

УДК 550.341

**“КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
С МАГНИТУДОЙ $M_wHRV \geq 5.8$ ДЛЯ ЗАПАДА
ТИХОГО ОКЕАНА” Д. ДЖЕКСОНА – Я. КАГАНА:
НЕЗАВИСИМАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ**

В.Г. КОСОБОКОВ

Международный институт теории прогноза землетрясений
и математической геофизики Российской академии наук, Москва,
Парижский институт физики Земли, Париж, Франция

На основании анализа собранного за один год архива карт вероятностей и каталога землетрясений за тот же период, делается вывод о том, что информативность метода Джексона–Кагана “Краткосрочный прогноз землетрясений с магнитудой $M_wHRV \geq 5.8$ для запада Тихого океана” для определения пространства-времени ожидаемых сильных землетрясений довольно сомнительна. Вывод позволяет предположить, по крайней мере, неудачность выбора параметров конкретной реализации модели эпидемического самовоспроизводства землетрясений, лежащей в основе метода.

**“THE WEST PACIFIC SHORT-TERM FORECAST
OF EARTHQUAKES WITH MAGNITUDE $M_wHRV \geq 5.8$ ”
BY D. JACKSON – Y. KAGAN:
AN INDEPENDENT EVALUATION OF EFFICIENCY**

V.G. KOSSOBOKOV

International Institute of Earthquake Prediction Theory
and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow,
Institute de Physique du Globe de Paris, Paris, France

Analyzing one-year archive of the probability maps from “The West Pacific short-term forecast of earthquakes with magnitude $M_wHRV \geq 5.8$ ” and the catalog of earthquakes for the same period the conclusion is drawn that the Jackson–Kagan method’s comprehension of locating the space-time of large earthquakes is rather doubtful, while the universality of the underlying realization of the epidemic-type self exciting model is a superstition.

Введение

Еще со времен Джона Милна прогноз землетрясений рассматривается как одна из наиглавнейших задач сейсмологии. Тем более поразительно – насколько много расплывчатых высказываний сейсмологов и геофизиков расцениваются ими как прогноз землетрясений, и насколько мало систематических исследований, посвященных собственно конкретному экспериментальному прогнозу. Р.Геллер опубликовал довольно полный критический обзор [1], в котором научная ценность большинства работ, относящихся к прогнозу землетрясений, ставится под сомнение прежде всего из-за отсутствия точных определений. Очевидно, что научный прогноз землетрясений и его анализ невозможны без точных определений ожидаемого явления и правил, по которым можно однозначно сказать, осуществился прогноз или нет. Проблема прогноза допускает множество определений, неясные представления о которых порождают обилие противоречивых публикаций [2–4] и дискуссий [5]. Разночтениям способствует не вполне установившаяся терминология, в которой под прогнозом разные авторы понимают и высказывание о детерминированной возможности землетрясения [6, 7], и оценку условной интенсивности появления событий, т.е. оценку условной вероятности будущего землетрясения в данной точке [8, 9]. Наконец, согласно Г.М.Молчану [10], понятие прогноза должно включать целевую функцию. При этом термины прогноз (prediction) и прогнозирование (forecast) относятся к предсказаниям в смысле [6, 7] и в смысле [8, 9], соответственно. В настоящее время, как уже отмечалось выше, термины “предсказание”, “прогноз”, “прогнозирование” свободно используются в отношении различных определений. Теория стратегий прогноза землетрясений [10–12] дает ответ на вопрос, как использовать оценку условной интенсивности, если цели прогноза определены. Мы (в частности в этой работе) придерживаемся следующего простого и удобного определения, которое было выработано и согласовано общими усилиями специально организованной представительной Комиссии по прогнозу землетрясений Национальной Академии Наук США ([13], с.7):

“An earthquake prediction must specify the expected magnitude range, the geographical area within which it will occur, and the time interval within which it will happen with sufficient precision so that the ultimate success or failure of the prediction can readily be judged. Only by careful recording and analysis of failures as well as successes can the eventual success of the total effort be evaluated and future directions charted. Moreover, scientists should also assign a confidence level to each prediction.”

