Немедленный	0.001	Точный	1

Следует особо отметить, что иерархическая природа землетрясений предполагает прогноз их силы с погрешностью порядка единицы магнитуды, т.е. до одного десятичного порядка площади и/или квадрата линейного размера очага ожидаемого землетрясения L_e . Действительно, согласно закону повторяемости Гутенберга – Рихтера, при большем диапазоне магнитуды ожидаемого землетрясения вклад в общую статистику успехов и/или неудач от землетрясений на границах диапазона становится слишком неравноценным, причем практически статистика определяется наиболее многочисленными событиями с близкой к пороговой магнитудой. Результаты прогнозов, безусловно, могут уточняться за счет дополнительного анализа с использованием как разнообразия методов анализа, так и привлечения дополнительных наблюдений.

Алгоритм М8 для диагностики использует достаточно традиционное представление динамической системы, дополняя стандартное фазовое пространство скоростей (N) и ускорений (L) сейсмического потока величинами его безразмерной концентрации (Z) и группировки (B). Он распознает *критерий*, определенный экстремальными значениями координат фазового пространства (рис. 1), как окрестность сингулярности сейсмогенной системы разломов и разделяемых ими блоков.

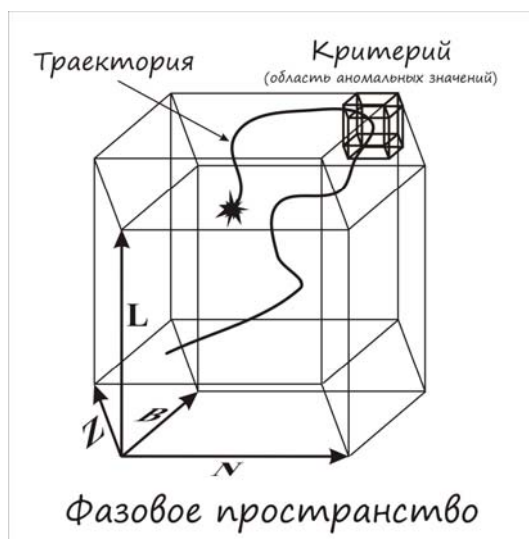


Рис. 1. Критерий, определенный экстремальными значениями координат пополненного фазового пространства из алгоритма М8

Попадание траектории системы в эту область аномального состояния свидетельствует о повышении вероятности катастрофы до уровня, достаточного для ее эффективного предсказания. Согласно общей теории, существует конечное время запаздывания между максимумом активизации (энтропии) и катастрофой, поэтому траектория может покинуть область критерия за некоторое время до катастрофы. В алгоритме М8 это время ограничено параметром $\tau = 5$ лет.

Алгоритм М8С выделяет ту часть области тревоги, которая с начала обратного каскада сейсмичности к катастрофе, определенного с помощью алгоритма М8, демонстрирует стабильно высокую активность, изредка прерывающуюся короткими затишьями, т.е. признак чередования, характерный для динамических систем на последнем этапе мягкой потери устойчивости. При такой заведомо качественной аналогии алгоритм М8 диагностирует потерю устойчивости на ее ранней стадии, а алгоритм М8С определяет стадию хаотизации, когда образуется странный аттрактор.

Оценка эффективности прогнозов

Эффективность прогнозов землетрясений можно оценить с помощью естественной, эмпирической меры пространственного распределения сейсмичности [Kossobokov, Turcotte, 1996], которая является консервативной мерой объема тревоги. Заметим, что использование геометрической площади области тревоги может привести к существенному завышению значимости результатов, поскольку приравнивает равновеликие области высокой и низкой сейсмической активности.

Рецепт практического подсчета консервативного процента объема тревоги p крайне прост: 1) выберите эталонный каталог землетрясений; 2) подсчитайте по этой выборке количество событий внутри всей рассмотренной территории и используйте его как знаменатель дроби; 3) для каждого фиксированного момента времени подсчитайте количество событий внутри совокупности текущих областей тревоги рассмотренной территории и используйте его как числитель дроби; 4) усредните дробь по всему периоду прогноза, результат равен p .

Этот простейший рецепт имеет изящную аналогию, в которой каждому из событий эталонного каталога соответствует один сектор Сейсмической рулетки Земли (рис. 2, Б, вверху), а прогнозу – расклад равнозначных фишек по секторам (рис. 2, Б, внизу). При этом двойственные по отношению друг к другу статистические уровни значимости и доверия результатов прогноза соответственно равны: $1 - B(n-1, N, p)$ и $B(n-1, N, p)$, где B – функция кумулятивного биномиального распределения, n – число «успехов» в последовательности N независимых испытаний [Леман, 1979]. Чем ниже уровень статистической значимости и, наоборот, чем выше уровень доверия, тем значительнее отличие достигнутых результатов прогноза от результатов случайного гадания в условиях нулевой гипотезы. В практических приложениях для определения значимых результатов обычно используются значения уровня доверия в 95 и 99 %.

