

УДК 550.341

**ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ УТОЧНЕНИЕ
СРЕДНЕСРОЧНОГО ПРОГНОЗА НА ПРИМЕРЕ
ДВУХ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
ЮГО-ВОСТОЧНОГО СРЕДИЗЕМНОМОРЬЯ**

О.В. Новикова, П.Н. Шебалин, В.И. Кейлис-Борок

Международный институт теории прогноза землетрясений
и математической геофизики Российской академии наук, Москва

Большинство алгоритмов прогноза землетрясений основаны на различных сейсмических предвестниках. Одними из наиболее распространенных, значимость которых подтверждена прогнозом вперед, являются среднесрочные предвестники, которые можно наблюдать в потоке землетрясений в течение нескольких лет перед сильным землетрясением. Соответственно алгоритмы, основанные на таких предвестниках, идентифицируют периоды тревоги на годы вперед. Серии, состоящие из трех сейсмических предвестников и обеспечивающие "второе приближение" для такого рода тревог, были обнаружены перед пятью сильнейшими землетрясениями Южной Калифорнии. Они обеспечивают значительное сокращение времени тревоги. Эти предвестники наблюдались затем на независимых данных, которые не использовались при их определении. Осуществлена попытка применить их без изменения параметров к двум сильнейшим землетрясениям юго-востока Средиземноморья: Nuweiba (1995 г., $M = 7.1$) и Кипрского (1996 г., $M = 6.8$). Получен хороший результат прогноза в ретроспекции с длительностью тревог, соответственно, 180 и 170 дней перед данными землетрясениями. Еще одна тревога наблюдалась за три дня до землетрясения с магнитудой 6.1 за 2.5 года до землетрясения Nuweiba, которая в соответствии с правилами алгоритма будет считаться ложной.

**A SECOND APPROXIMATION TO
INTERMEDIATE-TERM EARTHQUAKE PREDICTION:
TWO CASE HISTORIES FOR SOUTHEASTERN
MEDITERRANEAN**

O.V. Novikova, P.N. Shebalin, V.I. Keilis-Borok

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

Many earthquake prediction algorithms are based on premonitory seismicity patterns. Relatively better validated by advance prediction are the intermediate-term patterns that emerge within years before a strong earthquake. Accordingly, these algorithms identify the years-long periods of alarm, where strong earthquake has to be expected. Triplets of patterns providing the second approximation to such alarms, have been recently found before

5 strong earthquakes of S. California. They provide for drastic reduction of the duration of alarms. Being found in retrospect these patterns should be validated on independent data, not used for their determination. We apply these patterns without any changes to two recent strongest earthquakes in the south-eastern Mediterranean region: Nuweiba (1995, $M = 7.1$) and Cyprus (1996, $M = 6.8$) earthquakes. Such application is possible, since definition of patterns is self-adapting to the level of seismicity. Using the same numeric thresholds and the same prediction algorithm as in California, we obtain good retrospective prediction for both earthquakes with the lead time 180 and 170 days. One more alarm was followed within three days by an earthquake with $M=6.1$, 2.5 years before Nuweiba earthquake. In prediction targeted at stronger earthquakes this would be a false alarm.

Введение

Исследование предвестников землетрясений имеет две главные цели – прогноз землетрясений и понимание процессов динамики литосферы. Некоторые хорошо известные сейсмические предвестники (сложившийся термин в англо-язычной литературе – “premonitory seismicity patterns” – PSP) легли в основу алгоритмов среднесрочного прогноза землетрясений. Эти предвестники возникают, как правило, за несколько лет до сильного землетрясения [1–3], при этом линейный размер области, в которой они определены, примерно в 10 раз больше размера очага будущего землетрясения. В то же время, литосфера – это комплексная динамическая система, прогноз процессов которой является сложной задачей. По-видимому, единственный способ более точного прогноза таких систем – последовательное уточнение прогноза от долгосрочного и среднесрочного к краткосрочному с постепенным сужением пространственно-временной области тревоги [2, 4]. Именно подобным методом китайским ученым удалось предсказать землетрясение 1976 года [5].

Первое удачное уточнение среднесрочного прогноза – “Сценарий Мендосино” [6, 7], являющийся следующей аппроксимацией алгоритма M8 [8] и выявляющий внутри пространственной области тревоги M8 те ее части, в которых наблюдается относительное временное затишье. Алгоритм M8, вместе со своей второй аппроксимацией MSc, в реальном тесте прогноза сильнейших землетрясений Тихоокеанского пояса показал высокую статистическую значимость данного прогноза [2]. Алгоритм MSc позволяет сократить линейный размер области тревоги до трех линейных размеров очага будущего землетрясения.

Другая попытка уточнения среднесрочного прогноза основана на предвестнике SR (Seismic reversal), представляющем собой локальную активизацию сейсмически менее активных областей на фоне затишья областей более активных. Алгоритм, основанный на этом предвестнике, использует события достаточно малой магнитуды, соответствующие каталоги существуют для ограниченного числа сейсмически активных областей [3, 9, 10].

Дальнейший поиск более краткосрочных сейсмологических предвестников продвигался по двум взаимосвязанным направлениям: поиск предвестников на моделях сейсмических процессов и попытка использования известных уже предвестников в меньших пространственно-временных областях. Так, на модели встречных каскадов [11] был обнаружен PSP Аккорд, описывающий одновременную активизацию на различных разломах [12]. Впоследствии этот предвестник наблюдался в реальной сейсмичности Южной Калифорнии [13]. Этот же предвестник удалось воспроизвести там же в меньших пространственно-временных областях за несколько месяцев до сильных землетрясений [14]. Другой предвестник, ROC, также обнаруженный на модели встречных каскадов, наблюдался в реальной сейсмичности на Малых Антильских островах [15] и в Южной Калифорнии [14]. Предвестник ROC также является краткосрочным, он возникает за несколько недель или месяцев до сильного землетрясения; по-видимому, это первый краткосрочный сейсмический предвестник, который удалось обнаружить на реальных данных.

В работе [14] рассмотрены серии из трех сейсмических предвестников, один из которых является пространственно-временным уточнением сейсмологического предвестника, отражающего рост активности, а два других – Accord и ROC – являются краткосрочными. Соответствующий алгоритм прогноза дал для юго-востока Калифорнии очень обнадеживающий ретроспективный результат: все пять сильных землетрясений, произошедших в рассматриваемой области, предсказываются, время тревоги – от 20 дней до 7 месяцев, ложные тревоги отсутствуют. Этот результат несомненно требует проверки путем реального прогноза вперед. Вместе с тем, существует и другой способ проверки действенности алгоритма и, тем самым, реальности входящих в него предвестников – он состоит в использовании алгоритма в другом регионе без дополнительного уточнения параметров. Для данного алгоритма это возможно благодаря тому, что входящие в него предвестники сформулированы [14] таким образом, что параметры настраиваются автоматически на уровень сейсмической активности.

Именно такой подход использован в данной работе. Алгоритм применен без изменения значений свободных параметров для ретроспективного прогноза двух сильнейших землетрясений юго-восточного Средиземноморья: Nuweiba (Aquaba) (1995 г., $M=7.1$) и Кипрского (1996 г., $M=6.8$). Оба землетрясения предсказываются со временем тревоги, соответственно, 190 и 125 дней. Как и в работе [14], рассматриваются пятилетние интервалы времени перед сильными землетрясениями (проблема выделения этих интервалов, т.е. среднесрочного прогноза, остается за рамками данной работы).

Другой целью работы является изучение устойчивости результатов к изменению положения и размеров рассматриваемой области.

