

УДК 550.341

**ДИАГНОСТИКА ПЕРИОДОВ ПОВЫШЕННОЙ
ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ
ВУЛКАНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
В ЗОНЕ ВЕЗУВИЯ****И.М. РОТВАЙН¹, Г. Де НАТАЛЕ², И.В. КУЗНЕЦОВ¹,
А. ПЕРЕСАН³, Дж.Ф. ПАНЦА³**¹ Международный институт теории прогноза землетрясений
и математической геофизики Российской академии наук, Москва,² Обсерватория Везувия, Неаполь, Италия,³ Университет Триеста, Триест, Италия

Исследуется возможность прогноза землетрясений в зоне вулкана Везувий с помощью алгоритма КН. Этот алгоритм, созданный для диагностики периодов повышенной вероятности сильных землетрясений, применяется впервые для анализа вулканической сейсмичности. Рассматривается сейсмическая активность в зоне вулкана в период с февраля 1972 г. по октябрь 2002 г. В качестве сильных землетрясений рассматриваются события с магнитудой выше $3.0 \div 3.3$. Результаты успешного ретроспективного прогноза землетрясений такой малой магнитуды получены введением соответствующей шкалы времени. В частности, если длина временного окна, используемого в стандартной версии алгоритма КН, уменьшена в 2.5–3 раза, 90% сильнейших вулканических землетрясений происходят в диагностированные алгоритмом периоды тревог. Суммарно эти периоды занимают около 30% всего исследуемого времени. Контрольные эксперименты “Сейсмическая история” подтверждают стабильность результатов и показывают, что алгоритм может быть использован для дальнейшего мониторинга сейсмичности вперед в зоне вулкана Везувий.

**DIAGNOSIS OF TIME OF INCREASED PROBABILITY
OF VOLCANIC EARTHQUAKES OCCURENCES
AT MT. VESUVIUS ZONE****I.M. ROTWAIN¹, G.De NATALE², I.V. KUZNETSOV¹,
A. PERESAN³, G.F. PANZA³**¹ International Institute of Earthquake Prediction Theory
and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow,² Osservatorio Vesiviano, Napoli, Italy,³ Department of Earth Science, University of Trieste, Trieste, Italy

The possibility of earthquake prediction at Mt. Vesuvius by means of the algorithm CN is explored. The intermediate-term prediction algorithm CN was originally designed to identify the Times of Increased Probability for the occurrence of strong tectonic earthquakes. Here this algorithm is applied, for the first time, to the analysis of volcanic seismicity. The earthquakes recorded at Mt. Vesuvius, during the period from February 1972 to October 2002, are considered and the magnitude threshold, selecting strong events to be predicted, is varied within the range: $3.0 \div 3.3$. Satisfactory prediction results for

so small magnitudes are obtained, by retrospective analysis, when a time scaling is introduced. In particular, when the length of the time windows is reduced by a factor 2.5 – 3, with respect to the standard version of CN algorithm, more than 90% of the strong events occur within the alarm intervals occupying about 30% of the total time considered. The control experiment “Seismic History” demonstrates the stability of the obtained results and indicates that the algorithm CN can be applied to monitor the preparation of impending earthquakes with $M \geq 3.0$ at Mt. Vesuvius.

Введение

Везувий является одним из известнейших вулканов мира со времен античности и до наших дней. Сейчас в его окрестности (в радиусе порядка 10 км) проживает около 700 тысяч человек, а в Неаполе, отстоящем от кратера на 20 км, – свыше двух миллионов. Извержение Везувия может привести к большим потерям как людским, так и материальным. С произошедшего в 1944 году последнего извержения Везувий находится в стадии относительного затишья, проявляя признаки локальной вулканической сейсмичности. Землетрясения этой зоны не очень сильны, но из-за их малой глубины, не превышающей 5 км [1–3], они сами по себе могут вызвать значительный ущерб. Так, основываясь на исторических хрониках, землетрясение, разрушившее древнеримские города Помпеи и Геркулум, оценивается магнитудой $M \simeq 4$ [4]; поэтому интерес представляет прогноз землетрясений даже такой силы.

В данной работе исследовалась возможность среднесрочного прогноза сильнейших землетрясений в зоне Везувия с помощью алгоритма КН [5] на базе каталога сейсмичности Везувия, созданного станцией ОВО [4]. Этот алгоритм, сформулированный применительно к региону Калифорнии и Невады для прогноза землетрясений с $M_0 \geq 6.4$, использовался для прогноза *периодов повышенной вероятности* (ППВ) сильных землетрясений во многих тектонических регионах мира. Сильными считаются землетрясения с магнитудой $M \geq M_0$, причем магнитудный порог M_0 выбирается в каждом исследуемом регионе в соответствии с его уровнем сейсмичности.

Максимальная магнитуда инструментально зафиксированного события в зоне Везувия равна 3.6, поэтому применение алгоритма КН для прогноза таких слабых землетрясений может потребовать другой масштаб пространственно-временного окна, используемого в алгоритме. Масштабирование предвестниковой зоны относительно M_0 по методике, предложенной в [6,7], в случае Везувия невозможно, так как пространственный объем, где локализованы гипоцентры землетрясений, очень мал ($6 \times 6 \times 8 \text{ км}^3$) [3], поэтому координаты землетрясений в каталоге отсутствуют.