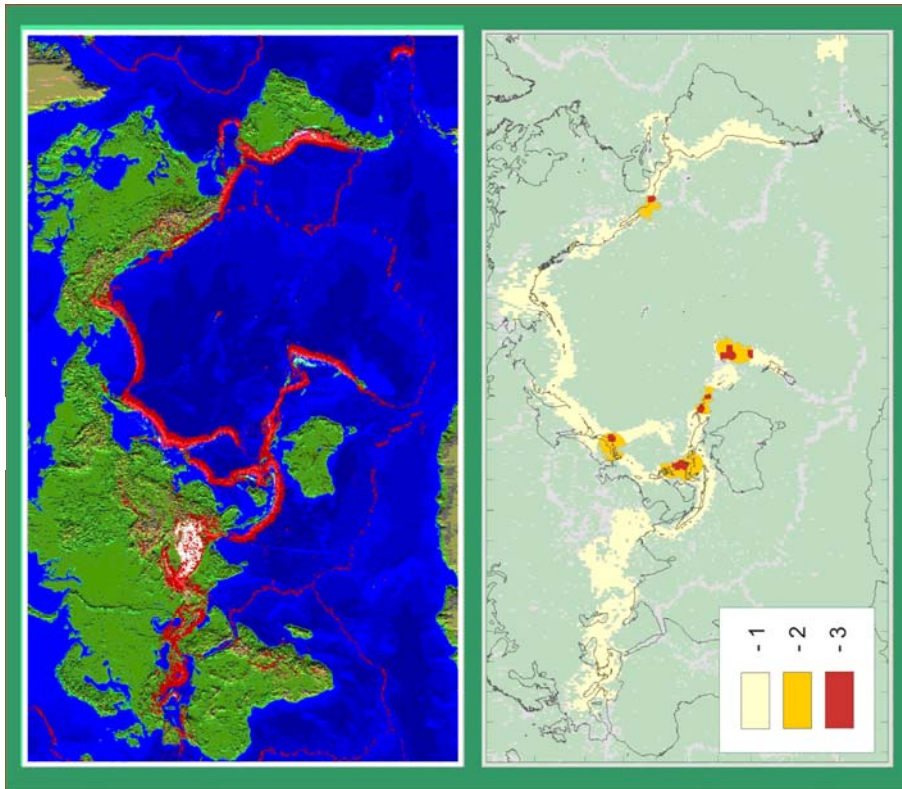
Результаты глобального мониторинга сейсмичности с помощью алгоритмов M8 и MSc суммированы в табл. 2, где оценка уровня доверия получена по наиболее консервативной мере объема тревоги, учитывающей эмпирическое распределение эпицентров землетрясений.

Чтобы достигнутый уровень доверия снизился до 95 %, потребуется «полоса невезения», в которой будут пропущены все 9 последующих землетрясений с диапазоном M8.0+, а для диапазона M7.5+ без единого «успеха» – 15 пропусков. Такое вряд ли

Таблица 2. Оценка эффективности алгоритмов M8 и M8-MSc

Период теста	Сильные события			Процент объема тревоги p , %		Уровень доверия, %	
	предсказано		всего	M8	M8-MSc	M8	M8-MSc
	M8	M8-MSc					
Прогноз землетрясений с M8.0+							
1985–2010 гг.	14	10	19	33.16	16.89	99.96	99.96
1992–2010 гг.	12	8	17	30.09	15.04	99.93	99.82
Прогноз землетрясений с M7.5+							
1985–2010 гг.	38	16	65	28.73	9.32	99.99	99.98
1992–2010 гг.	28	10	53	23.14	8.31	99.99	99.89

Б



А



Рис. 2. Классическая (А) и сейсмическая (Б) рулетки

1–3 – области главных сейсмических поясов мира: 1 – области, где доступной информации о землетрясениях меньшей силы из Глобальной базы данных достаточно для применения алгоритма М8, ориентированного на магнитудный диапазон М8.0+, 2 – области, где диагностируется ППВ, 3 – области уточненной по алгоритму МSc локализации ППВ

возможно. Тем самым результаты Глобального теста прогнозов по алгоритмам M8 и MSc доказывают: гипотеза о том, что Сейсмическая рулетка Земли идеальна (равновероятно выпадение выигрыша на любой из ее секторов), должна быть отвергнута, по крайней мере, по отношению к выпадению «шариков», связанных с наиболее сильными и великими землетрясениями.

Мегаземлетрясения в Глобальном тесте прогнозов по алгоритмам M8 и MSc

В момент мегаземлетрясения 26 декабря 2004 г., согласно регулярному обновлению прогнозов Глобального теста в июле 2004 г., в Индийском океане землетрясения с магнитудными диапазонами $M8.0+$ или $M7.5+$ не ожидалось. Впрочем, землетрясений в этих диапазонах магнитуд действительно не было (рис. 3). Очаг мегаземлетрясения 2004 г. в Индийском океане значительно превзошел диаметр области рассмотрения, нацеленного на $M7.5+$, и сравнялся с диаметром для $M8.0+$.

Необходимо заметить (рис. 4), что если бы кто-то решил сориентировать мониторинг в область неисследованного магнитудного диапазона $M9.0+$ и 1 июля 2004 г. произвел диагностику по алгоритму M8 в кругах диаметром 6000 км, то мегаземлетрясение 26 декабря 2004 г. было бы заблаговременно предсказано [Кособоков, 2005].