Рассматриваемые предвестники и общая схема анализа описаны в разд.1. В разд.2 сформулирован алгоритм прогноза и приведены результаты его применения в Южной Калифорнии по работе [14]. В разд.3 алгоритм ретроспективно применяется на юго-востоке Средиземноморья со значениями свободных параметров, зафиксированных в работе [14]. В разд.4 описаны результаты исследования устойчивости алгоритма к изменению размеров и расположения рассматриваемой области.

1. Серия из трех предвестников, уточняющих среднесрочный прогноз; определения

Каталог. В качестве исходных данных используется каталог землетрясений $(t_j, g_j, m_j), j = 1, 2$, где t_j – время возникновения землетрясения, $g_j = (\varphi_j, \lambda_j)$ – координаты эпицентра, m_j – магнитуда. Везде в дальнейшем рассматривается каталог только основных толчков. Афтершоки выделены стандартным оконным методом [16]; параметры для выделения афтершоков, приведенные в табл.1, взяты из работы [17].

ТАБЛИЦА 1. Пороги для выделения афтершоков

Магнитуда основного толчка	Временное окно, дни	Радиус пространств. окна, км
0–2.5	6	20
2.5–3	11	23
3–3.5	22	26
3.5–4	42	30
4–4.5	83	35
4.5–5	155	40
5–5.5	290	47
5.5–6	615	54
6–6.5	790	61
6.5–9	915	70

Афтершоки выделены стандартным оконным методом [16]; параметры для выделения афтершоков, приведенные в табл.1, взяты из работы [17].

В работе по Южной Калифорнии [14] использовался каталог SCSN, готовящийся в Калифорнийском технологическом институте, (г.Пасадена) и находящийся в открытом доступе сети Интернет [18]; для юго-востока Средиземноморья – каталог землетрясений Института геофизики Израиля, г.Холон.

Общая схема анализа. Целью прогноза являются сильные землетрясения с магнитудой M . Анализ состоит из трех частей:

1. *Функционалы.* На основе каталога основных толчков для каждого момента времени t подсчитываются функционалы $F_k(t), k = 1, 2, 3$, количественно отражающие то или иное явление, наблюдаемое в сейсмичности перед сильным землетрясением.

2. *Сейсмические предвестники.* Возникновение предвестника определяется в момент превышения значения функционала над заданным порогом: $F_k(t) \geq C_k$.

3. *Тревога (TIP)*. Если возникает определенная комбинация предвестников, например, появление всех трех предвестников в любой последовательности с разницей по времени не более заданной, то в момент возникновения такой комбинации объявляется тревога на период времени τ . Поскольку в прямом смысле тревога может не объявляться (например, в случае ретроспективного прогноза), то интервал тревоги более точно принято называть периодом повышенной вероятности возникновения сильного землетрясения (TIP – Time of increased probability of a strong earthquake) [1,2]. Конкретный алгоритм выделения TIP, используемый в данной работе, описан в разд.2. В дальнейшем мы все же будем пользоваться термином ”тревога”, подразумевая каждый раз TIP.

Если сильное землетрясение возникает в интервале TIP, это считается успешным прогнозом, в противном случае – пропуском цели. Интервал TIP, в котором не произошло сильное землетрясение, называется ложной тревогой. В случае реального прогноза вперед возможны также текущие тревоги.

Корреляция на больших расстояниях. Одной из особенностей сейсмичности является корреляция в возникновении землетрясений на расстояниях, намного превышающих размер очага. Такая корреляция может проявляться по-разному: одновременным изменением сейсмической активности в больших областях [19]; миграцией землетрясений вдоль зон разломов [5,20,21]; попеременной активизацией на больших расстояниях [22] и даже на удаленных тектонических плитах [23]; глобальной корреляцией сейсмичности и различных геофизических явлений, например, с Чандлеровскими колебаниями, вариациями магнитного поля, скоростью вращения Земли [22–24]. Наиболее ярким примером корреляции сейсмичности на больших расстояниях является недавнее землетрясение Landers (Калифорния) (16.10.1992, $M = 7.6$), после которого очевидное увеличение сейсмической активности наблюдалось на расстояниях более тысячи километров, т.е. на порядок превышающих размер очага [25].

В последнее время многие авторы обращают внимание на возрастание радиуса корреляции перед экстремальными событиями в сложных динамических системах [26–29]. Возрастание дальности корреляции отмечалось и перед сильными землетрясениями. Прозоров отмечал, что так называемые ”удаленные афтершоки” [30], возникающие сразу после сильного землетрясения на больших расстояниях от его эпицентра, указывают место будущего сильного землетрясения. Успешный прогноз китайскими учеными сильного землетрясения Хайченг в Китае 1976 года, который проводился в четыре последовательно уточняющих этапа, на

своем первом, долгосрочном этапе был основан на экстраполяции миграции сейсмичности на расстояния порядка тысячи километров. В среднесрочном прогнозе предвестники, возникающие, как правило, за несколько лет до сильного землетрясения, формируются в областях с линейным размером, примерно в 10 раз превышающим размер очага готовящегося землетрясения [31]; эта оценка подтверждается успешным прогнозом вперед [7, 32]. В масштабе десятилетий этот размер может быть еще больше. Например, Пресс и Аллен [22] отмечают, что землетрясения с магнитудой $M = 6$ в Паркфилде (Калифорния) предваряются ростом сейсмической активности Большого Бассейна и/или Калифорнийского залива. Такие дальние взаимодействия объясняются микрофлуктуациями в движении тектонических плит [22] или взаимодействием литосферных блоков [33, 34]. Различные модели сейсмичности также объясняют дальние взаимодействия [25, 35–40].

На основе анализа синтетического каталога, полученного в модели встречных каскадов [11, 12, 41], был предложен количественный способ оценки радиуса корреляции сейсмичности. Этот способ основан на подсчете количества областей, в которых одновременно меняется уровень сейсмической активности; соответствующий предвестник, получивший название Accord, обнаружен затем в реальной сейсмичности Калифорнии перед сильнейшими землетрясениями региона [13]. Другая попытка анализа дальней корреляции для поиска предвестников землетрясений была предпринята в регионе Малых Антильских островов [15]. Было обнаружено, что перед сильными землетрясениями в регионе возникают пары близких по времени и удаленных по расстоянию землетрясений средней силы. Соответствующий предвестник получил название ROC (Range of correlation). По-видимому, предвестник ROC является первым обнаруженным краткосрочным сейсмическим предвестником. Отметим также, что предвестник Accord в данной работе, так же как и в работе [14], используется в качестве краткосрочного предвестника. Это стало возможным, благодаря рассмотрению меньших, по сравнению с работой [13], пространственно-временных областей.

Увеличение радиуса корреляции: предвестник ROC. Рассмотрим пары основных толчков в скользящем временном окне $(t - T_R, t)$. Обозначим через $R_{ij} = \|g_i, g_j\|$ – расстояние между эпицентрами с номерами i и j . Предвестник ROC отражает почти одновременное ($|t_i - t_j| \leq T_R$) возникновение землетрясений на больших расстояниях и определяется функционалом

$$F_R(t) \equiv R(t),$$

где $R(t)$ – число пар основных толчков с $R_{ij} \geq \underline{R}$.

Порог \underline{R} определяется формулой, примерно соответствующей линейному размеру очага землетрясения с магнитудой M :

$$\underline{R} = 0.03 \cdot 10^{0.5M}. \quad (1)$$

Аналогичная нормировка стандартно используется в работах по среднесрочному прогнозу землетрясений [1, 2]. Коэффициенты в формуле (1) в точности совпадают с аналогичными коэффициентами в работе [32].