В работе [8] было сделано предположение, что алгоритмы среднесрочного прогноза КН и М8 [9] не нуждаются во временном масшта-

бировании. Согласно закону Гутенберга–Рихтера среднее время между землетрясениями магнитуды M пропорционально 10^{bM} , и слабые землетрясения, по сравнению с сильными, должны происходить чаще. Однако в то время как величина b в данном регионе одна и та же для разных M , предвестники определяются для областей, линейные размеры которых пропорциональны $10^{\alpha M_0}$, где α изменяется от 0.5 до 1.0 [10, 11]. Следовательно, среднее время между землетрясениями в зоне предвестников на стадии среднесрочного прогноза пропорционально $10^{(b-\alpha\nu)M_0}$, где ν – фрактальная размерность облаков эпицентров в данном регионе [6, 7, 12, 13]. Для тектонических землетрясений существующие оценки величин b (≈ 1), α ($0,5 \div 1,0$) и ν ($1,2 \div 2,0$) не противоречат гипотезе, что величина $(b - \alpha\nu)$ близка к нулю. Следовательно, землетрясения с разными магнитудами на стадии среднесрочного прогноза могут иметь один и тот же период повторяемости в зоне подготовки.

Заметим, однако, что если величина $(b - \alpha\nu) \neq 0$, то масштабирование времени может оказаться необходимым. Определить величину ν для зоны Везувия невозможно, поскольку координаты землетрясений в каталоге отсутствуют. Нет возможности определить и период повторяемости сильнейших землетрясений в этой зоне, поскольку длительность инструментальных наблюдений для такой оценки недостаточна. Поэтому вопрос о необходимости перемасштабирования временных окон, используемых для подсчета прогностических функционалов в алгоритме КН и длительности ППВ, здесь решается эмпирически в зависимости от результатов прогноза землетрясений той или иной магнитуды.

Алгоритм КН

Алгоритм КН для среднесрочного прогноза сильных землетрясений достаточно широко описан, в том числе в работах [5, 14], поэтому приведем лишь основные сведения о нем. После исключения афтершоков, число которых служит в дальнейшем мерой пространственно-временного группирования землетрясений, в алгоритме используются следующие характеристики потока основных толчков исследуемого региона:

- уровень сейсмической активности,
- изменение этого уровня во времени,
- уровень группируемости землетрясений в пространстве и во времени.

Эти характеристики представлены в виде девяти функционалов, величины которых вычисляются в скользящем временном окне определенной длительности. Формальное описание этих функционалов и их параметры приведены в работах [5, 14]. Функционалы нормируются от-

носителем сейсмической активности региона и магнитуды прогнозируемых землетрясений, что позволяет применять алгоритм в регионах с разным уровнем сейсмической активности. Нормировка функционалов осуществляется выбором магнитудных порогов по событиям заранее фиксированного и достаточно большого *периода выбора порогов* (TSP – Threshold Setting Period). Обычно TSP включает в себя весь период времени, для которого известен каталог. Также по этому периоду определяются пороги для дискретизации величин каждого из девяти функционалов на *большие, средние и малые* величины. Каждый из функционалов подсчитывается во временном окне $[t - \Delta_i, t]$ ($i = 1, 2, \dots, 9$) и дискретизируется. В зависимости от типа функционала Δ_i может составлять 1, 2 или 3 года. Такой набор из девяти дискретизированных функционалов и составляет описание каждого момента времени t , взятого с шагом два месяца для всего исследуемого периода.

Ретроспективный анализ сейсмичности региона Калифорнии и Невады за период с 1932 по 1983 г. с помощью методов распознавания образов [5, 15] позволил найти два ряда комбинаций дискретизированных функционалов. Один из них – комбинации, характерные для периодов, предшествующих сильным землетрясениям (*D-признаки*), а второй – для спокойных периодов, далеких по времени от сильных землетрясений (*N-признаки*). Эти комбинации и были использованы в дальнейшем для всех исследуемых регионов, включая зону Везувия. ППВ объявляется сроком на 1 год в тот момент времени t , для которого выполнены два следующие условия:

- $\Delta(t) = (p_D - p_N) \geq 5$, где p_D, p_N – соответственно, число D и N признаков, встретившихся в момент t ;
- $\sigma(t) \equiv \Sigma_i (10^{M_i}) / 10^{M_0} < 4.9$, где M_0 – магнитудный порог для определения сильных землетрясений, M_i – магнитуда i -го землетрясения, которое произошло в 3-х летний интервал до момента t в данном регионе.

Заметим, что ППВ могут перекрывать и продлевать друг друга. ППВ, в пределах которого не произошло сильное землетрясение, является ложной тревогой, а сильное землетрясение, возникшее вне ППВ, является пропуском цели.

Алгоритм КН был применен в 22 регионах мира со следующими общими результатами: ППВ в среднем занимали около 30% исследованного периода и предшествовали 80% сильным землетрясениям [16–23].

Согласно методике, предложенной в [24], качество прогноза может быть оценено величинами $\eta = 1 - n/N$ и $\tau = t_\Sigma/T$, где n/N – отношение числа предсказанных сильных землетрясений к общему числу сильных землетрясений, а t_Σ/T – отношение общего периода времени, занятого

ППВ, к длительности всего исследуемого периода. Качество прогноза тем лучше, чем меньше величина $(\eta + \tau)$, при $(\eta + \tau) = 1$ прогноз является случайным. Дополнительной мерой качества является отношение числа ложных тревог к общему числу тревог $\varkappa = k/K$. Для 22 регионов мира величина $(\eta + \tau)$ для алгоритма КН варьировалось от 0.2 до 0.8, а величина \varkappa – от 0 до 0.67.