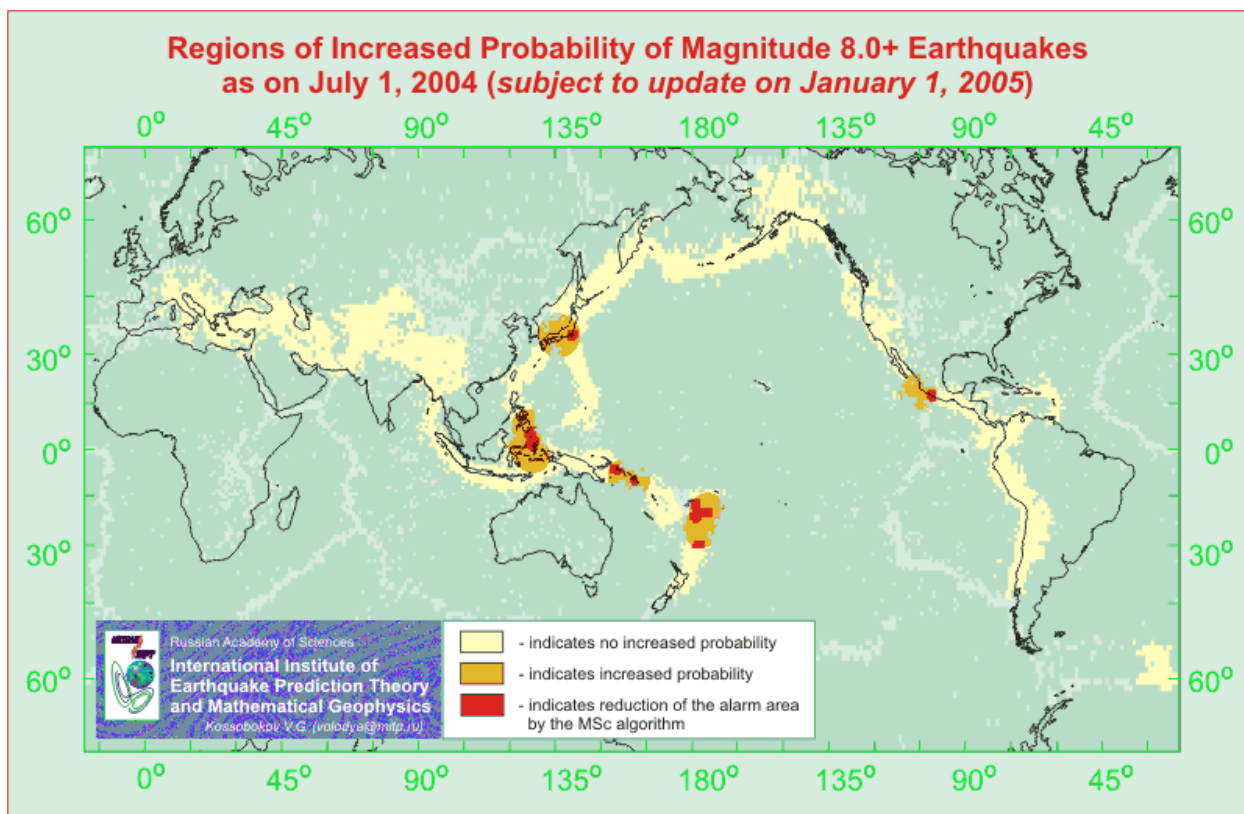


Рис. 3. Глобальный тест прогнозов землетрясений по алгоритмам M8 и MSc: июль – декабрь 2004 г. ($M8.0+$)

Диагностика ИПВ в кругах исследования представлена цветом: светло-желтый – отсутствие тревоги, оранжевый – ее наличие; красным выделены области наиболее вероятного возникновения тревоги, определенные по алгоритму MSc. Прогнозы показаны сквозь маску глобального распределения сейсмичности (и, естественно, не распространяются на районы, где землетрясения не регистрировались в период инструментальных наблюдений) и ограничены районами, где доступной информации о землетрясениях достаточно для применения стандартной версии алгоритма M8

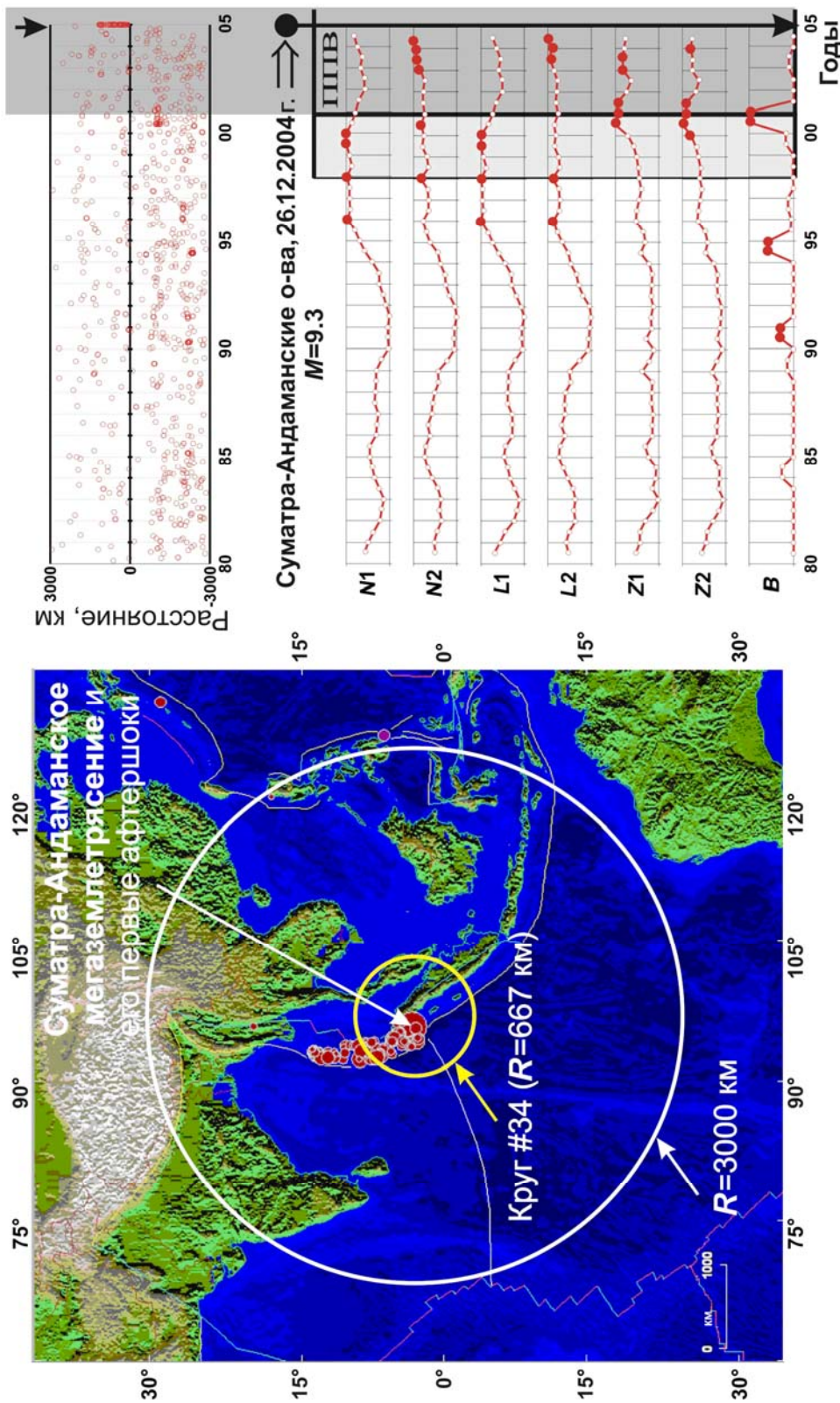


Рис. 4. Прогноз (в ретроспективе) Суматра-Андаманского землетрясения 26 декабря 2004 г. магнитудой $M_w=9.3$ [Kossobokov, 2005].

