

УДК 550.341

ПРОСТРАНСТВЕННО СТАБИЛИЗИРОВАННАЯ СХЕМА ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА M8: ИТАЛИЯ И КАЛИФОРНИЯ

Л.Л. Ромашкова, В.Г. Кособоков

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

Алгоритм среднесрочного прогноза землетрясений M8, статистическая значимость которого доказана при прогнозе сильнейших землетрясений мира, может быть также использован в отдельных регионах для прогноза землетрясений меньшей силы. Разработана и проверена ретроспективно новая схема применения этого алгоритма и его модификаций. В этой схеме принято во внимание естественное распределение сейсмической активности, минимизирован субъективизм при выборе значений свободных параметров при переходе к прогнозу землетрясений умеренных магнитуд, увеличена пространственная стабильность и степень надежности прогнозов. Результаты тестирования на территории Италии и, независимо, в Калифорнии и Неваде, данные которых не участвовали в разработке схемы, показали, что повышение стабильности и надежности прогнозов достигается без каких-либо значительных потерь их эффективности.

SPATIALLY STABLE APPLICATION OF M8 ALGORITHM: ITALY AND CALIFORNIA

L.L. Romashkova, V.G. Kossobokov

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

The intermediate-term earthquake prediction algorithm M8, which statistical significance has been established in prediction of the great earthquakes worldwide, could be used in some regions for predicting smaller earthquakes. A novel scheme of applying M8 and its modifications is designed and tested retroactively. The scheme accounts for natural distribution of seismic activity, minimizes subjective choice of adjusted parameters on transition to prediction of moderate earthquakes, increases spatial stability and reliability of predictions. The test results on the territory of Italy and the independent ones in California and Nevada, which data was not considered in the design, confirm that the increase in stability and reliability of predictions is achieved without a significant loss of their efficiency.

Введение

Можно ли распространить алгоритм M8 на прогноз землетрясений средней силы?

Алгоритм M8 разработан для диагностики периодов повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира с магнитудой 8.0 и выше [1]. Позже он был адаптирован для прогноза землетрясений меньших магнитуд [2].

Исследование проводится в круговых областях, диаметр которых

$$D(M_0) = 111.111 \cdot (\exp(M_0 - 5.6) + 1) \text{ км}, \quad (1)$$

где M_0 – магнитуда прогнозируемого события. Диаметр области вследствие выбранных констант пропорционален (с поправкой за ошибку в координатах на 1° широты) линейному размеру очага ожидаемого землетрясения. Алгоритм М8, используя каталог основных толчков, анализирует интегральные параметры сейсмичности внутри каждого круга и объявляет тревогу в моменты, когда эти параметры демонстрируют аномальное повышение по сравнению с наблюдаемыми за предшествующий продолжительный период времени значениями. Детальное описание алгоритма можно найти в [3].

Глобальный тест алгоритма М8 проводится уже более 10 лет на территории Тихоокеанского сейсмического пояса, включая Индонезию и Южно-Сандвичевы острова. Схема теста [4] разработана совместно с американскими учеными, и текущий прогноз вперед делается независимо в трех научных институтах каждые шесть месяцев на основе обновленных данных каталога NEIC GHDB [5]. Результаты глобального теста алгоритма М8 для прогноза сильнейших землетрясений мира с 1985 года по настоящее время представлены в табл.1. Способы подсчета пространственно-временного объема тревог и оценки уровня статистической значимости подробно изложены в [6, 7]. Они консервативны и наиболее полным образом учитывают неоднородность сейсмичности по пространству. Полный отчет о глобальном тесте алгоритма М8 в 1985–2002 гг. можно найти в Интернете (<http://mitp.ru/predictions.html>).

ТАБЛИЦА 1. Результаты применения алгоритма М8 в глобальном тесте

M_0	Исследуемый период, годы	Число землетрясений		Пространственно-временной объем тревог, %	Статистическая значимость, %
		Всего	Предсказано		
8.0	1985–2001	10	9	34.9	99.95
8.0	1992–2001	8	7	30.2	99.87
7.5	1985–2001	38	25	42.0	99.74
7.5	1992–2001	26	14	40.0	89.18

Возможность работы в различных диапазонах магнитуд обеспечивается в алгоритме М8 путем нормализации его внутренних параметров. Так, например, размер области исследования однозначно задается магнитудой, а следовательно, и линейным размером очага ожидаемого землетрясения. Нижние магнитудные пороги, используемые при подсчете функционалов, определяются, исходя из фиксированного уровня сейсмической активности в круге, который одинаков для прогноза в разных

диапазонах магнитуд. Все остальные параметры алгоритма также адаптируются автоматически. В основе этой адаптации лежит модель, определяющая зависимость масштаба процесса подготовки землетрясения от величины готовящегося события. Итак, в рамках гипотезы о самоподобии сейсмического процесса у нас нет никаких формальных препятствий к тому, чтобы применять алгоритм M8 для прогноза не только сильнейших событий, но и землетрясений умеренных магнитуд.