Анализ данных

Каталог землетрясений зоны Везувия базируется на данных станции OVO, установленной в 1972 году обсерваторией Везувия. Используемая в этой работе версия каталога покрывает период 23.02.1972 – 12.10.2002 и содержит 9478 событий. Каждое событие характеризуется временем его возникновения и магнитудой, устанавливаемой по длительности коды. Координаты гипоцентра в каталоге отсутствуют. Каталог достаточно однороден для всего периода времени, так как оборудование и методика определения параметров землетрясений на станции OVO не менялись с момента ее установки. Более детальная информация о каталоге OVO и общих характеристиках сейсмичности этого региона изложена в работе [4].

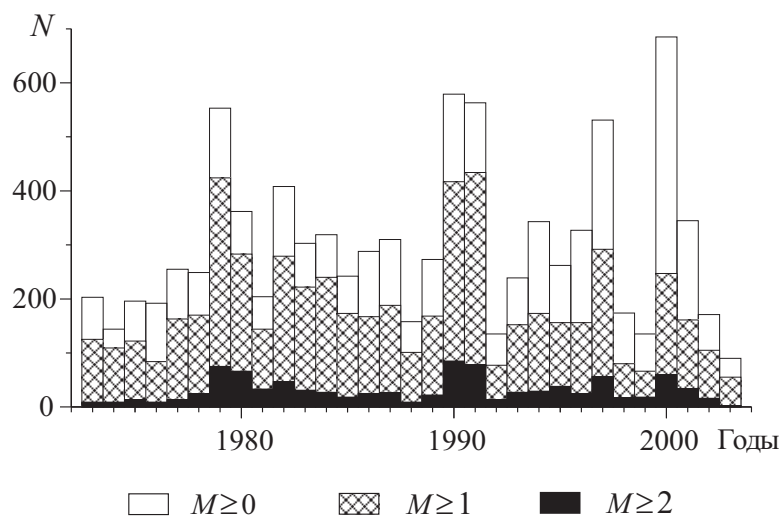


Рис. 1. Гистограмма числа землетрясений N как функции времени для разных интервалов магнитуд

Распределение числа землетрясений каталога по времени в разных интервалах магнитуд приведено на рис. 1.

График повторяемости для этого региона характеризуется большой величиной угла наклона b (рис. 2), что типично для вулканических зон [4, 25]. Величины b , практически, всегда больше в вулканических зонах, чем в тектонических [26], что объясняется высоким уровнем напряжения, типичным для вулканических роев [27].

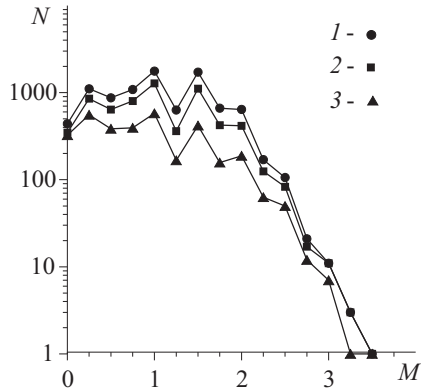


Рис. 2. Зависимость числа землетрясений N от магнитуды M в разные периоды времени:

1 - 01.1972–10.2002, 2 - 01.1982–10.2002, 3 - 01.1992–10.2002

Величина b в разные периоды уменьшается во времени от 1.8 до 1.0 [4, 25]. Исследования и лабораторные эксперименты показывают, что величина b в вулканических зонах может существенно уменьшаться в результате слияния мелких трещин в большие [28, 29]. Существует гипотеза, что извержение вулкана происходит в тот момент, когда большая трещина достигает вулканической камеры [30]. В рамках таких представлений предвестником извержения вулкана может являться усиливающаяся сейсмичность, которая сопровождается увеличением магнитуд и уменьшением величины b .

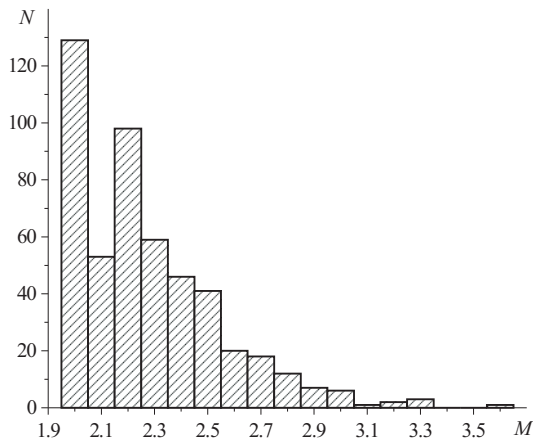


Рис. 3. Гистограмма числа основных толчков N для разных магнитудных интервалов

Для определения величины M_0 для прогнозируемых землетрясений использована гистограмма числа основных толчков с $M \geq 2.0$ (рис. 3).

Виден локальный минимум гистограммы при $M = 3.1$, что позволяет определить интервал M_0 от 3.0 до 3.3. Список основных толчков с магнитудой $M \geq 3.0$ приведен в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Основные толчки каталога OVO за период 23.02.1972–12.10.2002 с $M \geq 3.0$

N	Дата	Время, ч. мин.	Магнитуда, M
1	29.01.1989	20:00	3.0
2	19.03.1989	19:22	3.3
3	21.10.1989	04:04	3.0
4	04.03.1990	23:39	3.0
5	08.07.1990	03:49	3.1
6	10.09.1990	23:58	3.3
7	02.08.1995	04:07	3.2
8	16.09.1995	11:03	3.2
9	25.04.1996	22:55	3.3
10	05.11.1997	11:28	3.0
11	09.10.1999	05:41	3.6
12	22. 01.2000	03:34	3.0
13	27.09.2000	07:01	3.0

Распределение моментов возникновения этих событий (рис. 4) демонстрирует их аномальную группируемость во времени. Этот эффект подробно обсуждается в работах [25, 31, 32].