“Прогноз землетрясения должен определять ожидаемый магнитудный диапазон, географическую область, где оно произойдет, и интервал времени, когда оно может случиться, с точностью, достаточной для того, чтобы суждение об окончательном успехе или неудаче прогноза не вызывало затруднений. Только на основании тщательной записи и анализа ошибок, равно как и успехов, может быть оценен окончательный успех всего опыта и намечены дальнейшие направления. Сверх того, ученым следует также определить достоверный уровень каждого прогноза.”

Казалось бы довольно легко удовлетворить это простое определение, а за четверть столетия с момента его публикации могли бы быть предъявлены результаты – как положительные, так и отрицательные – опыта прогноза землетрясений в реальном времени. Однако даже такие эксперты в области прогноза как С.А. Федотов, Л. Сайкс, М. Висс, Ф. Эвисон и другие похоже избегают экспериментов по практической проверке предложенных ими методов. Анализ методов прогноза в настоящее время сместился в сторону теоретических дискуссий – предсказуемы или нет сейсмические события [5]. При этом реальная сейсмичность подменена ее моделями, не прошедшими этап проверки на адекватность наблюдениям, а значит ее свойства, в том числе и предвестниковые, оказались вне предмета дискуссии.

Попробуем, хотя бы отчасти, восполнить недостаток точных проверок методов прогноза, рассмотрев ведущийся вот уже более трех лет эксперимент Д. Джексона и Я. Кагана [8, 9].

Нулевая гипотеза – “сейсмическая рулетка”

Как оценить результаты прогноза? Статистические выводы о достоверности и надежности метода прогноза могут быть сделаны на основании следующего простого рассмотрения [14].

Пусть \mathcal{T} и \mathcal{S} – рассматриваемые в совокупности время и пространство; \mathcal{A}_t – часть пространства, в которой объявлена тревога в данный момент времени t ; $\tau \times \mu$ – мера на $\mathcal{T} \times \mathcal{S}$ (ограничиваясь мерой прямого произведения $\tau \times \mu$, мы резервируем общий случай меры ν с пространственно-временной зависимостью для будущих более изощренных нулевых гипотез); N задает общее число *сильных землетрясений* с магнитудой M из диапазона $M_0+ = [M_0, M_0 + \Delta M]$ в пределах $\mathcal{T} \times \mathcal{S}$, а n – число тех из них, что предсказаны алгоритмом, определяющим тревоги. Объем пространства-времени, занятый всей совокупностью тревог $\mathcal{A} = \bigcup_{\mathcal{T}} \mathcal{A}_t$, отнесенный к рассмотренному общему объему, равняется

$$p = \int_{\mathcal{A}} d(\tau \times \mu) / \int_{\mathcal{T} \times \mathcal{S}} d(\tau \times \mu).$$

Двойственные по отношению друг к другу статистические уровни значимости и доверия результатов прогноза, соответственно, равны

$$1 - B(n - 1, N, p) \text{ и } B(n - 1, N, p),$$

где B – функция кумулятивного биномиального распределения [15]. Чем ниже уровень статистической значимости и, наоборот, чем выше уровень доверия, тем значительнее отличие достигнутых результатов прогноза от результатов случайного угадывания в условиях нулевой гипотезы. В большинстве приложений для определения значимых результатов обычно используются значения уровня доверия в 95% и 99%, хотя в отдельных случаях требуется демонстрация более высоких критериев значимости.

В задачах, связанных с распределением землетрясений, естественно выбрать меру $\tau \times \mu$ следующим образом. Для времени возьмем равномерно распределенную меру τ , соответствующую случайной равновероятной повторяемости землетрясений. Для пространства положим меру μ пропорциональной пространственной плотности гипоцентров. Конкретнее, определим меру μ пространственной области, пропорциональной числу попавших в нее гипоцентров землетрясений из фиксированного каталога – например, из каталога достоверно зарегистрированных землетрясений с магнитудой от некоторого фиксированного порога и выше. Так, например, каталог землетрясений с магнитудой от 4 и выше за 1964–1984 гг., составленный NEIC, дает адекватное представление о мере μ в глобальном масштабе и используется для проверки статистической значимости глобального эксперимента по прогнозу сильнейших землетрясений мира [17, 18]. Эта естественная эмпирическая мера пространственного распределения сейсмичности может быть полезна также для оценок сейсмической опасности территорий [17, 18]. Напротив, довольно распространенное использование геометрической площади области тревоги (в км²) может привести (и приводит) к существенной переоценке значимости результатов прогноза, поскольку оно приравнивает равновеликие области высокой и низкой сейсмической активности (в частности – сейсмоопасные и асейсмичные районы).