Нижний порог по магнитуде \underline{m} определяется из распределения магнитуд основных толчков в интервале $(t_f - 5 \text{ лет}, t_f - 1 \text{ год})$, где t_f – момент сильного землетрясения. Используется стандартное условие $n(\underline{m}) = n^*$, где $n(\underline{m})$ – среднегодовое число землетрясений с $m \geq \underline{m}$, а n^* – свободный параметр. Отметим, что аналогичное условие использовано для определения и других параметров (см. ниже). Это позволяет использовать алгоритм в областях с разной сейсмической активностью без изменения значения свободных параметров.

Отметим, что указанное выше определение предвестника ROC является более устойчивым по сравнению с определением, введенным в работе [15], поскольку в настоящей статье этот предвестник фиксируется несколькими парами близких по времени и удаленных по расстоянию событий, тогда как в [15] было достаточно одной такой пары.

Увеличение радиуса корреляции: предвестник Accord. Предвестник Accord [12, 13] отражает практически одновременное возрастание сейсмической активности в нескольких областях, отсюда – это название.

Рассматриваемая область разбивается на несколько подобластей, в каждой из которых оценивается сейсмическая активность как функция времени. Мерой активности в данном случае является число основных толчков $N(t)$ в скользящем временном окне. Длина временного окна T_A (меньше одного месяца) существенно меньше, чем в других алгоритмах прогноза (годы), где подобная мера также используется [1, 2].

Предвестник Accord определяется функционалом

$$F_A(t) \equiv A(t),$$

где $A(t)$ – число подобластей, в которых $N(t) \geq c$.

В данном случае рассматриваемое временное окно настолько мало, что появление даже одного события в нем является достаточно редким. Поэтому используется значение $c = 1$.

Нижний порог по магнитуде \underline{m} определяется так же, как и для функционала $R(t)$ (см. выше, разд. "Увеличение радиуса корреляции ...").

Момент появления предвестника Assord определяется из условия $F_A(t) \geq C_A$. Порог C_A не является свободным параметром. Дело в том, что количество подобластей k для каждой рассматриваемой области может быть различным. Таким образом, значение C_A следует нормализовать на число подобластей. Используется следующий способ нормализации: пусть p – вероятность того, что $N(t) \geq c$ в каждой из областей (в целях упрощения мы предполагаем, что эта вероятность одинакова во всех подобластях), соответственно, $q = 1 - p$ – вероятность того, что $N(t) < c$. Тогда порог C_A определяется как $Q_A\%$ -ный квантиль биномиального распределения

$$P(A, k) = \sum_{j=0}^A C_j^k p^j q^{k-j}. \quad (2)$$

Величина $P(A, k)$ в предположении, что p не зависит от подобласти, является вероятностью того, что $N(t) \geq c$ в A или более подобластях. Для определения параметра C_A мы используем 99%-ный квантиль ($Q_A = 99\%$).

В работе [14] было рассмотрено несколько вариантов разбиения на подобласти. В основном варианте оно проводилось неформально, с учетом карты разломов и карты распределения основных толчков с магнитудой $M \geq 2.5$. Каждая из подобластей, размером в среднем порядка 30×50 км. и ориентированная вдоль разломов, включала сегмент активного разлома. Границы подобластей проводились таким образом, чтобы минимизировать пересечение облаков эпицентров. В другом варианте использовалось формальное разбиение. Была рассмотрена сетка прямоугольников 50×30 км, ориентированных вдоль основной системы разломов. Поскольку результат, полученный на основе формального разбиения на подобласти, мало отличался от основного результата, использующего детальную схему разломов, в данной работе мы используем именно такой формальный подход.

Возрастание сейсмической активности: предвестник U . В основе определения предвестника U используется функционал

$$F_U(t_j) \equiv U(t_j, n) = 1/(t_j - t_{j-n+1}), \quad j = n, n+1, \dots$$

В знаменателе этого функционала – длина интервала между n последовательными событиями (напомним, что рассматриваются только основные толчки); функционал подсчитывается только в моменты времени событий t_j . Предвестник U является одним из нескольких PSP, отражающих рост сейсмической активности. Нестандартным является подсчет времени между заданным числом последовательных событий, а не

наоборот – числа событий в заданном интервале времени. Такой подход в исследованиях по прогнозу землетрясений предложен впервые в работе [42].

Предвестник U определяется условием:

$$U(t_j, n) \geq C_U.$$

2. Предвестники ROC, Accord и U перед сильными землетрясениями юго-востока Калифорнии

В работе [14] рассмотрены сильные землетрясения юго-востока Калифорнии. Эта территория включает южные отроги разлома San Andreas от разлома Garlock (исключая сам разлом) до Калифорнийского залива, а также более восточные сейсмичные районы от разлома Imperial Valley на север, включая области землетрясений Landers (1992 г.) и Hector Mine (1999 г.) (рис. 1).

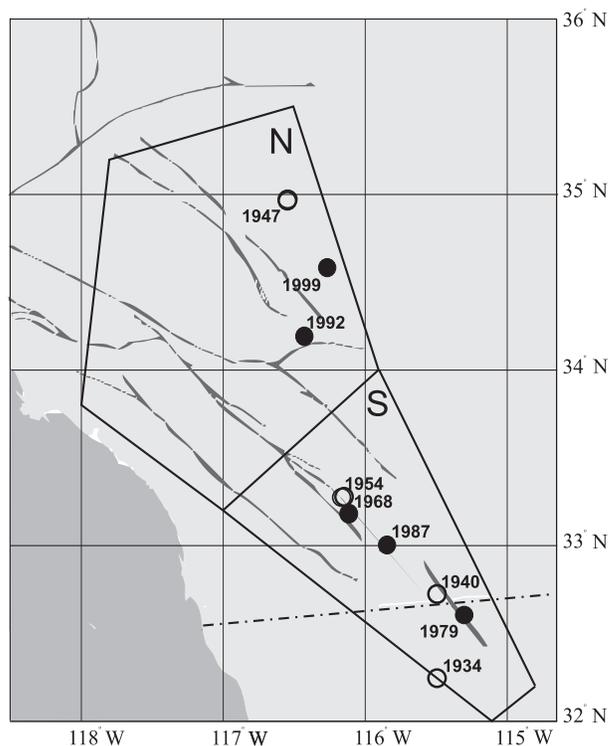


Рис. 1. Исследуемая территория и сильные землетрясения юго-востока Калифорнии
Темные кружки – предсказываемые землетрясения (1960–1999 гг.) с $M \geq 6.4$, светлые кружки – остальные известные сильные землетрясения. Для ретроспективного прогноза землетрясений с $M \geq 7$ и выше рассмотрена вся область (S + N), для остальных землетрясений – только южная часть (S)

С 1960 года в данном регионе произошло пять сильных землетрясений с магнитудой $M \geq 6.3$. Для анализа предвестников были рассмотрены 5-летние интервалы, заканчивающиеся моментами сильных землетрясений. Размеры области и интервалы времени выбирались, исходя из характерных размеров и времени тревог среднесрочного прогноза [1, 2]. Три из пяти рассмотренных сильных землетрясений (1968 г., 1979 г. и 1987 г.) произошли в южной части всей анализируемой области, их магнитуда не превышала 7.0 (табл. 2). Для этих землетрясений была рассмотрена только южная часть всей области.