Вместе с тем, землетрясения нельзя рассматривать как абсолютно независимые события. Известным проявлением зависимости землетрясений друг от друга является наличие афтершоков, когда сильное событие порождает последовательность более слабых, близких к нему по времени и по пространству. Но даже в том случае, когда мы рассматриваем только основные толчки, их распределение в пространстве и времени не является распределением независимых событий. Сама возможность прогноза землетрясений основывается на предположении о наличии пространственных и временных закономерностей в поведении сейсмического потока, свойственных процессу подготовки сильного события. Размер области подготовки зависит от размера готовящегося события. Мы полагаем, что успехи алгоритма M8, по крайней мере частично, определяются предположением о том, что событие с линейным размером очага L готовится на территории с линейным размером порядка $10L$. В целом, сейсмический поток можно рассматривать как совокупность иерархически самоорганизованных отдельных процессов подготовки землетрясений разного масштаба, взаимно влияющих друг на друга. Модельное описание такого иерархического взаимодействия получило название сталкивающихся (прямых и обратных) каскадов и приводится в [8, 9].

Сильнейшие землетрясения мира являются уникальными событиями. Прогнозируя их, мы выявляем закономерности в поведении сейсмического потока, на порядок превышающие все то, что обусловлено процессами подготовки всех остальных событий на окружающей территории. Прогноз землетрясений меньших магнитуд – более сложная задача. Его эффективность во многом зависит от того, что происходит с землетрясениями на более высокой ступени иерархии. В идеальном случае алгоритм прогноза должен уметь отделять влияние более сильных событий и затем анализировать поведение сейсмического потока, выявляя закономерности, характерные для процесса подготовки более слабых землетрясений. Однако известно, что распределение числа землетрясений в зависимости от их магнитуды подчиняется закону Гутенберга–Рихтера, а именно, временной интервал между сильнейшими событиями по всему миру примерно в десять раз превышает временной интервал между зем-

летрясениями, имеющими магнитуду на единицу меньше. Землетрясения с магнитудой 8.0 и выше происходят в мире довольно редко – примерно раз в один-два года – и обычно на больших расстояниях друг от друга. Для отдельно взятого региона частота повторяемости таких землетрясений еще меньше. Существует много высокоактивных сейсмических регионов, где землетрясения с магнитудой, превышающей 8.0, не были зарегистрированы за все время инструментальных наблюдений. Для каждого такого региона можно условно определить свое сильнейшее событие – максимальное из известных за исследуемый продолжительный период времени.

Вышесказанное дает основание полагать, что алгоритм M8, хорошо продемонстрировавший себя при прогнозе сильнейших землетрясений мира, может быть применен и для прогноза землетрясений более низких магнитуд на отдельно взятых территориях. Эффективность прогноза при этом зависит от того, насколько исследуемая территория изолирована от влияния процессов подготовки более сильных, вплоть до сильнейших, землетрясений, возможных на соседних территориях. Вопрос о том, как далеко можно "опускаться" по магнитуде при выборе M_0 , является предметом отдельного исследования для каждого региона и зависит, в том числе, и от его сейсмологической изученности. В большинстве случаев выбор M_0 определяется частотой повторяемости рутинно регистрируемых землетрясений меньших магнитуд на рассматриваемой территории, которых должно быть достаточно для содержательного описания текущей обстановки. В работе [2, см.табл.1] приведены результаты ретроспективного применения алгоритма M8 в различных регионах мира. Магнитуда прогнозируемых землетрясений, как правило, составляет 6.5 и выше. Два случая, когда $M_0 = 6.0$ и $M_0 = 4.9$, представляют собой примеры регионов, сильно изолированных в пространстве от остальных сейсмических территорий.

1. Вопросы применения алгоритма M8 в регионах

Алгоритм M8 представляет собой полностью автоматическую процедуру, обеспечивающую возможность применения его в различных диапазонах магнитуд без "ручной" адаптации параметров. Таким образом, единственный вопрос, который приходится решать в каждом новом регионе, состоит в способе выбора областей исследования. Напомним, что областями исследования алгоритма являются круги с диаметром, однозначно определяемым по магнитуде прогнозируемого землетрясения. Стандартное правило алгоритма говорит, что круги должны быть расставлены вдоль оси сейсмического пояса таким образом, чтобы покрывать всю сейсмически активную территорию региона. В практике