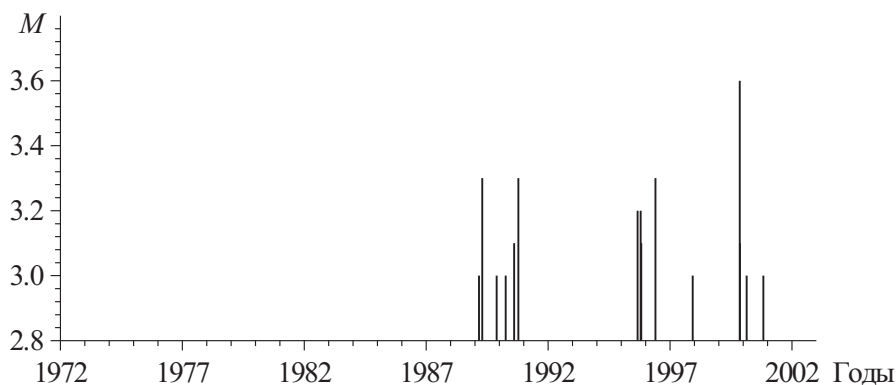


Рис.4. Моменты возникновения сильных землетрясений с магнитудой $M \geq 3.0$ за период с 01.1972 г. по 10.2002 г.

Высота вертикальных линий соответствует магнитуде события

Параметры алгоритма КН для прогноза вулканической сейсмичности

Применение алгоритма КН к зоне с низкой сейсмической активностью требует некоторых изменений в параметрах алгоритма по сравнению с их стандартными величинами.

1. Нижний порог по магнитуде для афтершоков, согласно стандартному определению, должен удовлетворять условию $M_a = (M_0 - 3) > M_c$, где M_c – порог представительности каталога. Для каталога ОВО это условие не выполнимо, так как M_c оценивается как 1.8 – 2.0 [4,25], в то время как величина $(M_0 - 3)$ близка к нулю. Как правило, в таких случаях рассматриваются все афтершоки без ограничения по магнитуде.

2. При объявлении ППВ не будет использоваться условие $\sigma(t) < 4.9$, введенное в алгоритме КН для уменьшения длительности тревоги после сильного события, поскольку сильнейшие вулканические землетрясения имеют тенденцию к гораздо большей группировке во времени, чем тектонические.

3. Вводится коэффициент ϑ масштабирования длительности интервалов времени, используемых в алгоритме. Иными словами, все функционалы вычисляются в скользящих временных окнах, длительность которых уменьшена в ϑ раз по сравнению с их стандартной для алгоритма КН величиной. Кроме того, ППВ объявляется на время $12/\vartheta$ месяцев, вместо одного года.

Период TSP для нормировки и дискретизации функционалов в основном варианте взят с 1972 по 2002 год.

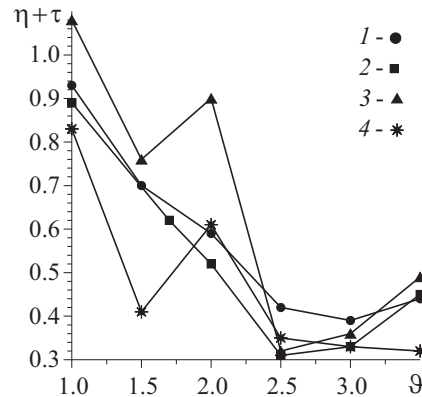
Результаты

Чтобы выяснить влияние величины ϑ на результаты диагностики ППВ, алгоритм КН применялся последовательно для прогноза землетрясений с $M_0 = 3.0, 3.1, 3.2$ и 3.3 , при этом для каждого значения магнитуды M_0 величина ϑ менялась от 1 до 3.5 с шагом 0.5.

На рис. 5 приведена зависимость качества прогноза для разных M_0 от величины коэффициента ϑ . Видно, что наилучшие результаты достигаются при $\vartheta = 2.5 \div 3$ для всех рассмотренных значений магнитуды M_0 . Более того, результаты близки к случайным, если $\vartheta = 1$, т.е. когда масштабирование времени не вводится. Это подтверждает гипотезу о необходимости временного масштабирования при прогнозе землетрясений малой магнитуды.

Рис. 5. Зависимость качества прогноза ($\eta + \tau$) от коэффициента масштабирования длительности интервалов времени ϑ для разных значений магнитуды M_0 :

1 - $M_0 = 3.0$, 2 - $M_0 = 3.1$, 3 - $M_0 = 3.2$; 4 - $M_0 = 3.3$



Наилучшие результаты прогноза для разных M_0 приведены на рис. 6 и в табл. 2. Они показывают, что все сильные землетрясения, за исключением события 05.11.1997 с $M = 3.0$, попадают в периоды тревог. Общая длительность тревог меняется от 31% до 39% от общего периода времени. Качество прогнозов стабильно и мало зависит от M_0 , более того, величины ($\eta + \tau$) и \varkappa близки к аналогичным величинам для тектонических регионов.