ТАБЛИЦА 2. Сильные землетрясения юго-востока Калифорнии

Название землетрясения	Дата	Координаты		Магнитуда	
		Широта $^{\circ}$, N	Долгота $^{\circ}$, W	M_L (SCSN)	M_S (PDE)
Borrego Mountain	09.04.1968	33.19	116.12	6.5	–
Imperial Valley	15.10.1979	32.61	115.31	6.4	6.9
Superstition Hills	24.11.1987	33.01	115.85	6.6	6.6
Landers	28.06.1992	34.20	116.43	7.3	7.6
Hector Mine	16.10.1999	34.59	116.27	7.1	7.4

Предполагается, что предвестники ROC, Accord и U в дальнейшем будут использоваться в качестве следующей аппроксимации среднесрочного прогноза, и рассматриваемая область и интервал времени для этих предвестников, таким образом, будут в дальнейшем определяться, исходя из результатов среднесрочного прогноза. Однако такой подход в работе [14] и в данной статье был оставлен пока за рамками исследования с тем, чтобы лучше проанализировать самостоятельные возможности этих предвестников. Отметим лишь, что одной из целей этой работы является исследование устойчивости результатов при изменении анализируемой пространственной области.

В качестве рабочего алгоритма на основе трех предвестников в работе [14] принято следующее правило. Пусть в момент t_U возник предвестник U , т.е. $F_U(t_U) > C_U$. Тревога объявляется, если в интервале $(t_U - \tau_u, t_U + \tau_U)$, где τ_U и τ_u – максимальный и минимальный периоды времени тревоги, объявляемой предвестником U , возникли оба предвестника ROC и Accord. Естественно, тревога объявляется в момент появления последнего из трех предвестников, при этом их последовательность не важна. Так как каждый из предвестников проявляется в течение конечного интервала времени, то указанное условие также может выполняться в течение конечного интервала, и длительность тревоги суммарно может оказываться больше τ . После сильного землетрясения тревога прерывается.

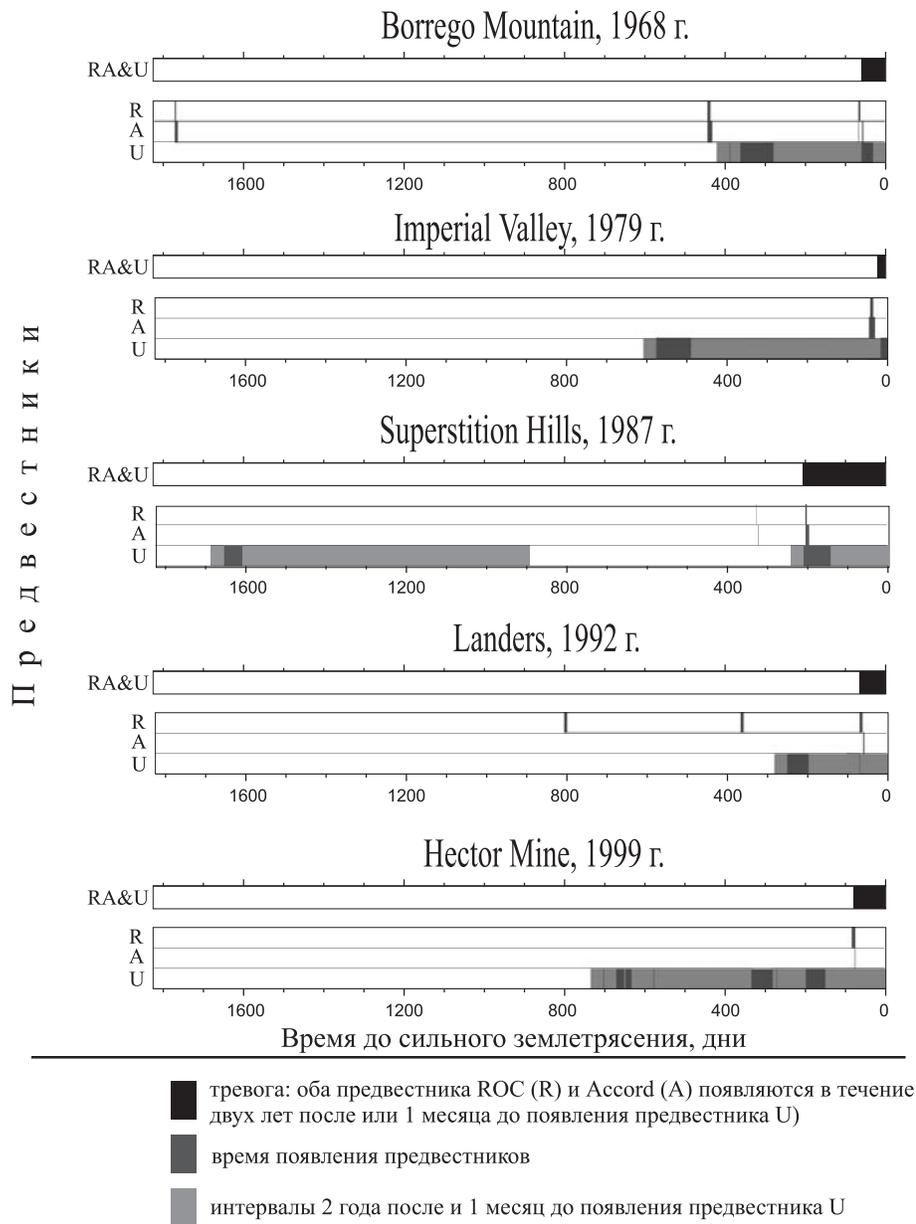


Рис. 2. Результаты ретроспективного прогноза в Южной Калифорнии по [14]

На рис. 2 представлены результаты ретроспективного прогноза по этому алгоритму со значениями его свободных параметров, приведенными в табл. 3, для пяти рассматриваемых землетрясений юго-востока

Калифорнии [14]. Видно, что все пять землетрясений успешно ретроспективно предсказаны без ложных тревог, время тревоги при этом составляет от 20 до 200 дней.

ТАБЛИЦА 3. Значения свободных параметров алгоритма

Предвестник	n^* , годы ⁻¹	θ_R , дни	C_R	θ_A , дни	c	Q_A , %	n	C_U , годы ⁻¹
ROC	20(40)	10	5	—	—	—	—	—
Accord	20(40)	—	—	15	1	99	—	—
U	20	—	—	—	—	—	15	2

Примечание. Значения n^* в скобках соответствуют области (N+S) на рис. 1.

В табл. 4 даны значения зависимых параметров, входящих в определения, которые приведены на с.191–194, но вычисляемые автоматически по значениям свободных параметров и исходным данным. Значения функционалов, используемых для определения трех рассматриваемых предвестников, приведены на рис. 3.

ТАБЛИЦА 4. Значения вычисляемых параметров алгоритма для Южной Калифорнии

Предвестник	Параметр	Предсказываемое землетрясение				
		1968г.	1979г.	1987г.	1992г.	1999г.
ROC	\underline{m}	2.5	3.0	2.9	2.9	3.0
	\underline{R}	47	47	47	95	95
Accord	\underline{m}	2.5	3.0	2.9	2.9	3.0
	C_A	4	4	4	6	6
U	\underline{m}	2.5	3.0	2.9	3.2	3.3

Примечание. Значения параметров автоматически определены на интервале ($t_f - 5$ лет, $t_f - 1$ год), где t_f – момент сильного землетрясения.

Предвестник U , по-видимому, имеет тенденцию проявляться в интервале от 0 до 2 лет до сильного землетрясения, поэтому для независимых тестов было выбрано значение параметра $\tau_U = 2$ года. Другое значение, $\tau_u = 30$ дней, выбрано так, чтобы скомпенсировать относительно консервативность предвестника U по сравнению с ROC и Accord (характерный интервал времени формирования предвестника U примерно на порядок больше, чем для предвестников ROC и Accord). Время тревоги для четырех из пяти землетрясений составило менее трех месяцев, максимальное время тревоги – 200 дней. Исходя из этого было принято значение длительности общего периода тревоги $\tau = 240$ дней, объявляемого тремя предвестниками.