предыдущих применений центры соседних кругов разнесены на расстояние порядка их радиуса, что обычно приводит к троекратному перекрытию сейсмического пояса. Такой метод расположения кругов в пространстве оставляет достаточно свободы для исследователя и требуют ответа на два основных вопроса: 1) как именно расставить круги в данном регионе и 2) каким образом рассматривать тревоги во множественных пересечениях кругов. В практике применения алгоритма М8 ответ на второй вопрос состоит в утверждении, что все тревоги, объявленные алгоритмом, имеют одинаковый уровень опасности вне зависимости от степени их пересечения. Другими словами, тревогой считается пространственное объединение всех кругов, находящихся в состоянии тревоги на данный момент времени. Отметим, что прогнозы алгоритма М8 безусловно распространяются на сейсмогенные структуры и ни в коем случае не утверждают равновероятность возникновения сильных землетрясений в них и на асейсмичных территориях в пределах областей исследования. В практических приложениях результаты прогноза времени землетрясений добавляют к бессрочным (по отношению к периоду человеческой жизни) оценкам сейсмической опасности и риска независимую временную модуляцию. Для оценки опасности, как функции времени, достаточно адекватной свертки (т.е. взвешенного интегрирования) тревоги с бессрочным распределением мест возможного возникновения землетрясений и законом Гутенберга–Рихтера. Для оценки риска результат необходимо дополнительно свернуть с распределением экономических факторов и/или с плотностью населения.

Вопрос о пространственном расположении кругов является более сложным и не имеет однозначного ответа. Процедура выбора последовательности кругов в каждом регионе остается субъективной даже в том случае, когда она удовлетворяет общему формальному правилу, изложенному выше. Координаты центров кругов – свободный параметр алгоритма. Даже после того, как определенное, обычно небольшое, количество кругов в регионе зафиксировано, вопрос устойчивости алгоритма по отношению к их расположению остается открытым. Естественно, стабильность каждой полученной тревоги может быть исследована систематической вариацией позиции круга, что даст возможность оценить надежность прогноза, но не отменит его результаты.

Другая особенность применения алгоритма М8 в регионах состоит в том, что полноты имеющегося каталога часто бывает недостаточно для автоматического переноса стандартной версии алгоритма на прогноз землетрясений средней силы. В этих случаях применяется модифицированная версия, устанавливающая пониженные пороги среднегодовой сейсмической активности для выборки последовательности землетрясе-

ний, использующихся при подсчете функционалов [2, 10, 11]. Все остальные переменные алгоритма остаются без изменения. Порог среднегодовой сейсмической активности становится, таким образом, вторым свободным параметром, который необходимо зафиксировать перед тем, как применять алгоритм для прогноза вперед в новом регионе.

Чтобы применить алгоритм для прогноза вперед, надо сначала апробировать его ретроспективно. Практика показывает, что в период времени, доступный для анализа, обычно известно всего несколько сильных землетрясений, на которых можно проверить работу алгоритма. При наличии свободных параметров мы всегда имеем возможность оптимизировать алгоритм *с точки зрения успешного решения поставленной задачи*. Два основных вопроса, возникающих при этом, состоят в следующем: 1) насколько полученная схема применения алгоритма устойчива по отношению к изменению свободных параметров и 2) насколько хорошие результаты "оптимального" в ретроспекции алгоритма будут отличаться от результата прогноза вперед. Вторым вопросом является более сложным и до настоящего времени мало исследованным. Очевидно, что при наличии ограниченной выборки ретроспективных примеров существует тесная взаимосвязь между степенью оптимизации параметров при обучении и надежностью будущего прогноза вперед. Следовательно, добиваясь наилучшей подгонки параметров всего лишь на нескольких примерах для обучения, мы рискуем увеличить вероятность ошибки при прогнозе вперед. Поэтому, перед каждым исследователем стоит задача найти в этом вопросе компромисс, основываясь на собственном опыте использования алгоритма при работе с реальными данными. Проблема устойчивости алгоритма по отношению к вариации свободных параметров проще и может быть исследована в каждом конкретном случае [1].

Цель данной работы состояла в том, чтобы создать схему применения алгоритма M8, которая минимизирует субъективизм при выборе значений свободных параметров и, одновременно, увеличивает пространственную стабильность прогноза. Такая схема разрабатывалась и проверялась на данных, относящихся к территории Италии.

2. Обзор применения алгоритма M8 в Италии

Каждое применение алгоритма M8 начинается с определения сильных событий, как таких землетрясений, которые мы собираемся предсказывать и которые описываются условием, что их магнитуда больше, либо равна M_0 . Поэтому необходимым требованием для начала работы алгоритма является задание единой для всех используемых землетрясений магнитудной шкалы. Обычно магнитуда MS приводится в гло-

бальных каталогах для более сильных событий, в то время как для более слабых эта магнитуда не определяется, а приводится магнитуда mb [5]. Кроме того, в локальных каталогах даются определения целого набора других магнитуд: Ml, Md, Mi и т.д. При применении алгоритма M8 для прогноза сильнейших землетрясений мира нами используется магнитуда M_{\max} – максимум из всех представленных в каталоге магнитуд – в качестве магнитудной шкалы, отражающей размер источника землетрясения. Эту же магнитуду мы использовали в Италии.