ТАБЛИЦА 2. Наилучшие результаты прогноза сильных землетрясений с $M \geq M_0$

M_0	ϑ	n	N	η	τ	$\eta + \tau$	\varkappa
3.0	3	12	13	0.08	0.31	0.39	0.37
3.1	2.5	7	7	0.0	0.31	0.31	0.50
3.2	2.5	6	6	0.0	0.32	0.32	0.53
3.3	3	4	4	0.0	0.33	0.33	0.64

Примечание: ϑ – коэффициент масштабирования времени; n – число предсказанных основных толчков с $M \geq M_0$; N – общее число этих основных толчков; $\eta = 1 - n/N$ – статистика пропусков цели; $\tau = \tau_{\Sigma}/T$ – статистка времени тревоги; $\varkappa = k/K$ – статистика ложных тревог, где k – число ложных тревог, K – общее число тревог

Надежность и стабильность результатов подтверждается также экспериментом “Сейсмическая история” [15], который состоит в следующем. Конец периода нормировки и дискретизации функционалов TSP сдвигается последовательно шаг за шагом к началу каталога так, чтобы его длительность уменьшалась. При этом прогнозируются лишь сильные землетрясения, произошедшие после конца TSP, что является, по сути, прогнозом вперед. Этим проверяется стабильность результатов в зависимости от продолжительности TSP.

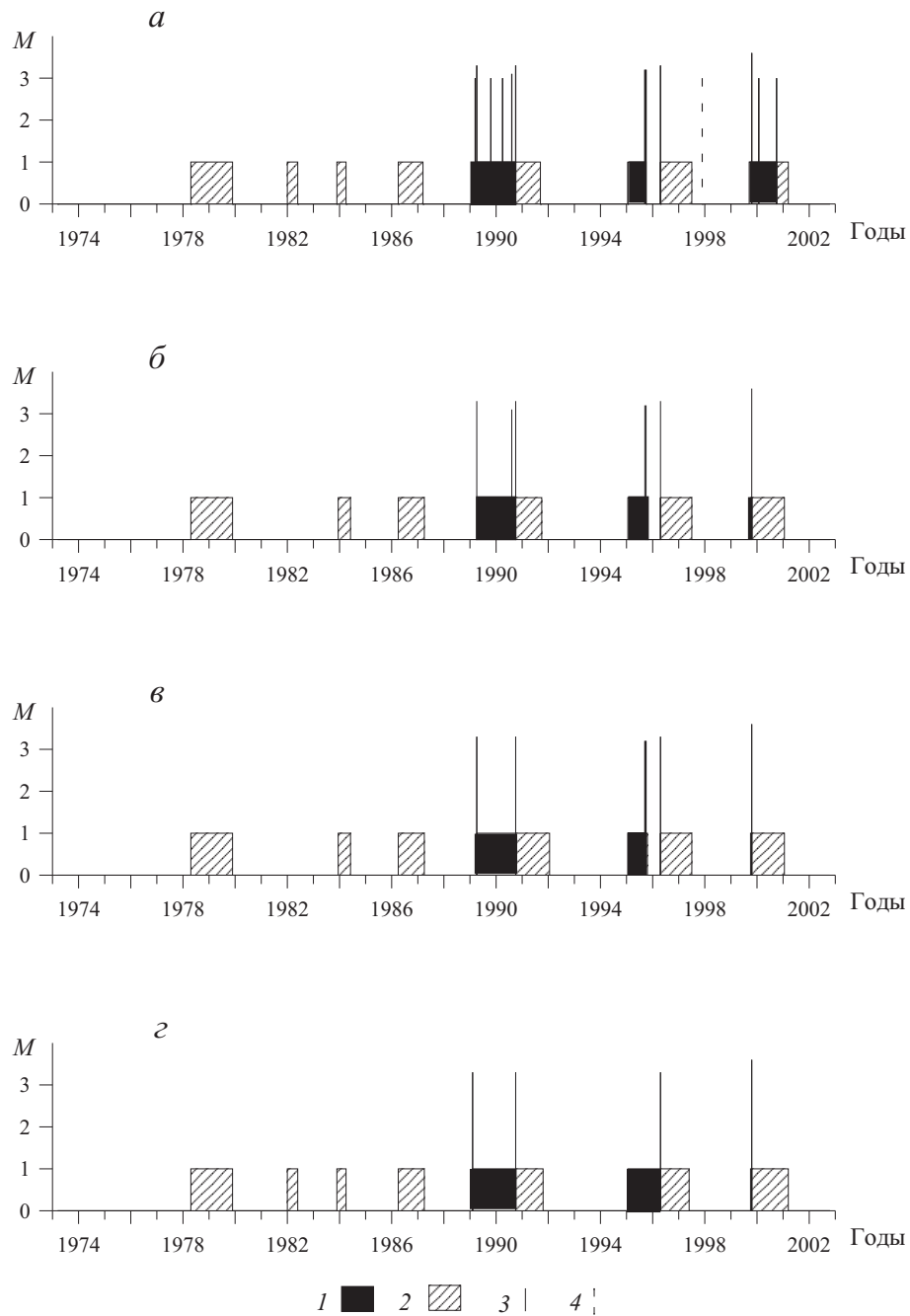


Рис. 6. ППВ и сильные землетрясения для различных значений магнитуды M_0 при максимальном качестве прогноза:

$a - M_0 = 3.0$ ($\vartheta = 3.0$), $б - M_0 = 3.1$ ($\vartheta = 2.5$), $в - M_0 = 3.2$ ($\vartheta = 2.5$), $г - M_0 = 3.3$ ($\vartheta = 3.0$); 1 - ППВ, предшествующие сильным землетрясениям, 2 - ложные тревоги, 3 - предсказанные моменты сильных землетрясений, 4 - пропуски цели