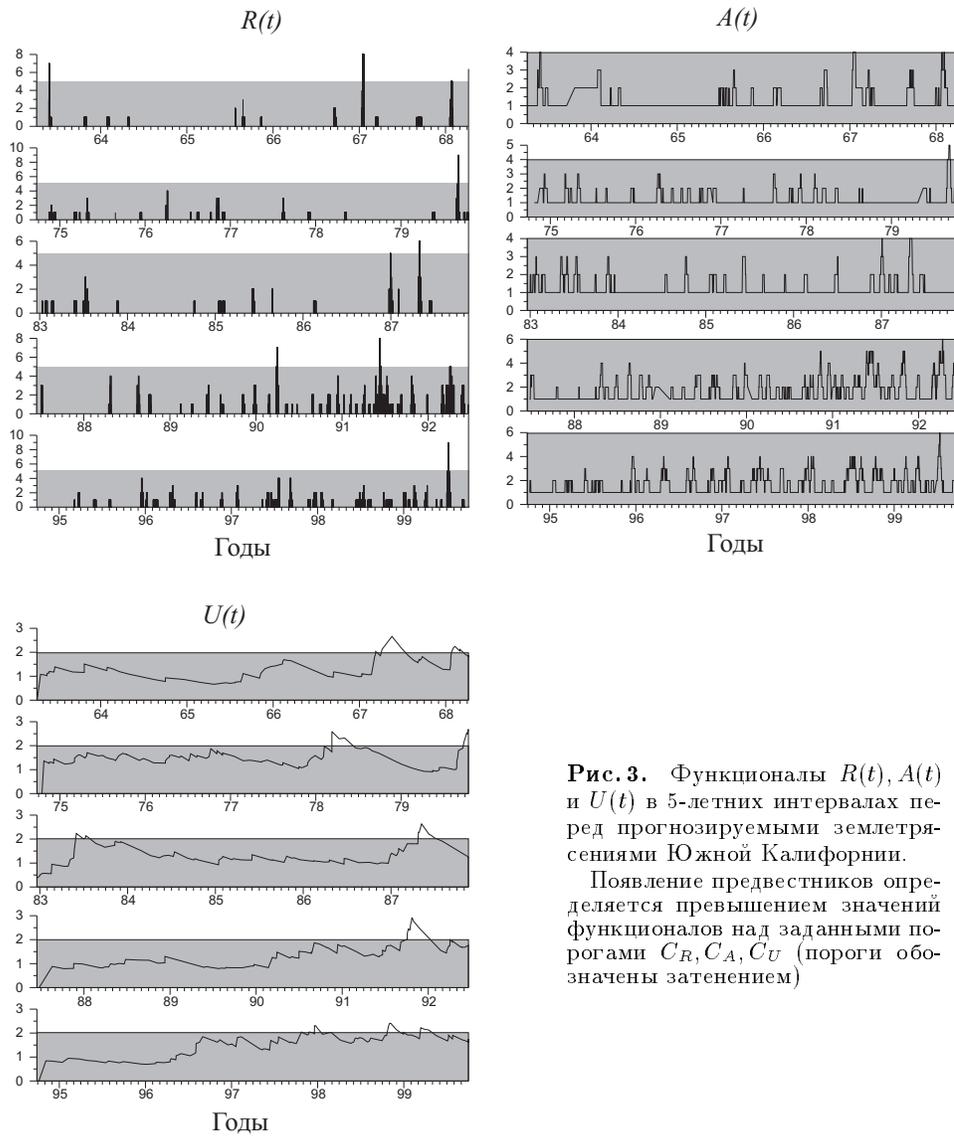


Рис. 3. Функционалы $R(t)$, $A(t)$ и $U(t)$ в 5-летних интервалах перед прогнозируемыми землетрясениями Южной Калифорнии.

Появление предвестников определяется превышением значений функционалов над заданными пороговыми значениями C_R, C_A, C_U (пороги обозначены затенением)

3. Ретроспективный прогноз двух сильнейших землетрясений юго-востока Средиземноморья: прямой перенос алгоритма

В данной работе описанные выше предвестники, а также основанный на них алгоритм, исследованы в применении к двум сильнейшим землетрясениям юго-востока Средиземноморья: Nuweiba (Aquaba) (1995 г.,

$M = 7.1$) и Кипрского (1996 г., $M = 6.8$). Также, как и в работе [14], за рамками исследования остается среднесрочный этап прогноза землетрясений, и рассмотрены 5-летние интервалы перед этими землетрясениями. Все значения свободных параметров приняты такими же, как для Южной Калифорнии (см. табл. 3). Естественно, что значения вычисляемых параметров изменились (табл. 5). При вычислении параметра C_A , определяемого как квантиль распределения $P(A, k)$ по формуле (2), в число подобластей k не включались подобласти с малым числом событий (менее трех с $m \geq \underline{m} - 1$ в интервале ($t_f - 5$ лет, $t_f - 1$ год)); в качестве значения p принималось $p = \frac{n^* \cdot \theta_A}{k}$, где θ_A – интервал времени по предвестнику Accord. Параметры алгоритма: $\tau_U = 2$ года, $\tau_u = 30$ дней и $\tau = 240$ дней (см. разд. 2).

ТАБЛИЦА 5. Значения вычисляемых параметров алгоритма для юго-востока Средиземноморья

Предвестник	Параметр	Предсказываемое землетрясение	
		Nuweiba, 1995 г.	Кипрское, 1996 г.
ROC	\underline{m}	2.9	2.0
	\underline{R}	75	75
Accord	\underline{m}	2.9	2.0
	C_A	4	5
U	\underline{m}	2.9	2.0

Примечание. Значения параметров автоматически определены на интервале ($t_f - 5$ лет, $t_f - 1$ год), где t_f – момент сильного землетрясения.

В качестве пространственных областей для исследования были приняты прямоугольники размером 400×240 км (сетка 8×8 ячеек размером 50×30 км), ориентированные вдоль основной системы разломов (рис. 4). Размер областей выбран с учетом того, что в Калифорнии для прогноза землетрясений с $M \geq 7.3$ и с $M \geq 6.3$ линейный размер области составлял 500 км и 250 км, соответственно. Магнитуда землетрясений, прогноз которых здесь рассмотрен, имеет промежуточные значения ($M \geq 6.8$) и, таким образом, размеры области также были выбраны промежуточными. Центр области для землетрясения Nuweiba взят в эпицентре этого землетрясения. Эпицентр Кипрского землетрясения расположен на краю сейсмичной зоны, поэтому центр соответствующей области выбран так, чтобы максимально охватить эту зону.

Значения функционалов, рассчитанные с этими параметрами, приведены на рис. 5, а результат ретроспективного прогноза по алгоритму, описанному в разд. 2, – на рис. 6. Видно, что оба землетрясения успешно ретроспективно предсказываются со временем тревоги около полугода.