Впервые алгоритм M8 был применен в Италии в 1990 году для прогноза землетрясений с магнитудой 6.5 и выше [2]. В тесте, ретроспективно моделирующем прогноз вперед, в нескольких кругах исследования, расставленных на территории Центральной Италии, единственное за исследуемый период времени (1970–1986 гг.) сильное землетрясение Igrinia 1980 года было предсказано.

В 1996 году нами была разработана схема, позволяющая применять в реальном времени алгоритм M8 на всей территории Италии для прогноза землетрясений с магнитудой 6.0 и выше [10]. Использовались данные каталога PFGING и модифицированная версия алгоритма с пониженными порогами среднегодовой сейсмической активности в круге при выборе последовательностей землетрясений для подсчета функционалов. Все остальные параметры алгоритма оставались стандартными. Круги исследования (радиус $R = 192$ км для $M_0 = 6.5$ и $R = 138$ км для $M_0 = 6.0$) были расставлены "вручную" вдоль линии максимальной концентрации эпицентров землетрясений так, чтобы покрыть всю сейсмически активную территорию Италии. Выбор кругов и их число были различными для $M_0 = 6.5$ и $M_0 = 6.0$ (14 и 16 кругов, соответственно) для обеспечения приблизительно одинаковой степени их перекрытия в этих двух экспериментах. Три из четырех землетрясений с магнитудой 6.0 и выше за период 1950–1995 гг. были предсказаны при ретроспективном моделировании реального прогноза. Пространственно-временной объем тревог составил порядка 35% от всего пространственно-временного объема исследования.

В 2000 году был проведен прогнозный эксперимент, полностью повторяющий схему, разработанную в [10], но использующий данные новой ревизии регионального каталога Италии CCI1996+NEIC [11]. Как и ранее, три из четырех землетрясений были предсказаны (табл. 2), при уменьшении на несколько процентов пространственно-временного объема тревог. На рис. 1 показан результат ретроспективного прогноза этих событий по алгоритму M8. Землетрясения Friuli ($M_{\max} = 6.5$) и Igrinia ($M_{\max} = 6.7$) предсказаны в тесте для $M_0 = 6.5$ (рис. 1, а, б), землетрясение Voves ($M_{\max} = 6.0$) в тесте для $M_0 = 6.0$ (рис. 1, в).

ТАБЛИЦА 2. Основные толчки на территории Италии и ее окрестностей с $M_{\max} \geq 6.0$, представленные в каталогах СС1996 за 1950-1985 гг. и NEIC за 1986-2001гг.

Название землетрясения	Дата	Координаты		Глубина, км	M_{\max} по M8	Прогноз
		Широта ° N	Долгота ° E			
Friuli	06.05.1976	46.23	13.13	12	6.5	Да
Irpinia	23.11.1980	40.85	15.28	18	6.7	Да
Assisi	26.09.1997	43.08	12.81	10	6.4	Нет
Bovec	12.04.1998	46.24	13.65	10	6.0	Да