Слева – круг исследования #34 Глобального теста прогнозов по алгоритмам M8 и MSc и круг радиусом 3000 км с тем же центром, а также эпицентры мегавзброса 26 декабря 2004 г. и его первые афтершоки (красные кружки); справа – пространственно-временная развертка последовательности землетрясений из круга радиусом 3000 км в проекции на ось глубоководного желоба и значения функций алгоритма M8, аномальные значения которых отмечены кружками. Время ожидания с момента начала определенного ретроспективно алгоритмом M8 ПШВ до мегавзброса (вертикальная стрелка) составило около 4 лет (темно-серый прямоугольник справа распространен на стандартное $\tau = 5$ лет

Что касается уточнения локализации по алгоритму MSc, то нам не удалось найти преобразование параметров алгоритма, подходящее для уточнения мест ожидаемых мегаземлетрясений. Трудно утверждать, что причиной тому является исключительный размер таких событий, область подготовки которых, возможно, распространяется на всю литосферу Земли [Ромашкова, Кособоков, 2007; Latchman et al., 2008; Romashkova, 2009].

По ретроспективным расчетам, формирование предвестниковой активизации завершилось с возникновением сильнейших землетрясений 4 июня 2000 г. у побережья южной части о-ва Суматра и 18 июня 2000 г. ($M7.8$) в Индийском океане, что во многом определяет тревогу с начала 2001 г. по конец 2005 г. При внимательном рассмотрении рис. 4 можно заметить [Кособоков, 2005], что эпицентральная область мегаземлетрясения 26 декабря 2004 г., возможно, уже в 2000 г. была в состоянии разрядиться событием из диапазона магнитуд $M8.0+$. Когда этого не случилось к середине 2001 г., область на севере о-ва Суматра, по-видимому, вступила в период повышенной вероятности значительно более сильного события из диапазона $M9.0+$.

Согласно ретроспективному анализу пространственно-временного распределения тревог, определенных по алгоритму M8 для $M9.0+$, начиная с 1985 г. один из небольших кластеров тревог приходится на 1984–1989 гг. и территорию западного Средиземноморья (объединение 8 кругов). Более компактный кластер объединяет в 1994–1999 гг. пять перекрывающихся кругов в районе Каскадии на западе США. Ни в одном из этих случаев мегасобытия не было зарегистрировано. В то же время область тревог M8 для диапазона $M9.0+$ в 2004 г. имело глобальное распространение на 126 из 262 кругов диаметром 6000 км [Кособоков, 2005].

Поскольку все четыре мегаземлетрясения XX столетия (Камчатка, 04.11.1952 г., $M_w=9.0$; Алеутские острова, 09.03.1957 г., $M_w=9.1$; Чили, 22.05.1960 г., $M_w=9.5$; Аляска, 28.03.1964 г., $M_w=9.2$) произошли в короткий интервал времени, а такое группирование маловероятно в модели одинаково распределенных независимых событий (вероятность менее 1%), то уже 20 января 2005 г. в Кобе на Пленарном заседании Специальной сессии «Бедствие в Индийском океане: снижение риска для обеспечения более безопасного будущего» Всемирной конференции ООН по уменьшению опасности стихийных бедствий нами было заявлено о вероятном возникновении «следующего мегаземлетрясения в ближайшие 5–10 лет» [Kossobokov, 2005].

Начиная с 2005 г. вне рамок Глобального теста прогнозов по алгоритмам M8 и MSc нами систематически обновляется глобальная карта тревог, диагностированных для диапазонов $M8.5+$ и $M9.0+$. Так, например, к 2008 г. [Kossobokov et al., 2008] область тревоги для $M9.0+$ уменьшилась с 113 (в 2005 г.) до 46 кругов диаметром 6000 км. Центры этих 46 перекрывающихся кругов образовывали четыре кластера, самый большой из которых (35 кругов) ассоциирован с Суматра-Андаманским землетрясением, простираясь от его очага на север и запад до Ассама и Кашмира и на восток до о-ва Тимор. Землетрясения 28 марта 2005 г. (Ниас, $M_w=8.7$) и 12 сентября 2007 г. (Южная Суматра, $M_w=8.5$) косвенно подтверждают диагностику возросшей опасности возникновения мегаземлетрясений именно в этом кластере тревог. Один из трех других кластеров ППВ, диагностированный в круге с координатами центра 31° ю.ш., 70° з.д., сохранялся во всех полугодовых обновлениях прогнозов вплоть до января 2010 г.

В отличие от Суматра-Андаманского землетрясения 2004 г., мегавзброс 27 февраля 2010 г. у берегов Чили произошел в пределах тревог, определенных также в рамках Глобального теста прогнозов для диапазонов $M8.0+$ и $M7.5+$. Существование изолированной

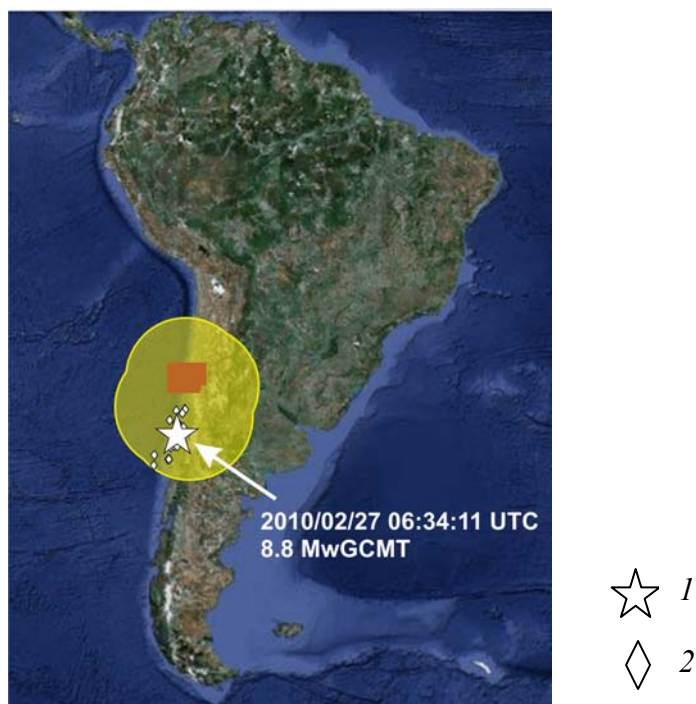


Рис. 5. Глобальный тест прогнозов по алгоритмам M8 и MSc: январь – июль 2010 г. (M8.0+), Южная Америка [Kossobokov et al., 2010].