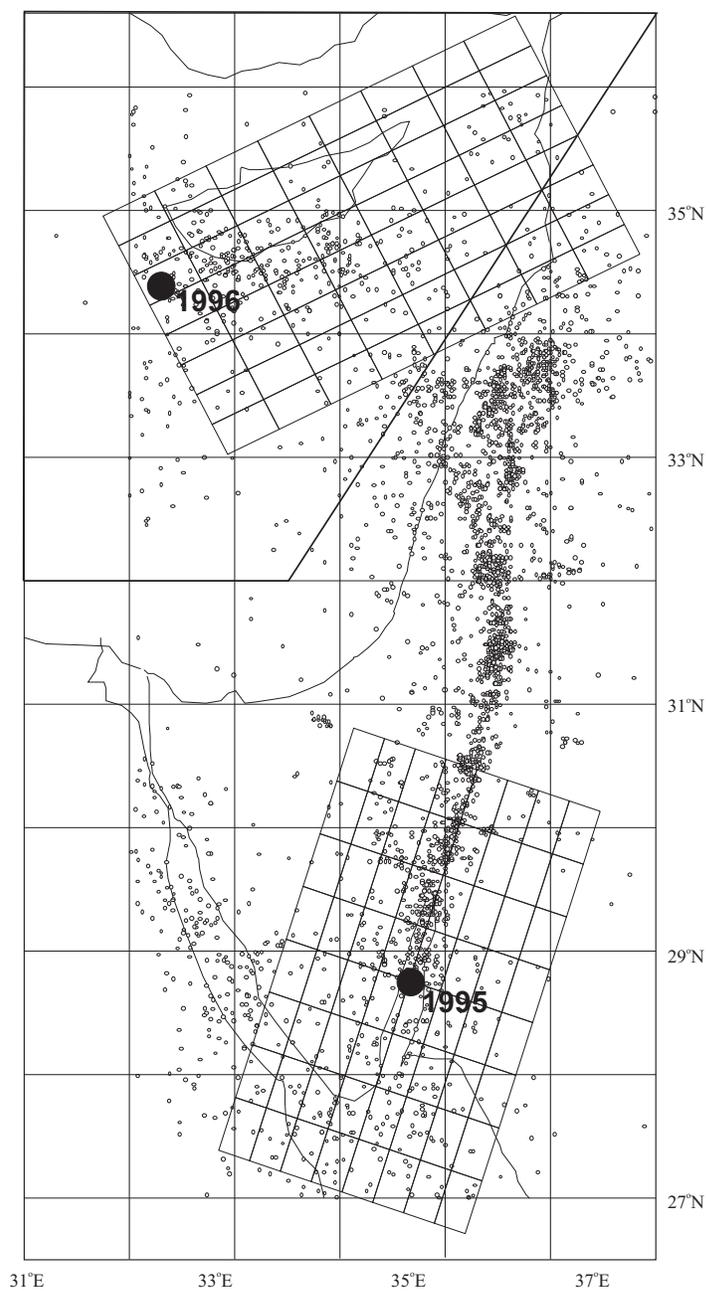
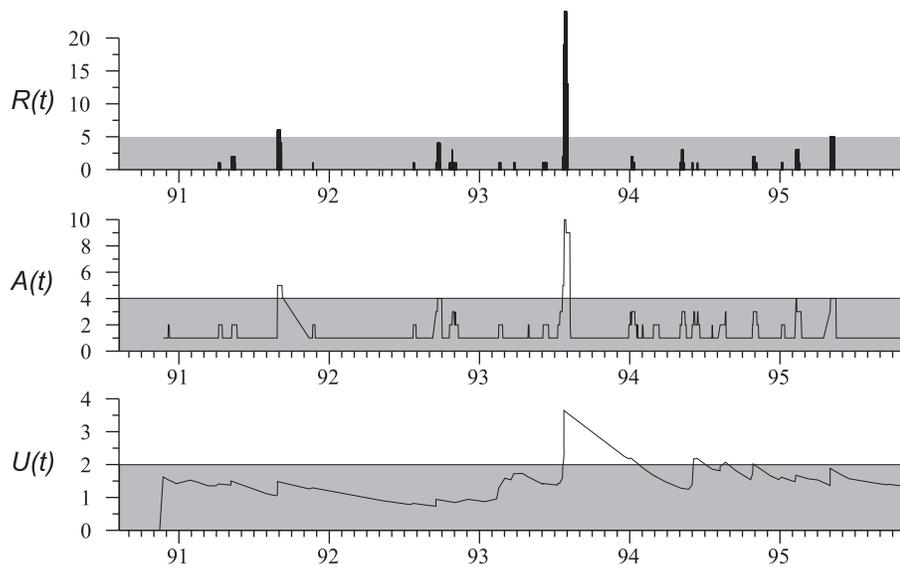


Рис. 4. Рассматриваемые прямоугольные области и разбиение на подрегионы на юго-востоке Средиземноморья.

Темными кружками и датой обозначены исследуемые землетрясения Nuweiba (1995) и Кипрское (1996), точками – основные толчки с $M \geq 2$. Прямая жирная линия отделяет область Кипрского землетрясения от более высокосейсмичной области рифта Мертвого моря

Землетрясение Nuweiba, 1995 г., $M=7.1$



Кипрское землетрясение 1996 г., $M=6.8$

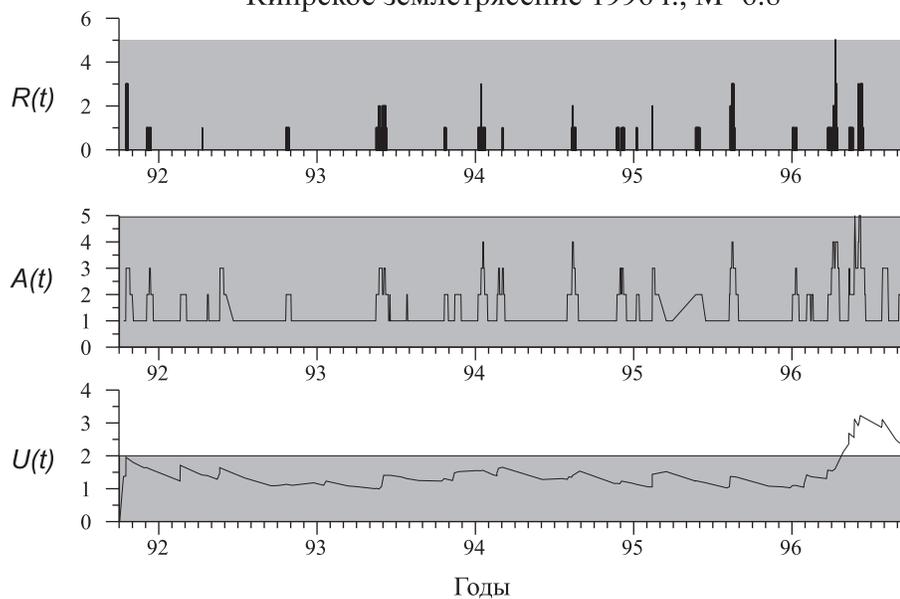


Рис. 5. Функционалы $R(t)$, $A(t)$ и $U(t)$ в 5-летних интервалах перед прогнозируемыми землетрясениями на юго-востоке Средиземноморья

Появление предвестников определяется превышением значений функционалов над заданными порогами C_R, C_A, C_U (пороги обозначены затенением)