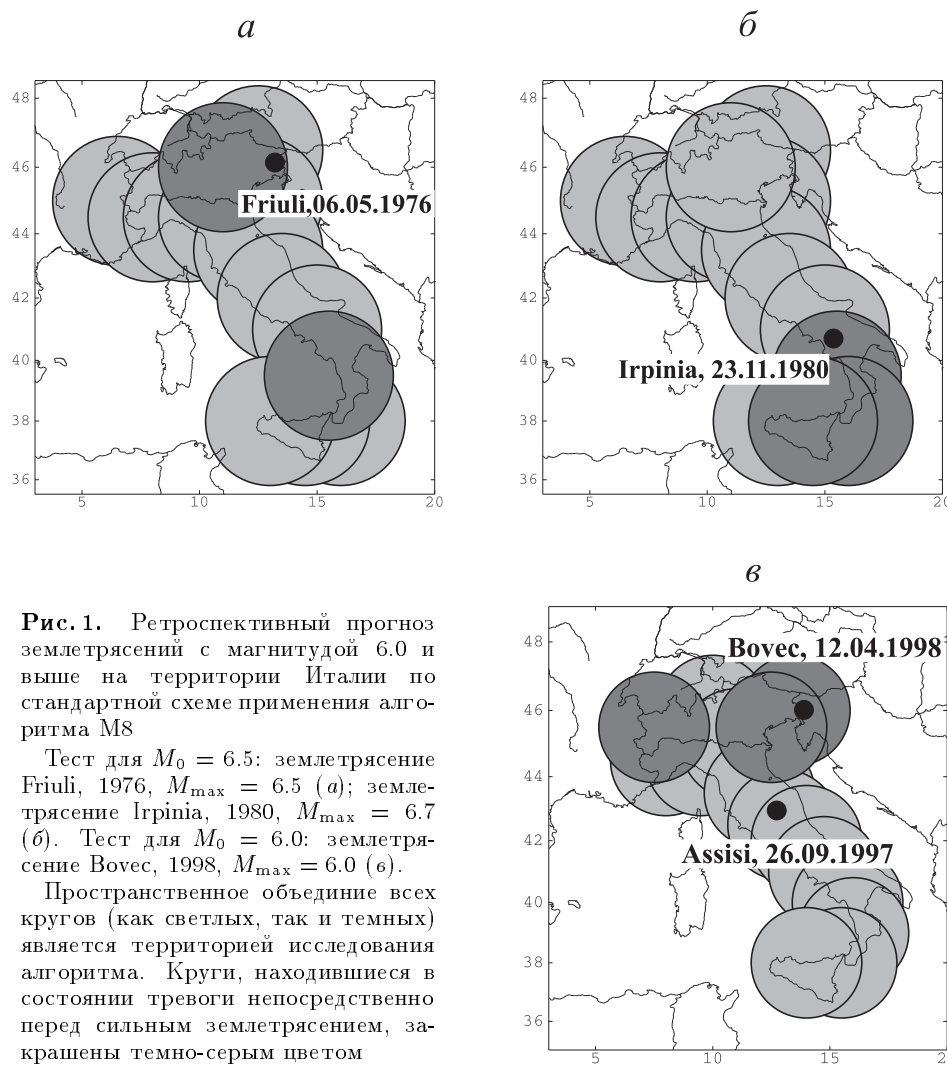


Рис. 1. Ретроспективный прогноз землетрясений с магнитудой 6.0 и выше на территории Италии по стандартной схеме применения алгоритма M8

Тест для $M_0 = 6.5$: землетрясение Friuli, 1976, $M_{\max} = 6.5$ (а); землетрясение Irpinia, 1980, $M_{\max} = 6.7$ (б). Тест для $M_0 = 6.0$: землетрясение Bovec, 1998, $M_{\max} = 6.0$ (в).

Пространственное объединение всех кругов (как светлых, так и темных) является территорией исследования алгоритма. Круги, находившиеся в состоянии тревоги непосредственно перед сильным землетрясением, закрашены темно-серым цветом

Применение модифицированной версии алгоритма с пониженными порогами активности для последовательности анализируемых землетрясений обуславливалось полнотой имеющегося регионального каталога. Уровень сейсмической активности неодинаков в разных областях территории Италии, кроме того, представительность каталога меняется во времени по мере улучшения регистрации землетрясений. Поэтому величины порогов были изначально [10] зафиксированы на максимально возможных значениях, обеспечивающих надежное и однородное применение алгоритма М8 на всей территории Италии и на протяжении всего исследуемого периода времени. Так, для $M_0 = 6.5$ пороговые частоты были установлены на уровне 3 и 6 основных толчков в круге в год вместо стандартных значений 10 и 20. Для $M_0 = 6.0$ пороговые частоты составляли 2 и 4 толчка в круге в год. Все дальнейшие эксперименты проводились без оптимизации, связанной с вариацией параметров активности.

Вторая степень свободы, обусловленная заданием положения кругов исследования, осталась в описанной схеме предметом субъективного выбора, хотя и основанного на некоторых разумных правилах.

3. Новая схема применения алгоритма М8 и ее приложение на территории Италии

Основанный на работе с реальными каталогами землетрясений алгоритм М8 был разработан таким образом, чтобы, по возможности, преодолеть влияние ошибок, неизбежно имеющих в сейсмологических данных, таких, например, как неполнота каталога или неточность в определении местоположения землетрясений. Внутренние свойства алгоритма, обеспечивающие эту возможность, состоят в следующем: 1) функционалы, используемые для прогноза, являются надежными среднесрочными характеристиками сейсмической активности, и их вычисления дублируются в двух диапазонах магнитуд; 2) значения различных порогов и квантилей определяются грубым способом без оптимизации или подгонки данных; 3) решение о начале тревоги требует подтверждения диагностики в два последовательных момента применения алгоритма. Однако внешние возможности стабилизации прогноза не были до сих пор в достаточной степени исследованы.

Сейсмическая активность на Земле не распространена равномерно. Она демонстрирует определенное подобие пространственного распределения при последовательном уменьшении масштаба наблюдения, обеспечивая самоподобную, фрактальную структуру сейсмически активных зон [12]. Имея в распоряжении воспроизводимый алгоритм прогноза

землетрясений, например М8, можно попытаться применить его повсюду, где только позволяют данные. Однако очевидно, что такой подход может привести к неадекватным результатам вследствие упомянутой выше неоднородности в распределении сейсмической активности. В алгоритме М8 прогноз землетрясения с линейным размером очага L ведется на территории с линейным размером порядка $10L$. В том случае, когда достаточно обширная территория исследования располагается в стороне от мест, где землетрясения действительно происходят, ее размер перестает соответствовать реальному размеру сейсмически активной области, оказавшейся внутри нее. В этом случае выводы о возможности возникновения землетрясения с магнитудой, соответствующей величине всей территории исследования, делаются на основе анализа сейсмических процессов, происходящих лишь на небольшом ее участке. Чтобы избежать такого рода противоречий, естественно помещать центры кругов исследования вдоль осей сейсмических поясов. Такие же соображения надо учитывать, когда работа ведется с региональным каталогом, имеющим очевидные территориальные границы представительности.