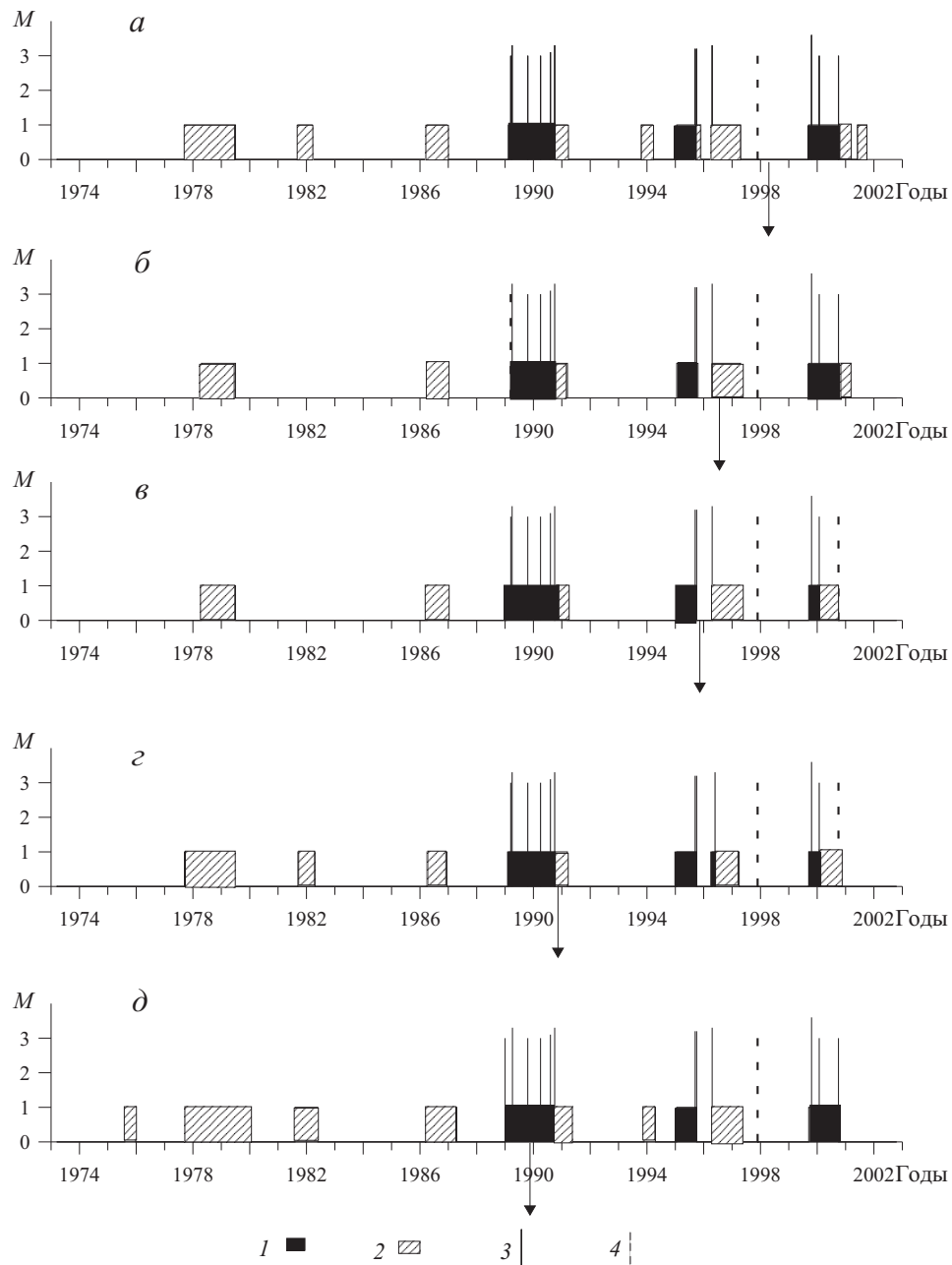


Рис. 7. ППВ и сильные землетрясения для различных периодов TSP в эксперименте "Сейсмическая история":

a – 22.02.1998 г., *б* – 24.06.1996 г., *в* – 24.10.1995 г., *г* – 24.10.1990 г., *д* – 24.10.1989 г. Начало каждого из TSP совпадает с началом каталога OVO (23.02.1972). Стрелкой обозначены моменты окончания TSP. Обозначения 1–4 как на рис. 6

Такой эксперимент был проведен для максимального числа сильных событий, т.е. при $M_0 = 3.0$ и $\vartheta = 3$. Обозначив через N_P – число прогнозируемых основных толчков с $M \geq 3$ в период после окончания TSP, а через n_P – число предсказанных среди них, оценим результаты такого прогноза “вперед” (рис. 7 и табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Результаты эксперимента “Сейсмическая история”,
 $M_0 = 3, \vartheta = 3$

Конец TSP	η	τ	$\eta + \tau$	\varkappa	n_P/N_P
01.01.2000	0.08	0.31	0.39	0.37	2/2
22.02.1998	0.08	0.31	0.39	0.43	3/3
24.06.1996	0.15	0.24	0.4	0.35	3/4
24.10.1995	0.15	0.26	0.41	0.31	3/5
24.10.1990	0.15	0.27	0.43	0.35	5/7
24.10.1989	0.08	0.35	0.43	0.37	9/10

Примечание: N_P – общее число основных толчков с $M \geq 3$ после окончания TSP, n_P – число предсказанных землетрясений с $M \geq 3$ в тот же период времени. Остальные обозначения как в табл. 2

Качество прогноза по мере сокращения TSP снижается незначительно и $(\eta + \tau)$ меняется от 0.39 до 0.49. Более того, даже когда период TSP сокращается до 24.10.1989 и содержит информацию лишь о трех землетрясениях с $M \geq 3.0$, этого оказывается достаточно для прогноза последующих 9 из 10 сильных землетрясений.