Эпицентр мегавзброса 27 февраля 2010 г. (1) и его первые афтершоки (2) заполнили половину чилийского пояса сейсмичности в пределах области ППВ (желтый круг), диагностированного по алгоритму M8, однако вне пределов уточненного прогноза по алгоритму MSc (оранжевая область).

области ППВ для M8.0+ в сейсмическом поясе Южной Америки (рис. 5) было подтверждено в январе 2010 г. в ходе регулярного обновления карты Глобальной диагностики ППВ по алгоритму M8. Южная половина этого кластера ППВ пришла в движение в результате мегаземлетрясения в Чили 27 февраля 2010 г. Ошибка уточнения по алгоритму MSc представляется достаточно естественной из-за размера очага землетрясения, который примерно равен половине области тревоги. Впрочем, чилийский сейсмолог Рауль Мадарьяга (2007 г., персональное сообщение) также ожидали землетрясение из диапазона M8.0+ в области к северу от очага мегавзброса 27 февраля 2010 г., практически совпадающей с прогнозом по M8–MSc. По этическим соображениям здесь не приводится рисунок, относящийся к прогнозам на январь – декабрь 2010 г., поскольку некоторые представленные на нем тревоги продолжают и по сей день.

На рис. 3, где приведена прогнозная карта Глобального теста прогнозов на июль – декабрь 2004 г., можно заметить область ППВ в районе Японских островов. Формально, эта «ложная тревога», т.е. объединение ППВ сильнейших землетрясений в отсутствие таковых, в Японии продолжалась с середины 2001 г. до конца 2010 г., постепенно мигрируя из юго-западных в северные районы о-ва Хонсю. Тревога возникла в одном круге исследования с центром к западу от тройного сочленения литосферных плит (один из пяти районов ППВ на рис. 3). В 2006 г. область тревоги распространилась на северо-восток на два соседних круга (рис. 6). В 2007 г. ППВ в круге западной части области тревога исчезла, но сформировалась новая область тревоги, объединяющая три круга у восточных берегов о-ва Хонсю. В январе 2010 г. она сократилась до размеров одного круга.

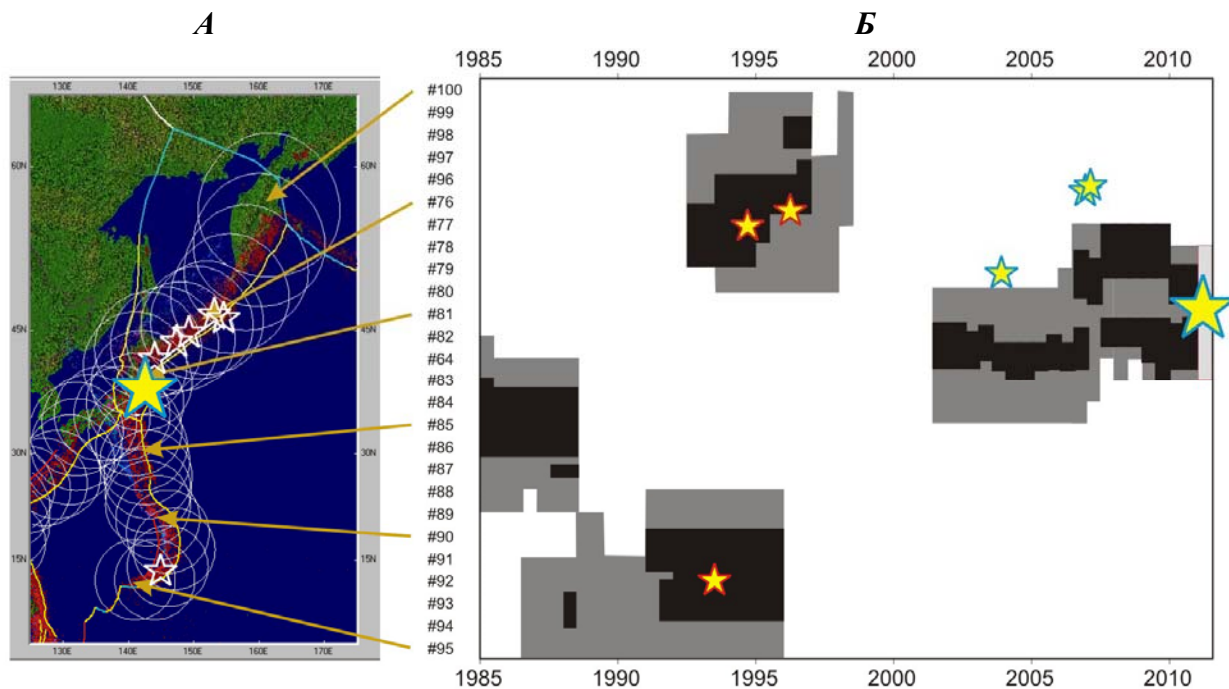


Рис. 6. Глобальный тест среднесрочного прогноза землетрясений по алгоритмам M8 и MSc: пространственно-временное распределение ППВ землетрясений из диапазона $M8.0+$ на Западе Тихого океана с момента создания алгоритма M8

A – круги исследования (стрелки указывают на центры соответствующих кругов вдоль оси сейсмического пояса на западе Тихого океана); *B* – пространственно-временная развертка диагностики ППВ: темно-серым отмечены тревоги по алгоритму M8, черным – уточнение по алгоритму MSc. Землетрясения из магнитудного диапазона $M8.0+$ даны звездочками, а мегавзброс 11 марта 2011 г. – большой звездой. Светло-серый прямоугольник (около большой звезды) на правом краю пространственно-временной диаграммы показывает полгода преждевременно отозванного ППВ

В целом эта необычно затянувшаяся тревога могла быть ассоциирована с тремя землетрясениями вблизи ее границ (25 сентября 2003 г., 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. с $M=8.3$, 8.3 и 8.2 соответственно), поскольку очаг каждого из этих землетрясений в момент его возникновения был связан «цепочкой коррелированных толчков» [Keilis-Borok et al., 2004; Shebalin et al., 2006] с уточненной зоной прогноза по комбинации алгоритмов M8–MSc.