Рецепт практического использования меры μ для подсчета части пространственно-временного объема p , занятого тревогой, крайне прост:

- Выберите эталонный каталог “землетрясений–образцов”. Количество событий внутри всей рассматриваемой территории используйте как знаменатель дроби.

- Для каждого фиксированного момента времени подсчитайте количество событий внутри совокупности текущих областей тревоги на рассматриваемой территории. Используйте его как числитель дроби.

- Осредните дробь по всему периоду прогноза. Полученное среднее значение равно p .

Этот простейший рецепт имеет изящную аналогию, которая обосновывает использование статистических методов, доступных со времен Блеза Паскаля (Blaise Pascal, 1623–1662):

Сейсмическая Рулетка. Пусть колесо рулетки разбито на сектора, число которых совпадает с числом событий в эталонном каталоге землетрясений, и каждому сектору соответствует ровно одно событие. Делайте ставки согласно имеющемуся прогнозу следующим образом:

- определите события эталонного каталога, которые попадают в область тревоги,

- поставьте по фишке на соответствующие им сектора.

- Природа вращает колесо.

Если *Сейсмическая Рулетка* не идеальна, то можно выигрывать систематически! ...если, конечно, выбран подходящий метод и стратегия прогноза.

Оценка статистической значимости и достоверности метода прогноза необходима хотя бы для того, чтобы утверждать его преимущество в сравнении со случайным угадыванием. Невысокий доверительный уровень (ниже 95%) оставляет вполне обоснованными сомнения в том, что такое преимущество есть [19]. Невысокое значение доверительного уровня может являться следствием малости выборки успехов и неудач, что характерно для большинства известных “кандидатов в предвестники” и “предвестников” [2, 4]. Действительно, наиболее полными наблюдениями, которые используются для формирования алгоритмов прогноза, продолжают оставаться каталоги землетрясений, относящиеся к периодам в десятки лет. Однако локально число известных сильных землетрясений, представляющих практический интерес для прогноза, крайне мало и очевидно не достаточно для каких бы то ни было серьезных попыток оценивания статистической значимости.

Ситуация в корне меняется, если удастся распространить проверку кандидата в алгоритмы прогноза на многие регионы. Однако даже при глобальной проверке требуется порой весьма продолжительное время для накопления достаточной статистики успехов и неудач, позволяющей отвергнуть гипотезу об их случайности. Так, например, для доказательства статистической значимости с уровнем доверия 95% предвестника “взрыв афтершоков” (“burst of aftershocks”, precursor B) [20] потребовалось его ретроспективное распространение во многие регионы мира [6] и около десяти лет перспективного применения [21]. “Взрыв афтер-

шоков” является, по-видимому, единственным предвестником простого типа, прошедшим к настоящему времени строгую проверку. Исследования по его распространению и модификации [22,23] способствовали более широкому и систематическому поиску сейсмических признаков сложной природы, который объединяет несколько простых параметров потока землетрясений. Аналогичный период времени потребовался для утверждения высокой статистической значимости прогноза сильнейших землетрясений мира по алгоритму M8 [14,16].

Теория статистических выводов гарантирует достижение сколь угодно высокого доверительного уровня (меньше 100%) любому алгоритму, имеющему сколь угодно минимальное преимущество перед случайным угадыванием. Правда, для такого достижения может потребоваться слишком продолжительное время. Отсутствие строгой проверки статистической значимости результатов порождает возможность и, как следствие, внедрение предрассудков в сейсмологическое сообщество, что не может не сказаться на общем уровне работ по прогнозу землетрясений.