Принимая во внимание все вышесказанное и основываясь на опыте работы алгоритма М8 во многих регионах мира, мы разработали новую пространственно стабилизированную схему его применения. Эта схема устраняет субъективизм в расположении кругов исследования и повышает степень надежности объявления тревог. Ниже приводится краткое описание новой схемы, проиллюстрированное на примере ее применения в Италии для прогноза землетрясений с магнитудой 6.5 и выше. (Вопросы, касающиеся предварительного анализа данных, изложены подробно в [10, 11] и здесь не обсуждаются.)

1. Рассматривается территория, однородно представленная данными из имеющегося каталога, и исключается из рассмотрения полоса шириной порядка 1° вдоль ее границы. Для Италии пространственный размер территории, охватываемой каталогом USI2001 [11], постепенно увеличивается с 1950 по 2001 год вследствие увеличения полноты каталога. Поэтому для получения более надежного результата мы рассматриваем территорию, определенную по состоянию данных на 1950 год, т.е. с границами $38^\circ\text{--}47^\circ\text{N}$., $7^\circ\text{--}17^\circ\text{E}$.

2. Территория сканируется кругами малого радиуса r , расставленными в узлах частой и однородной пространственной сетки, и находятся локально сейсмически активные места – круги, среднегодовой уровень активности в которых превышает некоторый заданный порог. Малоактивные места исключаются из дальнейшего рассмотрения. В Италии при прогнозе для $M_0 = 6.5$ шаг по пространственной сетке s составляет

около 0.25° широты, радиус кругов $r = 28$ км, порог среднегодовой активности в круге a составляет 0.3 основных толчка с $M \geq 3.0$.

3. Исключается из рассмотрения каждый из узлов сетки, в окрестности которого сейсмических данных недостаточно для применения алгоритма М8 в стандартном круге исследования ($R = 192$ км для $M_0 = 6.5$) с центром в данном узле, и затем удаляются оставшиеся изолированные узлы и пары узлов.

4. Применяется алгоритм М8 в кругах исследования радиуса R , с центрами в оставшихся узлах сетки.

5. Из набора получившихся тревог удаляются тревоги, не удовлетворяющие следующему условию кластеризации: тревога подтверждается, если большинство кругов исследования с центрами в соседних узлах сетки, оставшихся в рассмотрении, также находятся в состоянии тревоги. Для Италии параметр "большинства" n определяется как 75% оставшихся в рассмотрении соседних узлов, взятых из квадрата 3×3 узла сетки с центром в исследуемом круге.

Таким образом, сначала мы применяем алгоритм М8 в наборе кругов, расставленных в узлах частой пространственной сетки по сейсмически активной территории, а затем оставляем только "достаточно большие" кластеры тревог. Работа новой схемы алгоритма М8 на примере региона Италии проиллюстрирована на рис. 2 .

Очевидно, что в новой схеме возникают некоторые новые свободные параметры.

Первые два из них – радиус малых кругов r , используемых для поиска локально сейсмически активных мест, и уровень активности a внутри этих кругов – коррелированы и характеризуют плотность эпицентров в пространстве. Величины этих параметров задают степень определенности, с которой мы выделяем сейсмически активную территорию. Изменяя их, мы получаем более или менее широкую территорию будущего анализа. Мы фиксируем эти параметры на величинах, позволяющих выделить достаточно тонкую структуру сейсмических поясов на всей исследуемой территории.

Третий параметр – шаг по пространственной сетке s – выбирается порядка линейного размера очага прогнозируемого землетрясения LS и примерно равен радиусу малого круга r .

Четвертый параметр n определяет понятие "большинства", используемое при выделении кластеров тревог. Естественно, выбор этих параметров может быть различен в различных регионах, и мы рекомендуем изначально варьировать их в процессе подготовки эксперимента по прогнозу вперед с тем, чтобы получить наиболее стабильный результат на ретроспективном материале, как это было сделано для Италии.