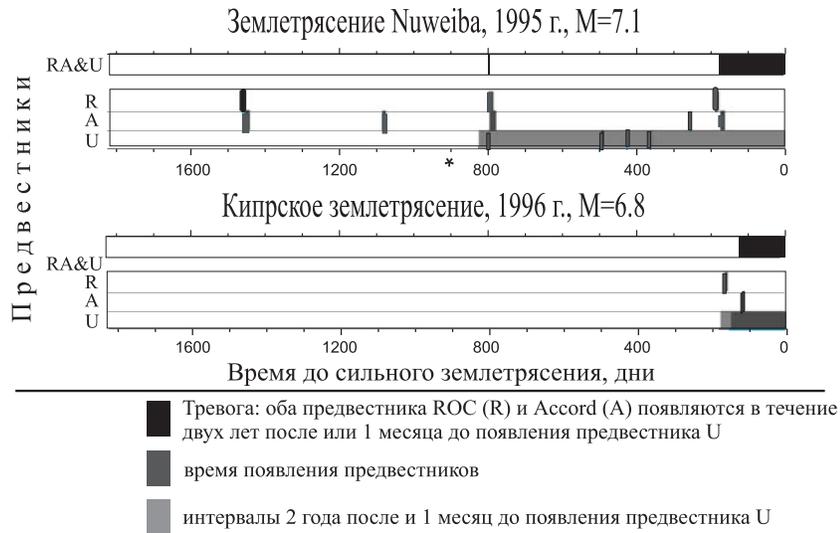


Рис. 6. Результаты ретроспективного прогноза на юго-востоке Средиземноморья при прямом переносе алгоритма с сохранением свободных параметров по [14]

Еще одна тревога возникла за три дня до землетрясения с $M = 6.1$, которое произошло 3 августа 1993 года, т.е. за 2.5 года до землетрясения Nuweiba, с эпицентром в 35 км к югу от эпицентра Nuweiba. Формально, при прогнозе землетрясений с $M \geq 6.8$, эта тревога должна считаться ложной. При этом возникает естественный вопрос: сохранится ли тревога, если рассмотреть меньшую область и перенормировать значения параметров алгоритма для $M = 6.1$? Мы рассмотрели область 200×120 км с центром в эпицентре землетрясения 3 августа 1993 года. Для $M = 6.1$ значения вычисляемых параметров составили: $\underline{m} = 2.4$, $\underline{R} = 34$ км, $C_A = 4$. В 5-летнем интервале времени тревога возникает только один раз – за три дня до землетрясения 3 августа 1993 года; предвестники ROC, Accord и U появляются за 11, 3.4 и 3.5 дня до землетрясения, соответственно. Предвестники ROC и Accord появляются, кроме того, за два года до землетрясения. Таким образом, в гипотетическом многоступенчатом прогнозе для разных интервалов магнитуды прогнозируемых событий, это землетрясение было бы успешно предсказано.

4. Влияние размеров и положения рассматриваемой области на результат ретроспективного прогноза

В разд. 3 хороший результат ретроспективного прогноза получен с теми же значениями свободных параметров, что и в Калифорнии. Единственными субъективными параметрами в данном случае являются раз-

меры и положение исследуемой области. С точки зрения изучения явлений, на которых основаны рассматриваемые здесь предвестники, было бы достаточно найти область, в которой с заранее зафиксированными параметрами ретроспективный прогноз получается хорошо, т.е. без пропусков цели и ложных тревог. Для практических целей прогноза этого недостаточно. Вряд ли можно надеяться, что среднесрочный прогноз позволит точно определять области, в которых следует применять описанный здесь алгоритм. Поэтому важно, чтобы выбор положения и размеров области влиял на результат незначительно.

В данной работе варьировались как положение прямоугольных областей, так и их размеры. Центры прямоугольников последовательно смещались на север (на 0.5°), на северо-запад (на 0.5° и 0.5°) и т.д. по кругу. Кроме того, менялись размеры прямоугольников, без изменения центра: 300×180 км (сетка 6×6 ячеек 50×30 км), 350×210 км (сетка 7×7 ячеек), 450×270 км (сетка 9×9 ячеек), 500×300 км (сетка 10×10 ячеек). Зависимые параметры каждый раз пересчитывались. Тревога отменялась после землетрясения 3 августа 1993 года в Израиле, но при этом короткая тревога перед этим землетрясением считалась ложной.

Результаты применения алгоритма для этих областей приведены в табл.6. Ни в одном из случаев не появилось дополнительных ложных тревог. Для землетрясения Nuweiba только в двух случаях, при смещении центра прямоугольника к северо-востоку и к юго-востоку был

ТАБЛИЦА 6. Результаты ретроспективного прогноза при вариации положения центра и размера рассматриваемой области

Вариации положения центра и размера области	Землетрясение Nuweiba, 1995 г.			Кипрское землетрясение, 1996 г.		
	Успех	Время тревоги, дни	Число ложных тревог	Успех	Время тревоги, дни	Число ложных тревог
Исходное положение	+	192.2	1	+	125.2	0
Сдвиг центра к N	+	192.2	1	-	0	0
Сдвиг центра к NE	-	0	1	-	0	0
Сдвиг центра к E	+	191.2	1	+	125.2	0
Сдвиг центра к SE	-	0	1	-	0	0
Сдвиг центра к S	+	191.2	1	+	125.2	0
Сдвиг центра к SW	+	192.2	1	+	171.2	0
Сдвиг центра к W	+	191.2	1	+	171.2	0
Сдвиг центра к NW	+	191.2	1	-	0	0
Сетка 6×6 ячеек	+	192.2	1	-	0	0
Сетка 7×7 ячеек	+	191.2	1	+	127	0
Сетка 9×9 ячеек	+	191.2	1	+	171.2	0
Сетка 10×10 ячеек	+	192.2	1	+	125.2	0

Примечание. Сдвиг центра рассматриваемой прямоугольной области осуществлялся на 0.5° по широте и/или долготе

зафиксирован пропуск цели. При изменении размеров прямоугольника ни дополнительных тревог, ни пропусков цели не возникло. Для Кипрского землетрясения пропуски цели появились в половине случаев при смещении центра прямоугольника и один раз при изменении размеров (до минимального рассматриваемого размера 6×6 ячеек). Следует особо отметить, что в разных вариантах для Кипрского землетрясения длительность тревоги различается на 1.5 месяца. Это вызвано тем, что предвестники ROC и Assocd возникают в разных вариантах за 4 и 5.5 месяцев до землетрясения, соответственно, при этом "работают" разные комбинации эпицентров, что является еще одним признаком устойчивости этих предвестников.

Заключение

Экспериментальный краткосрочный алгоритм прогноза, основанный на серии из трех предвестников землетрясений, недавно предложенный для юго-востока Калифорнии, опробован для двух сильнейших за последние 30 лет землетрясений юго-востока Средиземноморья. Алгоритм применен с заранее зафиксированными значениями параметров [14] для ретроспективного прогноза землетрясений с $M \geq 6.8$ и дал хороший результат: оба землетрясения попадают в интервал TIR, еще одна тревога возникает непосредственно перед землетрясением с $M = 6.1$; других тревог не возникает. Такой независимый тест, хотя и не может заменить прогноз вперед, является очень важной проверкой алгоритма и лежащих в его основе гипотез. Положительный результат теста послужит хорошим стимулом дальнейших исследований краткосрочных предвестников, как основанных на корреляции сейсмичности на больших расстояниях в разных ее проявлениях, так и хорошо известных среднесрочных предвестников, но рассматриваемых в меньших объемах пространства–времени.

Очень обнадеживающим результатом является отсутствие дополнительных ложных тревог при изменении положения и размеров рассматриваемых прямоугольных областей. Использование рассматриваемого алгоритма для прогноза вперед предполагает, что пространство и время, в которых он применяется, будет выделяться среднесрочными алгоритмами прогноза, например M8 и MSc [6]. При этом совершенно не очевидно, что выделенная пространственная область будет удачно совпадать с областью, в которой целесообразно применять рассматриваемый алгоритм. Полученный же результат позволяет надеяться, что пространственная область для применения алгоритма может быть уточнена, например, путем сканирования по пространству.