Краткосрочный вероятностный прогноз Джексона–Кагана

Оценим статистическую значимость прогнозов по ежедневно обновляемым картам Джексона–Кагана “Краткосрочный прогноз землетрясений с магнитудой $M_wHRV \geq 5.8$ для запада Тихого океана” (http://scec.ess.ucla.edu/~ykagan/predictions_index.html [8,9]). Хотя, вообще говоря, эти карты не являются прогнозными, поскольку явно не определяют области ожидаемых землетрясений, существует по крайней мере два способа задать по ним область тревоги. Это можно однозначно сделать либо по превышению картированной “краткосрочной вероятности p ” фиксированного порога, либо по превышению “отношения краткосрочной и долгосрочной вероятности p/P ” порогового значения. Заметим, что согласно [10–12] следует ожидать большую эффективность прогноза при использовании отношения p/P , реализующего оптимальную стратегию для широкого класса процессов, моделирующих сейсмичность. К сожалению, Д. Джексон и Я. Каган [8,9] не делают выбора в пользу какого-либо способа определения конкретных областей тревоги, ежедневно характеризуя значениями p и p/P ячейки размера $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ на территории запада Тихого океана (см. рис. 1 на вклейке). Вопрос о временной точности “краткосрочного прогноза” также не исследован должным образом, хотя можно заведомо утверждать, что при не слишком высоких пороговых значениях часть территории запада Тихого океана находится в состоянии тревоги с момента начала эксперимента.