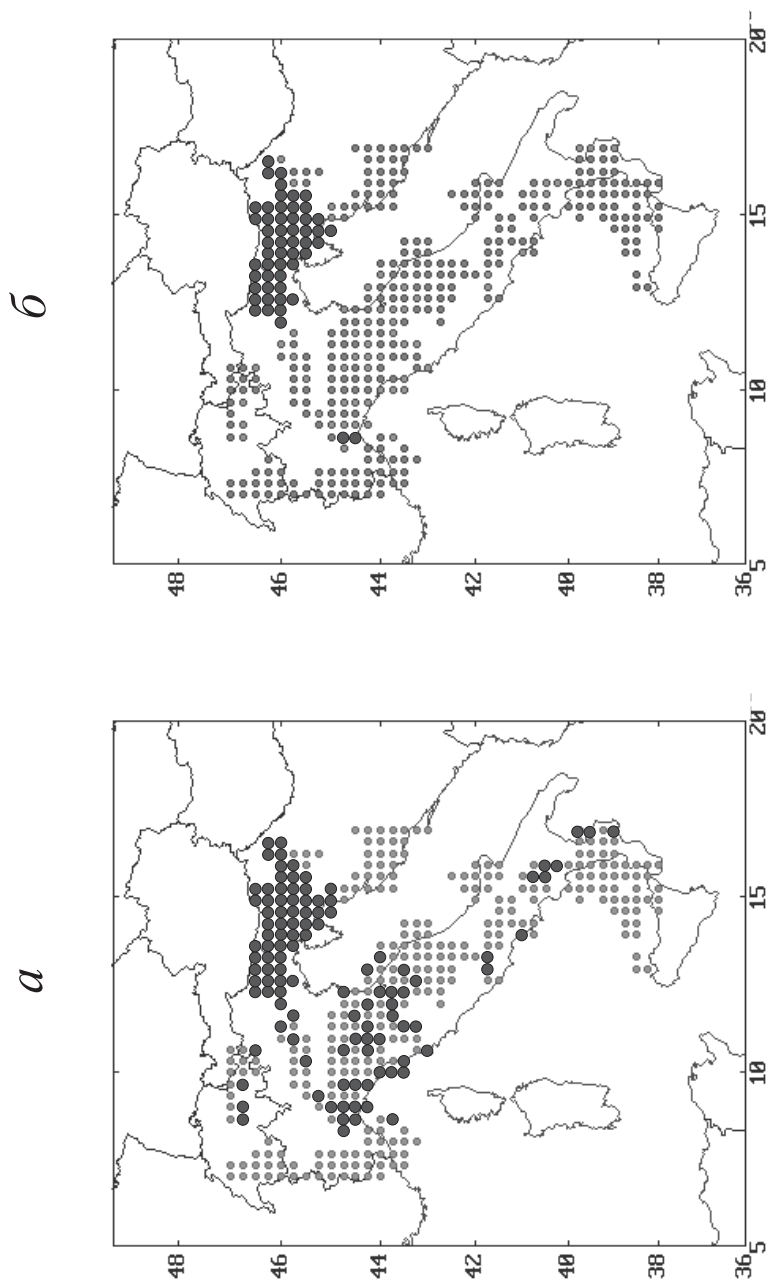


Рис. 2. Иллюстрация работы новой схемы алгоритма М8 в Италии, тест для $M_0 = 6.5$.
Кружки (светлые и темные) – узлы пространственной сетки, выделенные новой схемой на 01.01.2001 и использованные в качестве центров кругов исследования алгоритма М8; на *a* – темные кружки – все центры кругов, в которых алгоритм М8 объявил тревогу; на *б* – темные кружки – центры кругов, оставшихся в состоянии тревоги после выполнения процедуры выбора кластеров тревог

Существует еще одна важная модификация, до сих пор ни разу не использовавшаяся, которую мы считаем необходимым ввести в практику применения алгоритма М8. Это параметр, определяющий размер скользящего временного окна Δt для выделения части каталога, которая будет анализироваться алгоритмом. До недавнего времени не было необходимости во введении такого окна по причине достаточно ограниченного временного интервала каталога, пригодного для использования алгоритмом М8. Так, стандартный тест алгоритма М8 использует весь имеющийся в распоряжении отрезок каталога NEIC от начала, определяемого полнотой (с 1963 года), до текущего времени. В Италии начало используемого каталога приходится на 1 января 1950 года. В этом случае при ретроспективном моделировании прогноза вперед в период с 1972 по 2001 год временной отрезок используемого каталога изменяется более, чем в 2 раза (с 22 лет до 51 года) и будет продолжать расти. При этом параметры активности (N) и ее отклонения от долговременного тренда (L) по модулю константы очевидно сходятся и утрачивают относительную информационную независимость. Для сохранения уровня информационной независимости достаточно зафиксировать величину временного отрезка каталога анализируемого алгоритмом. В Италии "скользящий период" исследования Δt выбран равным 30 годам.

Чтобы смоделировать эксперимент по прогнозу вперед, используя вышеописанную схему, расчеты по алгоритму М8 относились к периодам, оканчивающимся через каждые полгода с января 1972 года по январь 2002 года, в кругах, центры которых автоматически определялись по пространственному распределению эпицентров землетрясений малых магнитуд. Прогноз велся в двух различных диапазонах магнитуд при $M_0 = 6.5$ и $M_0 = 6.0$, которые далее обозначаются М6.5+ и М6.0+.