Нельзя было исключить также возможности, что эта тревога связана с масштабной региональной активизацией сильных землетрясений, начавшейся глубоким толчком 28 июня 2002 г. с $M=7.3$ (глубина 566 км) вблизи границы Приамурья и северо-восточного Китая в наиболее погруженной зоне субдукции позади и вне области тревоги, продолжившейся двенадцатью землетрясениями с $M \geq 7.0$ в 2002–2010 гг. в пределах этой области, и, как оказалось, завершившейся глубоким (292 км) землетрясением 9 августа 2009 г. с $M=7.1$ в районе под о-вами Идзу. Отметим, что 6 из этих 12 землетрясений (26 мая и 31 октября 2003 г., 16 августа и 14 ноября 2005 г., 13 июня и 19 июля 2008 г.) произошли у берегов префектуры Мияги. Одним из возможных объяснений продолжительной тревоги также можно было считать зарегистрированное на ее территории явление «тихого землетрясения в районе Токай», начало и конец которого японские ученые относят к 2001 и 2005 гг. соответственно.

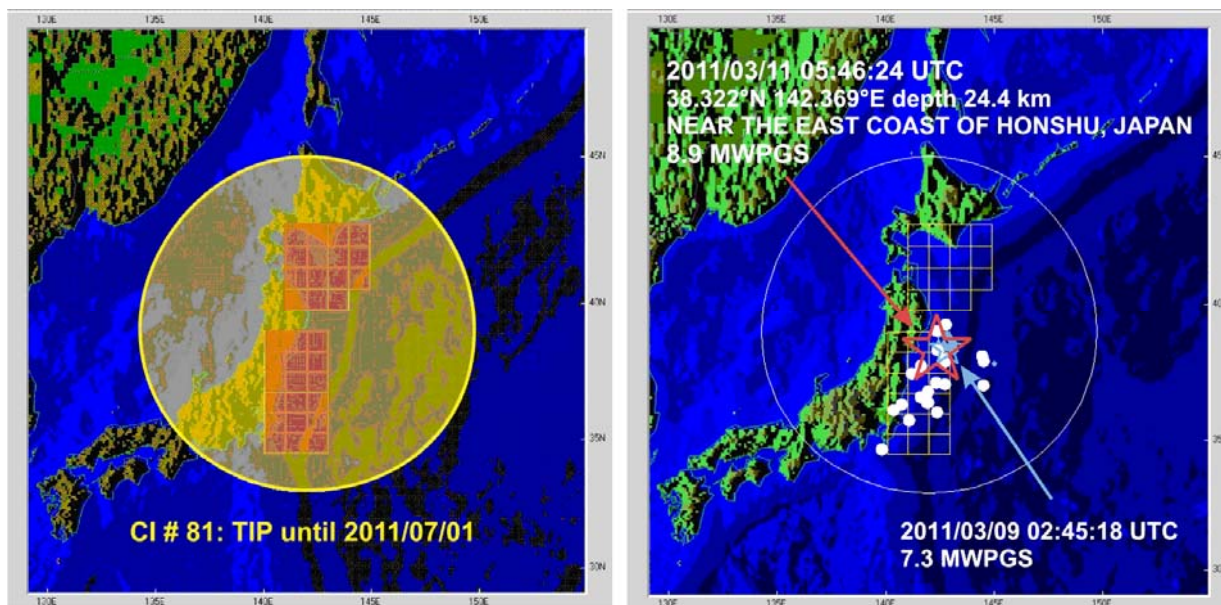


Рис. 7. Глобальный тест среднесрочного прогноза землетрясений по алгоритмам M8 и MSc: магнитудный диапазон $M8.0+$, район Японских островов

Слева показан круг исследования #81, в пределах которого с помощью алгоритма M8 по состоянию на 1 июля 2010 г. диагностирован ППВ (TIP) до 1 июля 2011 г. и наиболее опасные области, определенные алгоритмом MSc (красный цвет). Этот ППВ был преждевременно снят при обновлении прогнозов в январе 2011 г. Справа на фоне прогнозов середины 2010 г. отмечены эпицентры мегавзброса 11 марта 2011 г. (красная звезда) и его первых повторных толчков (белые точки), а также землетрясения 9 марта 2011 г. (голубая звездочка) и его афтершоки (голубые точки)

Окончательную точку в весьма своеобразную историю этой «ложной тревоги» (рис. 6) поставил мегавзброс 11 марта 2011 г. у тихоокеанских берегов района Тохоку, случившийся на 70-е сутки после ее формального завершения в пределах отозванной области прогноза по алгоритмам M8 и MSc (рис. 7). Причем его первые афтершоки (белые точки) довольно точно заполнили южную часть этой области от ее северо-восточного до юго-западного предела.

Следует особо отметить, что основному землетрясению предшествовала серия толчков, начавшаяся 9 марта 2011 г. сильным землетрясением Санкиру-оки ($M=7.3$). Таким образом, за 51 ч до мегаземлетрясения и практически из его эпицентральной зоны у берегов префектуры Мияги пришел сигнал, который рассматривался японскими сейсмологами как потенциальный форшок ожидаемого землетрясения «Мияги-Кен-оки класса $M7.5$ » (Такеши Кудо, персональное сообщение от 10 марта 2011 г.).

Преждевременная отмена ППВ в результате регулярного обновления Глобального теста прогнозов по алгоритмам M8 и MSc в январе 2011 г. была вызвана тем, что пороговое значение одной из семи функций, используемых в диагностике (конкретнее, величина, обратная критерию С.Н. Журкова, т.е. линейная концентрация разрывов), повысилась (на 1.5 % от своего значения), и необходимые (фактическое значение в июле 2011 г.) числа anomalously больших значений функций (включая B) изменились с пары 6 и 6 на 6 и 5. С практической точки зрения, это маргинальное изменение в одном из семи графиков функций, участвующих в диагностике ППВ (рис. 8), не должно вызывать