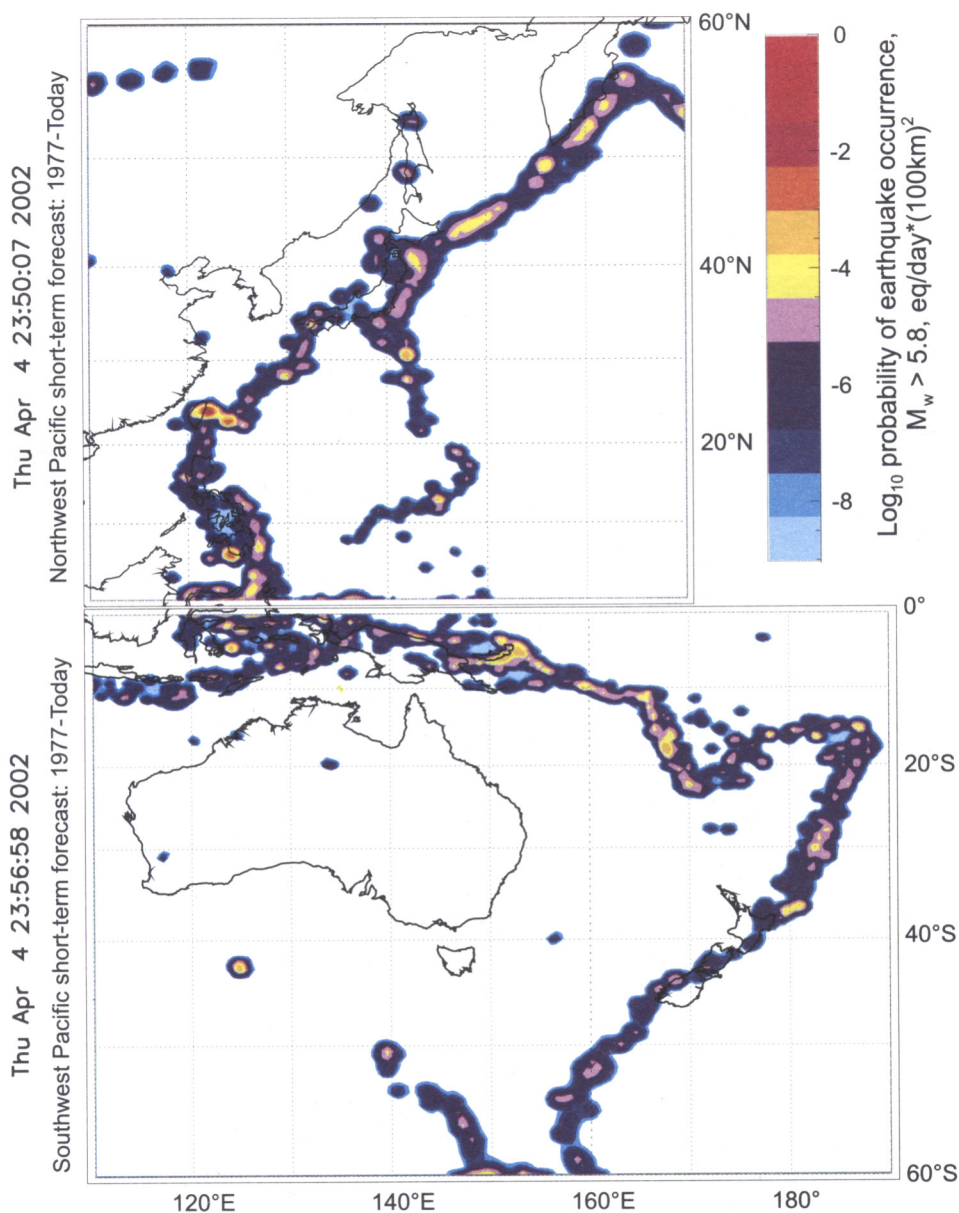


Рис. 1. Пример ежедневно обновляемой карты вероятностей возникновения коровых землетрясений с магнитудой M_w HRV ≥ 5.8 для запада Тихого океана [http://scec.ess.ucla.edu/~ykagan/predictions_index.html]

Для оценки качества прогнозов, порождаемых картами Джексона–Кагана, определим для каждого из землетрясений-целей (E) значения $p(E)$ и $p/P(E)$. Эти значения полагаются равными вероятности p и отношению вероятностей p/P в ячейке на момент этого землетрясения. Обе величины определяются накануне и в этот момент уже известны. Значения $p(E)$ и $p/P(E)$ однозначно определяют области тревоги, в которых $p \geq p(E)$ и $p/P \geq p/P(E)$. В свою очередь, однозначно определяются значения меры $\mu_p(E)$ и $\mu_{p/P}(E)$, соответствующие этим областям тревоги. Архив карт¹ позволяет составить выборки значений $\{\mu_p(E)\}$ и $\{\mu_{p/P}(E)\}$, соответствующие всем землетрясениям-целям $\{E\}$, которые произошли за время эксперимента.

Результаты прогнозов определяют пары чисел (ν, μ) , где ν – число пропусков цели, нормализованное к общему числу землетрясений в $\{E\}$, а μ – процент пространственно-временного объема, занятого тревогой.

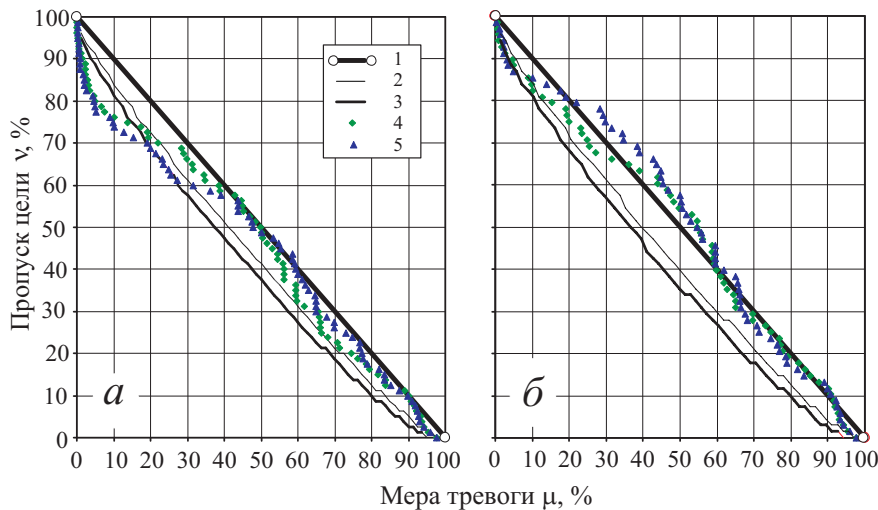


Рис. 2. Диаграммы процента пропусков цели ν как функции меры тревоги μ для всех 80 землетрясений за период 10.04.2002 – 09.04.2003 (а) и для 68 основных толчков (б): 1 – случайный прогноз, 2, 3 – граница 95% (2) и 99% (3) доверительного уровня, 4, 5 – прогноз по пороговому значению вероятности p (4) и отношения p/P (5)