Выводы

Приведенные выше результаты прогноза в зоне Везувия дают основание полагать, что алгоритм КН применим для прогноза сильнейших землетрясений не только в тектонических регионах, но и в вулканических зонах. Следовательно, процессы подготовки сильных тектонических и вулканических землетрясений, с точки зрения их предвестников, во многом аналогичны. Это предположение, естественно, необходимо подтвердить результатами прогноза в других вулканических зонах и результатами текущего прогноза в зоне Везувия.

Другой, не менее важный, вывод состоит в том, что для успешного прогноза в регионах с низким уровнем сейсмической активности необходимо вводить масштабирование времени, сокращая длительность временных окон, используемых в алгоритме КН. Необходима дальнейшая проверка прогноза для слабосейсмичных тектонических регионов с использованием масштабирования времени. Она может помочь найти зависимость масштабирования от магнитуды.

Естественно, результаты прогноза землетрясений с $M \geq 3$ для зоны Везувия не могут дать ответ на вопрос – является ли возникновение

землетрясений такой или большей силы предвестником извержения вулкана, хотя и существуют удачные случаи прогноза извержений вулканов на основе характерных изменений величины b в законе Гутенберга–Рихтера [33–36].

Работа выполнена при поддержке Международного центра теоретической физики им. Абдус Салама, Группы Национальной Итальянской Вулканологии, Международного научно-технического центра (проект 1538 МНТЦ) и SfP НАТО (проект 972266).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Vilardo G., De Natale G., Milano G., Coppa U.* The seismicity of Mt. Vesuvius // *Tectonophysics*. 1996. Vol.261. P.127–138.
2. *De Natale G., Capuano P., Troise C., Zollo A.* Seismicity at Somma-Vesuvius and its implications for the 3D tomography of the volcano // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Special Issue Vesuvius. 1998. Vol.82, N 1–4. P.175–197.
3. *De Natale G., Petrazzuoli S., Troise C., Pingue F., Capuano P.* Internal stress field at Mount Vesuvius: a model for background seismicity at a central volcano // *J. Geophys. Res.* 2000. Vol.105, N B7. P.16207–16214.
4. *De Natale G., Kuznetsov I., Kronrod T., Peresan A., Sarao A., Troise C., Panza G.* Three decades of seismic activity at Mt. Vesuvius: 1972–1999 // *PAGEOPH*. 2004. Vol.161. P.123–144.
5. *Keilis-Borok V. I., Rotwain I.M.* Diagnosis of time of increased probability of strong earthquakes in different region on the world: algorithm CN // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1990. Vol.61. P.57–73.
6. *Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г., Мажкенов С.А.* О подобии в пространственном распределении сейсмичности // *Теория и алгоритмы интерпретации геофизических данных*. М.: Наука, 1989. С.28–40. (Вычисл. сейсмология; Вып.22).
7. *Kossobokov V. G., Mazhkenov S.A.* On similarity in the spatial distribution of seismicity // *Computational Seismology and Geodynamics*. 1994. Vol.1. P.6–15.
8. *Keilis-Borok V.I.* Intermediate-term earthquake prediction // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1996. Vol.93. P.3748–3755.
9. *Keilis-Borok V.I., Kossobokov V.G.* Premonitory activation of earthquake flow: algorithm M8 // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1990. Vol.61, N 1–2. P.73–83.
10. *Kanamori H., Anderson D.L.* Theoretical basis of some empirical relations in seismology // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1975. Vol.65, N 5. P.1073–1095.
11. *Båth M.* Earthquake magnitude-recent research and current trends // *Earth-Science Review*. 1981. Vol.17. P.315–398.
12. *Kagan Y.Y., Knopoff L.* Spatial distribution of earthquakes: the two-point correlation function // *J. Roy. Astron. Soc.* 1980. Vol.62. P.303–320.
13. *Kagan Y.Y.* Fractal dimension of brittle fracture // *J. Nonlinear Sci.* 1991. Vol.1. P.1–16.
14. *Keilis-Borok V.I., Knopoff L., Rotwain I.M., Allen C.* Intermediate-term prediction of occurrence times of strong earthquakes // *Nature*. 1989. Vol.335, N 6192. P.690–694.
15. *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.