Данная работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра (проект N 1538) и ИНГАС (проект N 01-0748).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Keilis-Borok V.I.* Intermediate-term earthquake prediction: Models, phenomenology, worldwide tests // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1990. Vol.61. P.1–144.
2. *Keilis-Borok V.I., Shebalin P.N.* Dynamics of lithosphere and earthquake prediction // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1999. Vol.111. P.179–330.
3. *Keilis-Borok V.I., Soloviev A.A. et al.* Non-linear dynamics of the lithosphere and earthquake prediction // Springer, 2002 (in press).
4. *Keilis-Borok V.I.* Earthquake prediction: State-of-the-art and emerging possibilities // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 2002. Vol.30. P.1–33.
5. *Ma Z., Fu Z., Zhang Y. et al.* Earthquake prediction: Nine major earthquakes in China. N.Y.: Springer-Verlag. 1990.
6. *Kossobokov V.G., Keilis-Borok V.I., Smith S.W.* Localization of intermediate-term earthquake prediction // *J. Geophys. Res.* 1990. Vol.95, N B12. P.19763–19772.
7. *Kossobokov V.G., Romashkova L.L., Keilis-Borok V.I. et al.* 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, N3-4. P.187–196.
8. *Keilis-Borok V.I., Kossobokov V.G.* Premonitory activation of earthquake flow: algorithm M8 // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1990. Vol.61. P.73–83.
9. *Shebalin P., Girardin N., Rotwain I. et al.* Local overturn of active and non-active seismic zones as a precursor of large earthquakes in Lesser Antillean Arc // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1996. Vol.97. P.163–175.
10. *Shebalin P.N., Keilis-Borok V.I.* Phenomenon of local "seismic reversal" before strong earthquakes // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1999. Vol.111. P.215–227.
11. *Gabrielov A.M., Keilis-Borok V.I., Zaliapin I.V. et al.* Critical transitions in colliding cascades // *Phys. Rev. E.* 2000. Vol.62. P.237–249.
12. *Gabrielov A.M., Zaliapin I.V., Newman W.I. et al.* Colliding cascades model for earthquake prediction // *J. Geophys. Res.* 2000. Vol.143. P.427–437.
13. *Zaliapin I., Keilis-Borok V.I., Axen G.* Pre-monitory spreading of seismicity over the fault network in S. California: precursor Accord // *J. Geophys. Res.* 2002 (in press).
14. *Keilis-Borok V.I., Shebalin P.N., Zaliapin I.V.* Premonitory patterns of seismicity months before a strong earthquake: Five case histories in Southern California (in press).
15. *Shebalin P., Zaliapin I., Keilis-Borok V.* Premonitory raise of the earthquakes' correlation range: Lesser Antilles // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2000. Vol.122. P.241–249.
16. *Gardner J., Knopoff L.* Is the sequence of earthquakes in S. California with aftershocks removed Poissonian? // *Bull. Seism. Soc. Amer.* 1974. Vol.64, N 5. P.1363–1367.
17. *Keilis-Borok V., Knopoff L., Rotwain I., Sidorenko T.* Bursts of seismicity as long-term precursors of strong earthquakes // *J. Geophys. Res.* 1980. Vol.85, N B2. P.803–811.
18. Southern California seismographic network (SCSN) format catalog data, 1932–2002. Caltech/USGS; available at <http://www.scecdc.scec.org/ftp/catalogs/SCSN>.
19. *Mogi K.* Earthquake prediction. Tokyo: Academic Press, 1985.

20. *Mogi K.* Migration of seismic activity // Bull. Earth Res. Inst. Univ. Tokyo. 1968. Vol.46, N 1. P.53–74.
21. *Вилькович Е.В., Шнирман М.Г.* Волны миграции эпицентров (примеры и модели) // Математические модели строения Земли и прогноза землетрясений. М.: Наука, 1982. С.27–37. (Вычисл. сейсмология; Вып.14).
22. *Press F., Allen C.* Patterns of seismic release in the Southern California region // J. Geophys. Res. 1995. Vol.100, N B4. P.6421–6430.
23. *Romanowicz B.* Spatiotemporal patterns in the energy-release of great earthquakes // Science. 1993. Vol.260. P.1923–1926.
24. *Press F., Briggs P.* Chandler Wobble, earthquakes, rotation and geomagnetic changes // Nature. 1975. Vol.256. P.270–273.
25. *Hill D.P., Reasenber P.A., Michael A., et al.* Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 Landers California earthquake // Science, 1993. Vol.260. P.1617–1623.
26. *Turcotte D.L., Newman W. I., Gabrielov A.* A statistical physics approach to earthquakes // Geocomplexity and the Physics of Earthquakes. Washington: AGU, 2000.
27. *Smalley R.F., Turcotte D.L., Solla S.A.* A renormalization group approach to the stick-slip behavior of faults // J. Geophys. Res. 1985. Vol.90. P.1894–1900.
28. *Sornette D., Sammis C.G.* Complex critical exponents from renormalization group theory of earthquakes: Implications for earthquake predictions // J. Phys. I France. 1995. Vol.5. P.607–619.
29. *Bowman D.D., Ouillon G., Sammis G.G. et al.* An observational test of the critical earthquake concept // J. Geophys. Res. 1998. Vol.103. P.24,359–24,372.
30. *Прозоров А.Г.* Изменения сейсмической активности, приуроченные к сильным землетрясениям // Интерпретация данных сейсмологии и неотектоники. М.: Наука, 1975. С.71–82. (Вычисл. сейсмология; Вып.8).
31. *Keilis-Borok V.I.* The lithosphere of the Earth as a nonlinear system with implications for earthquake prediction // Rev. Geophys. 1990. Vol.28. P.19–34.
32. *Vorobieva I.A.* Prediction of a subsequent large earthquake // Phys. Earth Planet. Inter. 1999. Vol.111. P.197–206.
33. *Soloviev A.A., Vorobieva I.A., Panza G.F.* Modeling of block-structure dynamics: Parametric study for Vrancea // Pure and Appl. Geophys. 1999. Vol.156, N 3. P.395–420.
34. *Gabrielov A.M., Keilis-Borok V.I., Jackson D.D.* Geometric incompatibility in a fault system // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1996. Vol.93. P.3838–3842.
35. *Allegre C.J., Le Mouel J.L., Provost A.* Scaling rules in rock fracture and possible implications for earthquake prediction // Nature. 1982. Vol.297. P.47–49.
36. *Narkunskaya G.S., Shnirman M.G.* Hierarchical model of defect development and seismicity // Phys. Earth. Planet. Inter. 1990. Vol.61. P.29–35.
37. *Narkunskaya G.S., Shnirman M.G.* An algorithm of earthquake prediction // Computational Seismology and Geodynamics. Washington: DC: AGU, 1994. Vol.1. P.20–24.
38. *Gomberg J., Blanpied M.L., Beeler N.M.* Transient triggering of near and distant earthquakes // Bull. Seism. Soc. Amer. 1997. Vol.87, N 2. P.294–309.
39. *Rice J., Gu J.* 1983. Earthquake after effects and triggered seismic phenomena // PAGEOPH. Vol.121. P.187–219.
40. *Stein R.S., King G.S.P., Lin J.* Change in failure stress on the Southern San-Andreas fault system caused by the 1992 magnitude=7.4 Landers earthquake // Science. 1992. Vol.258. P.1328–1332.
41. *Zaliapin I., Keilis-Borok V.I., Ghil M.* Boolean delay model of colliding cascades. II: Prediction of critical transitions // J. Stat. Phys. 2001 (Submitted).
42. *Shreider S.Yu.* Formal definition of premonitory seismic quiescence // Phys. Earth Planet. Inter. 1999. Vol.61. P.113–127.