На рис. 2 приведены диаграммы (ν, μ) , которые характеризуют эффективность прогнозов по превышению картированной вероятности p фиксированного порога p^* и по превышению отношения краткосроч-

¹ В апреле 2002 года мы узнали, что архив эксперимента [8, 9] отсутствует, и попросили ежедневно высылать нам по электронной почте значения p и p/P на завтра для всей территории запада Тихого океана. Благодаря любезному содействию Д. Джексона и Я. Кагана в настоящий момент архив карт p и p/P , накопившийся у нас и доступный для независимого исследования, покрывает период более одного года.

ной и долгосрочной вероятностей p/P порогового значения p/P^* в период с 10.04.2002 по 09.04.2003. В течение этого года на западе Тихого океана (в пределах карт Джексона–Кагана) зарегистрировано 80 землетрясений-целей с магнитудой M_wHRV от 5.8 и выше и с глубиной до 100 км. Точки диаграммы соответствуют результатам прогноза при разных значениях порогов p^* и p/P^* . Альтернативному случайному угадыванию соответствует диагональ, соединяющая прогноз “оптимиста” – точка (100%, 0) с прогнозом “пессимиста” – точка (0, 100%) [12]. Диагональ сопровождается двумя границами, отвечающими доверительным уровням $(1 - \alpha)$ равным 95% и 99% для выборки из независимых событий, число которых равно числу реальных землетрясений. (Конкретнее, для границы $\Gamma^\alpha = (\nu^\alpha(\mu), \mu)$ значение $\nu^\alpha(\mu) = 1 - \min\{n|B(n - 1, N, \mu) > 1 - \alpha\}/N$, где N равно общему числу землетрясений-целей, использованных при построении соответствующей (ν, μ) -диаграммы; $\alpha = 5\%$ и 1% .)

Диаграммы на рис. 2, а дают основание предположить, что прогноз по картам Джексона–Кагана значимо отличается от случайного лишь при высоких значениях порогов и, соответственно, малых значениях меры тревоги μ . При этом прогноз по пороговым значениям позволяет правильно предсказывать до трети сильных землетрясений. Ситуация меняется, если учесть, что некоторые из 80 событий зависимы: среди них, по крайней мере, 12 являются афтершоками (рис. 2, б).

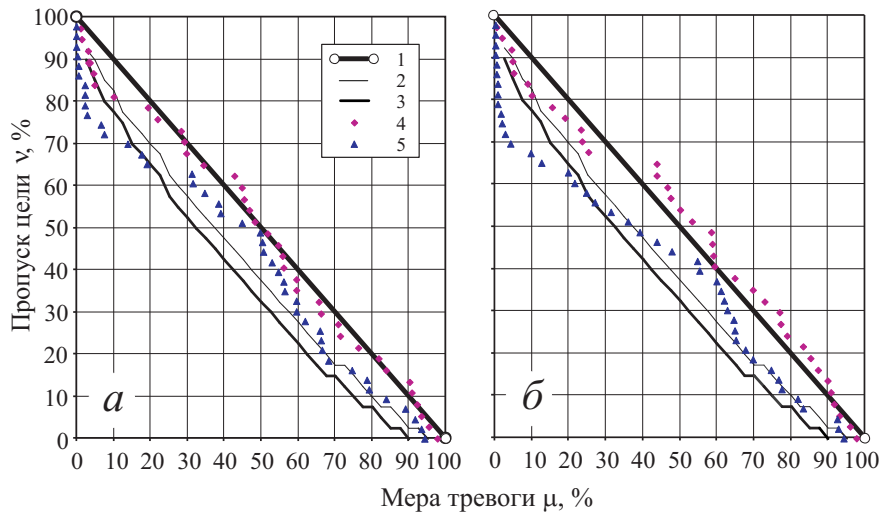


Рис. 3. Диаграммы процента пропусков цели ν как функции меры тревоги μ для двух групп землетрясений с M_wHRV до 6.1 и выше 6.1 по пороговому значению вероятности p (а) и отношения p/P (б):