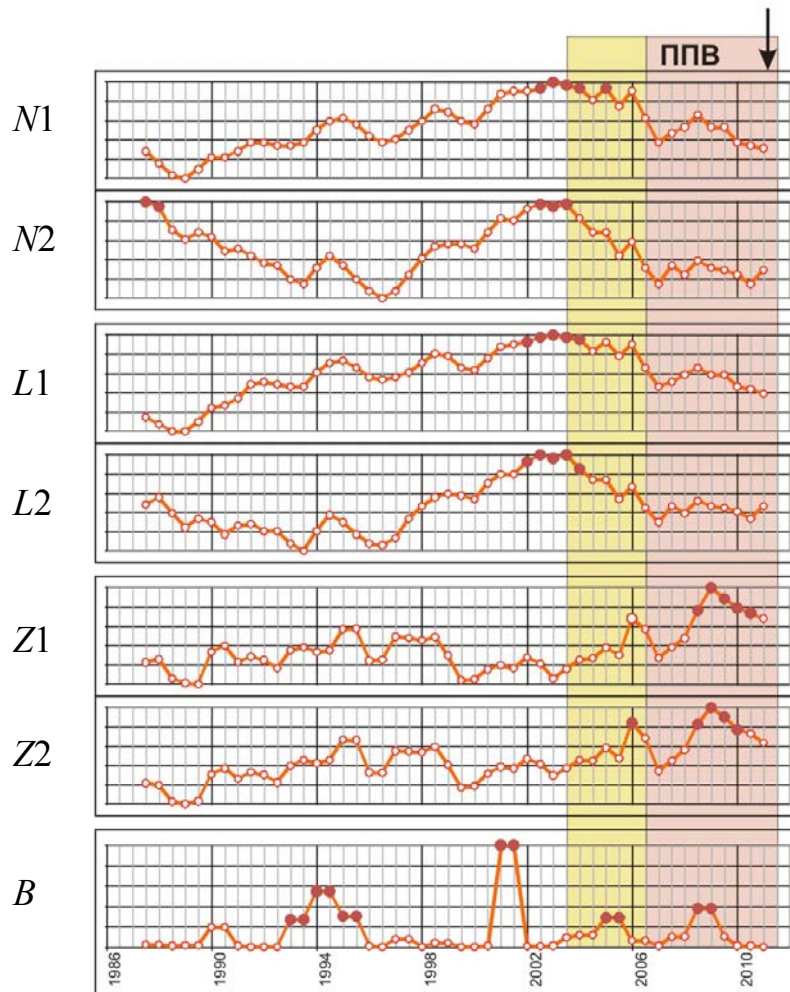


Рис. 8. Глобальный тест среднесрочного прогноза землетрясений по алгоритмам M8 и MSc, ориентированных на прогноз в диапазоне $M8.0+$: функции алгоритма M8, определенные в круге исследования #81

Функции нормированы к условным единицам от минимального значения 0 до максимального 1. Аномальные значения отмечены красными кружками, а значение функции Z1, сыгравшее решающую роль в отзыве ППВ в январе 2011 г., – увеличенным размером точки. Временной интервал $\Delta t = 3$ года дан на желтом фоне, а преждевременно отозванный ППВ – на розовом фоне. Момент мегаземлетрясения 11 марта 2011 г. отмечен вертикальной стрелкой

отмену тревоги. Однако для целей тестирования решение принимает не ответственное лицо, а зафиксированный в 1992 г. «черный ящик» алгоритма M8.

Магнитуда землетрясения 11 марта 2011 г. у тихоокеанских берегов района Тахоку превзошла ожидания сейсмологов и, по-видимому, была выше 8.9. Предварительное определение М. Неттлес и Г. Экстрема (Global CMT Project Moment Tensor Solution) дало значение $M_w=9.1$, а повторное определение Геологической службы США – $M_w=9.0$. Однако, не дожидаясь уточнений, уже сейчас можно отметить, что, в отличие от близкого по магнитуде мегавзброса 26 декабря 2004 г. в Индийском океане, очаг землетрясения 11 марта 2011 г. ограничен протяженностью 400–500 км. Такая компактность по пространству, возможно, объясняет, почему его предвестниковые признаки не были распознаны алгоритмом M8, нацеленным на магнитудный диапазон $M9.0+$, но были диагностированы перед мегаземлетрясением 2010 г. в Чили с $M=8.8$ и очагом длиной более 700 км.

В завершение следует заметить, что алгоритм M8, ориентированный на прогноз в магнитудном диапазоне $M8.5+$, в январе 2011 г. текущую тревогу в Японии не отменял. Впрочем, поскольку использование этого алгоритма для среднесрочного прогноза землетрясений из диапазонов $M9.0+$ и $M8.5+$ выходит за рамки ведущегося с 1992 г. Глобального тестирования алгоритмов M8 и MSc, результаты таких расчетов не могут рассматриваться как документированные до мегавзбросов 27 февраля 2010 г. и 11 марта 2011 г., хотя и являются еще одним подтверждением подобия процессов подготовки землетрясений разного масштаба – от умеренных ($M5.5+$) [Peresan et al., 2005] до мегавзбросов ($M9.0+$).

Выводы

К сожалению, существующие каталоги землетрясений в период, предшествовавший группе мегаземлетрясений XX столетия: Камчатка, 04 ноября 1952 г. ($M_w=9.0$), Алеутские острова, 09 марта 1957 г. ($M_w=9.1$), Чили, 22 мая 1960 г. ($M_w=9.5$), Аляска, 28 марта 1964 г. ($M_w=9.2$), недостаточно полны для ретроспективной проверки стандартной версии алгоритма M8 на примере этих событий. В то же время результаты попыток диагностики с помощью модифицированных версий алгоритма, менее требовательных к полноте каталогов, позволяют утверждать присутствие признаков комплексной предвестниковой активизации, по крайней мере, для трех из четырех мегаземлетрясений, а именно для событий 1952, 1957 и 1964 гг. Кроме того, как и в случае Суматра-Андаманского события 2004 г., последовательности землетрясений меньшей силы до и после мегаземлетрясений периода инструментальных наблюдений демонстрируют как общие признаки, так и разнообразие динамики в окрестностях эпицентра разного масштаба [Romashkova et al., 2005].

Формальное использование алгоритма M8 позволяет предположить несколько мест возможного возникновения мегаземлетрясений, ожидаемых в ближайшие годы. Однако очевидно, что приведенные примеры заблаговременной диагностики ППВ мегаземлетрясений, а также ретроспективный анализ Суматра-Андаманского мегавзброса и апелляция к ППВ по модифицированной версии алгоритма перед такими событиями в XX столетии, даже в совокупности, нельзя считать достаточными для верификации гипотезы о предсказуемости мегаземлетрясений. Для составления таблиц эффективности прогнозов землетрясений из диапазонов магнитуд $M8.5+$ и $M9.0+$, аналогичных табл. 2, потребуется тестирование метода на протяжении не одного столетия. Тем не менее прямые свидетельства возможной применимости алгоритма в более широком диапазоне магнитуд (до $M9.0+$), безусловно, важны для понимания как самой методологии, положенной в основу алгоритма M8, так и проблемы прогноза землетрясений в целом.