16. *Arieh E., Rotwain I., Steinberg J., Vorobieva I., Abramovich F.* Diagnosis of time of increased probability of strong earthquakes in the Jordan-Dead sea rift zone // *Tectonophysics*. 1992. Vol.202. P.351–359.
17. *Бхатия С., Воробьева И.А., Гаур В.К., Левшина Т.А., Субеди Л., Чалам С.* Диагностика периодов повышенной вероятности сильных землетрясений Гималайского сейсмического пояса с помощью алгоритма КН // *Компьютерный анализ геофизических полей*. М.: Наука, 1990. С.58–68. (Вычисл. сейсмология; Вып.23).
18. *De Becker M., Dmitrieva O., Keilis-Borok V.I., Rotwain I.M.* Premonitory seismicity pattern in a platform region (Ardennes, Rhenish and Brabant massifs, lower Rhine graben) // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1989. Vol.57. P.260–265.
19. *Girardin N., Rotwain I.* Diagnosis of the time of increased probability of earthquakes of magnitude 5.5 or greater in the Lesser Antillean arc // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1994. Vol.83. P.57–65.
20. *Keilis-Borok V.I., Kuznetsov I.V., Panza G.F., Rotwain I.M., Costa G.* On intermediate-term earthquake prediction in Central Italy // *PAGEOPH.* 1990. Vol.134, N 1. P.79–92.
21. *Novikova O.V., Vorobieva I.A., Enescu D., Radulian M., Kuznetsov I., Panza G.F.* Prediction of the strong earthquakes in Vrancea, Romania // *PAGEOPH.* 1996. Vol.147, N 1. P.99–118.
22. *Panza G.F., Orozova-Stanishkova I., Costa G., Rotwain I., Vaccari F.* Intermediate-term earthquake prediction and seismic zoning in Northern Italy. Second Workshop on Non-Linear Dynamics and Earthquake prediction. International Centre for Theoretical Physics. Trieste, Italy. 1993.
23. *Peresan A., Costa G., Panza G.F.* Seismotectonic model and CN earthquake prediction in Italy // *PAGEOPH.* 1999. Vol.154. P.281–306.
24. *Molchan G.M.* Earthquake prediction as a decision-making problem // *PAGEOPH.* 1997. Vol.149. P.233–247.
25. *Zollo A., Marzocchi W., Capuano P., Lomax A., Iannaccone G.* Space and time behavior of seismic activity at Mt. Vesuvius volcano, Southern Italy // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 2002. Vol.92, N 2. P.625–640.
26. *Minakami T.* Seismology of volcanoes in Japan // *Physical Volcanology Developments in Solid Earth Geophysics*. Amsterdam: Elsevier. 1974. Vol.6. P.1–27.
27. *Scholz C.H.* Microfractures, aftershocks and seismicity // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1968. Vol.58. P.1117–1130.
28. *Meredith P.G., Main I.G., Jones C.* Temporal variations in seismicity during quasi-static and dynamic rock failure // *Tectonophysics*. 1990. Vol.175. P.249–268.
29. *Wyss M., Shimazaki K., Wiemer S.* Mapping active magma chambers by *b*-value beneath the off-Ito volcano // *Japan J. Res.* 1997. Vol.102. P.20413–20422.
30. *Kilburn C.R.J., Voight B.* Slow rock fracture as eruption precursor at Soufriere Hills volcano, Montserrat // *Geophys. Res. Lett.* 1998. Vol.19. P.3665–3668.
31. *De Natale G., Zollo A.* Statistical analysis and clustering features of the Phlegrean fields earthquake sequence (May 1983 – May 1984) // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1986. Vol.76. P.801–814.
32. *Godano C., Alonzo M.L., Virardo G.* Multifractal approach to time clustering of earthquakes. Application to Mt. Vesuvius seismicity // *PAGEOPH.* 1997. Vol.149. P.375–390.
33. *Malone S.D., Boyko C., Weaver C.S.* Seismic precursors to the Mount St. Helens eruption in 1981 and 1982 // *Science*. 1983. Vol.221. P.1376–1378.
34. *Gresta S., Patane G.* Change in *b* value before the Etnean eruption of March-August 1983 // *PAGEOPH.* 1983. Vol.121. P.903–912.
35. *Vinciguerra S.* Damage mechanics preceding the September – October 1989 flank eruption at Mount Etna volcano inferred by seismic scaling exponent // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2002. Vol.113. P.391–397.
36. *Hill D.P., Pollitz F., Newhall Ch.* Earthquake-volcano interactions // *Physics Today*. 2002. Vol.53, N 11. P.41–54.

Подписи к рисункам.

Рис. 1. Гистограмма числа землетрясений N как функции времени для разных интервалов магнитуд

Рис. 2. Зависимость числа землетрясений N от магнитуды M в разные периоды времени:

1 – 01.1972–10.2002, 2 – 01.1982–10.2002, 3 – 01.1992–10.2002

Рис. 3. Гистограмма числа основных толчков N для разных магнитудных интервалов

Рис. 4. Моменты возникновения сильных землетрясений с $M \geq 3.0$ за период 01.1972–10.2002.

Высота вертикальных линий соответствует магнитуде события

Рис. 5. Зависимость качества прогноза ($\eta + \tau$) от коэффициента масштабирования длительности интервалов времени ϑ для разных значений M_0 :

1 – $M_0 = 3.0$, 2 – $M_0 = 3.1$, 3 – $M_0 = 3.2$; 4 – $M_0 = 3.3$

Рис. 6. ППВ и сильные землетрясения при максимальном качестве прогноза для разных значений M_0 :

$a - M_0 = 3.0$ ($\vartheta = 3.0$), $b - M_0 = 3.1$ ($\vartheta = 2.5$), $c - M_0 = 3.2$ ($\vartheta = 2.5$), $d - M_0 = 3.3$ ($\vartheta = 3.0$).

1 – ППВ, предшествующие сильным землетрясениям, 2 – ложные тревоги, 3 – предсказанные моменты сильных землетрясений, 4 – пропуски цели

Рис. 7. ППВ и сильные землетрясения для разных периодов TSP в эксперименте “Сейсмическая история”:

$a - 22.02.1998$ г., $b - 24.06.1996$ г., $c - 24.10.1995$ г., $d - 24.10.1990$ г., $e - 24.10.1989$ г.

Начало каждого из TSP совпадает с началом каталога OVO (23.02.1972), стрелкой обозначены моменты окончания TSP. Обозначения 1–4 как на рис. 6