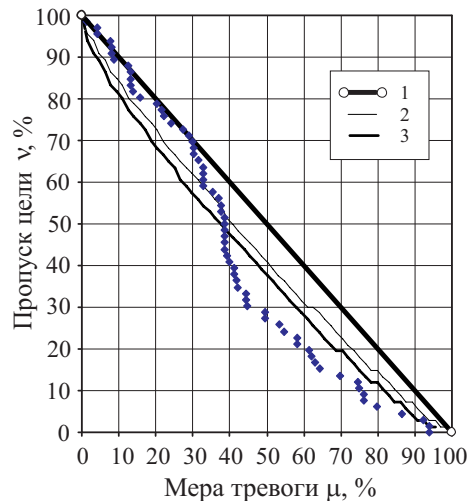
1 – случайный прогноз, 2, 3 – граница 95% (2) и 99% (3) доверительного уровня, 4, 5 – прогноз землетрясений с $M_wHRV > 6.1$ (4) и с $M_wHRV \leq 6.1$ (5)

Диаграммы на рис. 3,а и 3,б показывают, что отклонение от случайного угадывания очевидно связано с событиями меньшей силы, а прогноз землетрясений с магнитудой M_wHRV от 6.1 и выше почти неотличим от случайного. Наконец, рассмотрим ретроспективно “абсурдный прогноз” 66 землетрясений в апреле-октябре 1995 года по картам, рассчитанным на те же даты в 2002 году.

Рис. 4. Диаграммы процента пропусков цели ν как функции меры тревоги μ для “абсурдного прогноза”:

1 – случайный прогноз, 2, 3 – граница 95% (2) и 99% (3) доверительного уровня.

Прогноз за полгода 10.04.2002 – 09.10.2002 сопоставлен с датами 66 землетрясений с $M_wHRV \geq 5.8$ за полгода 10.04.2005 – 09.10.1995. Успехом считается ситуация, когда значение p (или p/P) в месте, где произошло землетрясение 1995 года, превышает порог ровно через семь лет после его возникновения (т.е. в тот же день и месяц, но 2002 года)



Приведенные на рис. 4 (ν, μ) -диаграммы отклоняются от диагонали не меньше, чем в любом из реальных прогнозов на рис. 2, и 3. Следовательно можно сделать вывод: информативность “Краткосрочного прогноза землетрясений с магнитудой $M_wHRV \geq 5.8$ для запада Тихого океана” [8, 9] для определения пространства-времени сильных землетрясений довольно сомнительна. В свою очередь, поскольку единственным дополнением к нулевой гипотезе о неоднородном распределении стабильной долгосрочной интенсивности P является конкретная реализация Джексона–Кагана модели эпидемического воспроизводства землетрясений [24], можно предположить по, крайней мере, неудачность выбора параметров модели, использованных при расчете этих карт.

Общее замечание

Многие из существующих “предвестников” и “кандидатов в предвестники” сильных землетрясений допускают алгоритмическое определение, что дает возможность их объективной верификации в экспериментальном прогнозе в реальном времени. Успех или неудача даже одного такого эксперимента проясняет представления о сейсмическом

процессе, подтверждая одни и опровергая другие гипотезы подготовки и возникновения наиболее сильных землетрясений. Только по результатам таких верификаций можно судить о прогрессе в области прогноза землетрясений.