Литература

- 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. (Вычислительная сейсмология; Вып. 19).
- Кособоков В.Г. Прогноз землетрясений: основы, реализация, перспективы. М.: ГЕОС, 2005. 175 с. (Прогноз землетрясений и геодинамические процессы. Вычислительная сейсмология; Вып. 36, ч. I).
- Леман Э. Проверка статистических гипотез. М.: Наука, 1979. 408 с.

- Ромашкова Л.Л., Кособоков В.Г.* Параметры концентрации очагов в алгоритме среднесрочного прогноза землетрясений // Современные проблемы сейсмичности и динамики Земли. М.: Наука, 1996. С. 56–66. (Вычислительная сейсмология; Вып. 28).
- Ромашкова Л.Л., Кособоков В.Г.* Глобальные сейсмические симптомы неустойчивости литосферы перед Суматра-Андаманским мегаземлетрясением // Докл. РАН. 2007. Т. 416, № 5. С. 686–689.
- Соболев Г.А., Завьялов А.Д.* О концентрационном критерии сейсмогенных разрывов // Докл. АН СССР. 1980. Т. 252, № 1. С. 69–71.
- Allen C.R., Edwards W., Hall W.J., Knopoff L., Raleigh C.B., Savit C.H., Toksoz M.N., Turner R.H.* Predicting earthquakes: A scientific and technical evaluation – with implications for society. Panel on Earthquake Prediction of the Committee on Seismology, Assembly of Mathematical and Physical Sciences / National Research Council, U.S. National Academy of Sciences. Washington, D.C., 1976.
- Global Hypocenters Data Base CD-ROM NEIC/USGS, Denver, CO, 1989.
- Healy J.H., Kossobokov V.G., Dewey J.W.* A test to evaluate the earthquake prediction algorithm, M8 / U.S. Geol. Surv. Open-File Report 92-401. 1992. 23 p., with 6 Appendices.
- Keilis-Borok V.I., Kossobokov V.G.* Premonitory activation of seismic flow: algorithm M8 // Phys. Earth Planet. Inter. 1990. V. 61. P. 73-83.
- Kossobokov V.G.* 26 December 2004 Greatest Asian Quake: When to expect the next one? // Statement at Special Session on the Indian Ocean Disaster: risk reduction for a safer future. UN World Conference on Disaster Reduction, 18-22 Jan. 2005. Kobe, Hyogo, Japan, 2005.
- Kossobokov V.G., Turcotte D.L.* A systematic global assessment of the seismic risk // EOS Transactions 1996. V. 77, N 46. Fall Meeting AGU. Abstr. S12E-03.
- Kossobokov V.G., Keilis-Borok V.I., Smith S.W.* Localization of intermediate-term earthquake prediction // J. Geophys. Res. 1990. V. 95, N B12. P. 19763-19772.
- Kossobokov V., Romashkova L., Nekrasova A.* Targeting the next mega-earthquake // Abstracts of the Contributions of the EGU General Assembly 2008, Vienna, Austria, 13-18 April, 2008: Geophys. Res. Abstr. 2008. V. 10. (CD-ROM), EGU2008-A-07303
- Kossobokov V.G., Romashkova L.L., Nekrasova A.K.* Targeting the next mega-earthquake: the 27 February 2010 Chile case // EOS Trans. AGU. 2010. V. 91(26). Meet. Am. Suppl. Abstr.U41A-06.
- Latchman J.L., Morgan F.D., Aspinall W.P.* Temporal changes in the cumulative piecewise gradient of a variant of the Gutenberg-Richter relationship, and the imminence of extreme events // Earth Sci. Rev. 2008. V. 87. P. 94–112.
- Peresan A., Kossobokov V., Romashkova L., Panza G.F.* Intermediate-term middle-range earthquake predictions in Italy: a review // Earth Sci. Rev. 2005. V. 69 (1/2). P. 97–132.
- Romashkova L.L.* Global-scale analysis of seismic activity prior to 2004 Sumatra-Andaman mega earthquake // Tectonophysics. 2009. V. 470. P. 329–344.
- Romashkova L., Nekrasova A., Kossobokov V.* Seismic cascades in advance and after 26 December 2004 Sumatra-Andaman and other mega-earthquakes // EOS Trans. AGU. 2005. V. 86(52). Fall Meeting AGU. Suppl. Abstr. U11B-0834.

Сведения об авторе

КОСОБОКОВ Владимир Григорьевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики, Российская академия наук. 117997, г. Москва, Профсоюзная ул., д. 84/32. Тел.: +7 (495)-333-10-66. Факс: +7 (495) 333-12-55. E-mail: volodya@mitp.ru; Institut de Physique du Globe de Paris, 1, rue Jussieu - Bureau 270, 75238 Paris, Cedex 05, France. Tel.: +33-(0)1-83-95-77-63. Fax: +33-(0)83-95-74-00. E-mail: volodya@ipgp.fr

ARE MEGA EARTHQUAKES PREDICTABLE?

V.G. Kossobokov^{1,2}

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

² Institut de Physique du Globe de Paris, Paris, France

Abstract. In the course of the ongoing since 1992 Global Test of the intermediate-term middle-range earthquake forecast/predictions by the algorithms M8 and MSc place and time of each of the mega-earthquakes of 27 February 2010 in Chile and 11 March 2011 in Japan were recognized as in state of increased probability of such events in advance their occurrences. In conjunction with a retrospective analysis of seismic activity preceding the first of a series of mega earthquakes of the 21st century, i.e. 26 December 2004 in the Indian Ocean, these evidences give grounds for assuming that the algorithms of proven validated effectiveness in magnitude ranges $M7.5+$ and $M8.0+$ can be applied to predict the mega-earthquakes as well.

Keywords: earthquake, mega earthquake, forecast, prediction, algorithm, statistical hypothesis testing, random guessing, confidence level.