Автор искренне благодарен Д. Джексону и Я. Кагану за реальную возможность проверки их метода оценки вероятности возникновения коровых землетрясений умеренной силы. Автор признателен Г.М. Молчану за критические замечания.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. *Geller R.J.* Earthquake prediction: A critical review // *Geophys. J. Inter.* 1997. Vol.131. P.425–450.
2. *Wyss M.* (ed). Evaluation of proposed earthquake precursors. Washington, D.C: AGU, 1991.
3. *Wyss M.* Cannot earthquakes be predicted? // *Science.* 1997. Vol.278. P.487–488.
4. *Wyss M.* Second round of evaluation of proposed earthquake precursors // *PAGEOPH.* 1997. Vol.149. P.3–16.
5. Nature Debates. http://www.nature.com/nature/debates/earthquake/equake_frame-set.html, 1999.
6. *Keilis-Borok V.I.* A worldwide test of three long-term premonitory seismicity patterns: A review // *Tectonophysics.* 1982. Vol.85. P.47–60.
7. *Kossobokov V., Shebalin P.* Earthquake prediction / Keilis-Borok V.I. and A.A. Soloviev (editors) // *Nonlinear dynamics of the lithosphere and earthquake prediction.* Heidelberg: Springer, 2003. P.141–207.
8. *Jackson D., Kagan Y.* Testable earthquake forecasts for 1999 // *Seism. Res. Lett.* 1999. Vol.70. P.393–403.
9. *Kagan Y., Jackson D.* Probabilistic forecasting of earthquakes // *Geophys. J. Inter.* 2000. Vol.143. P.438–453.
10. *Molchan G.M.* Earthquake prediction strategies: A theoretical analysis / Keilis-Borok V.I. and A.A. Soloviev (editors) // *Nonlinear dynamics of the lithosphere and earthquake prediction.* Heidelberg: Springer, 2003. P.208–237.
11. *Molchan G.M., Kagan Y.Y.* Earthquake prediction and its optimization // *J. Geophys. Res.* 1992. Vol.97. P.4823–4838.
12. *Molchan G.M.* Earthquake prediction as a decision-making problem // *PAGEOPH.* 1997. Vol.149. P.233–247.

13. *Allen C.R. (Chairman), 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). Washington, D.C: National Research Council, U.S. National Academy of Sciences. 1976.
14. *Kossobokov V.G., Keilis-Borok V.I., Romashkova L.L., Healy J.H.* Testing earthquake prediction algorithms: Statistically significant real-time prediction of the largest earthquakes in the Circum-Pacific, 1992–1997 // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1999. Vol.111, N 3–4. P.187–196.
15. *Леман Э.* Проверка статистических гипотез. М.: Наука, 1979. 408 с.
16. *Кособоков В.Г., Хили Дж.Х., Кейлис-Борок В.И., Дьюи Дж.У., Холлов А.В.* Проверка алгоритма среднесрочного прогноза землетрясений: схема теста в реальном времени и результаты ретроспекции // *ДАН СССР*. 1992. Т.325, N 1. С.46–48.
17. *Kossobokov V.G., Turcotte D.L.* A systematic global assessment of the seismic risk // *EOS Transactions, AGU*. 1996. Vol.77-S12E-03.
18. *Kossobokov V.G., Keilis-Borok V.I., Turcotte D.L., Malamud B.D.* Implications of a statistical physics approach for earthquake hazard assessment and forecasting // *PAGEOPH*. 2000. Vol.157. P.2323–2349.
19. *Kagan Y.Y.* Are earthquakes predictable? // *Geophys. J. Inter.* 1997. Vol.131. P.505–525.
20. *Keilis-Borok V.I., Knopoff L., Rotwain I.M.* Bursts of aftershocks, long-term precursors of strong earthquakes // *Nature*. 1980. Vol.283. P.259–263.
21. *Molchan G.M., Dmitrieva O.E., Rotwain I.M., Dewey J.* Statistical analysis of the results of earthquake prediction, based on bursts of aftershocks // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1990. Vol.61. P.128–139.
22. *Caputo M., Console R., Gabrielov A.M., Keilis-Borok V.I., Sidorenko T.V.* Long-term premonitory seismicity patterns in Italy // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1983. Vol.75. P.71–75.
23. *Akashah B., Kossobokov V.G.* Premonitory clustering before strong earthquakes in IranAfgan region // *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 1989. Vol.XXXI, N 122. P.159–162.
24. *Ogata Y.* Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes // *J. Amer. Stat. Assoc. Applications*. 1988. Vol.83, N 401. P.9–26.