Проверка устойчивости новой схемы по отношению к изменению свободных параметров и окончательный выбор основного варианта ее применения на территории Италии были осуществлены в ходе следующих экспериментов. Рассмотрены варианты с различными способами определения шага по пространственной сетке s и с разными значениями параметра n , определяющего "большинство" в условии кластеризации тревог. (Параметры, отвечающие за выделение сейсмически активной территории (r и a), были изначально зафиксированы на величинах, позволяющих выделить достаточно тонкую структуру сейсмических поясов на всей территории, и оптимизация по ним не проводилась). Результат прогноза четырех сильнейших землетрясений Италии 1972–2001 гг. в любом из исследованных вариантов новой схемы тот же, что и при использовании стандартной схемы применения алгоритма (см. табл. 2) три из четырех землетрясений (Friuli, Irpinia, Vovce) пред-

сказаны, одно (Assisi) – пропущено. Единственное отличие состоит в величине пространственно-временного объема тревог и не превышает нескольких процентов. Подобная согласованность говорит об устойчивости предложенной схемы применения алгоритма M8 по отношению к вариации ее свободных параметров.

Нами использовалось два способа подсчета пространственно-временного объема тревог.

Первый способ учитывает реальное распределение сейсмичности в регионе. Рассматривается каталог землетрясений, представляющий сейсмическую активность на исследуемой территории за предшествующий продолжительный период времени, начиная с магнитуды, определяемой уровнем полноты каталога. В каждый момент времени пространственный процент тревоги определяется как отношение числа эпицентров из заданного каталога, которые попали в область, находящуюся на данный момент в состоянии тревоги, к общему количеству эпицентров, попавших в объединение всех кругов исследования алгоритма. Пространственно-временной объем тревоги вычисляется затем как усредненный пространственный процент тревоги по всему периоду диагностики. В Италии для этих вычислений брался каталог USI2001 всех толчков магнитуды 5.0 и выше за период с 1950 по 2000 год.

Второй способ более привычен и используется нами для иллюстрации консервативности первой оценки. В нем в каждый момент времени определяется отношение площади территории, находящейся в состоянии тревоги, к площади всей территории исследования; затем эти величины усредняются по всему периоду диагностики.

Результаты экспериментов с различными способами определения шага по пространственной сетке s представлены в табл.3.

ТАБЛИЦА 3. Пространственно-временной объем тревог в Италии в экспериментах с разными способами нормализации шага по пространственной сетке

Способ вычисления шага	M6.5+			M6.0+		
	Шаг по сетке s , град., N	Пр.-врем. объем тревог, %		Шаг по сетке s , град., N	Пр.-врем. объем тревог, %	
		По всем толчкам	По площади		По всем толчкам	По площади
Константа	0.25	38.3	30.4	0.25	29.5	29.1
0.15R	0.26	39.6	31.3	0.19	36.4	34.7
0.16R	0.28	39.6	30.9	0.20	35.1	33.7
1.0LS	0.25	38.3	30.9	0.15	41.9	40.3
1.2LS	0.30	34.6	26.2	0.18	37.5	36.5

Примечание. Жирным шрифтом выделен вариант, выбранный в качестве основного

Рассматривались следующие варианты

I. Постоянный шаг $s = 0.25^\circ$ широты (примерно 28 км по широте и от 25 до 30 км по долготе, т.е. порядка радиуса круга r , используемого для выделения сейсмически активной территории).

II. Шаг s пропорционален радиусу круга исследования R (коэффициенты пропорциональности 0.15 и 0.16), т.е. меняется при изменении M_0 в соответствии с константами алгоритма М8.

III. Шаг s пропорционален линейному размеру очага прогнозируемого землетрясения LS (коэффициент пропорциональности 1.0 и 1.2), т.е. тоже уменьшается при уменьшении M_0 .

Напомним, что в формуле (1) для вычисления диаметра круга исследования D к члену, пропорциональному линейному размеру очага ожидаемого землетрясения, добавлен 1° широты, что приводит к существенному различию вариантов II и III.

В варианте I с постоянным шагом по сетке s пространственно-временной объем тревог для М6.5+ получился существенно больше, чем для М6.0+, что не согласуется с результатами предыдущих применений алгоритма М8 в Италии [10] и глобальным тестом алгоритма по Тихоокеанскому сейсмическому поясу (см. табл. 1), где при уменьшении магнитуды прогнозируемого землетрясения объем тревог обычно возрастает. Такое соотношение может быть объяснено, отчасти, независимостью процессов подготовки землетрясений на различных, хотя и соседних, уровнях сейсмической иерархии.

Другой, более вероятной, причиной данного эффекта может служить введение в схему применения алгоритма новых свободных параметров, которые, возможно, нормализованы неадекватно. Так, шаг по пространственной сетке s не является параметром, независимым от пороговой величины M_0 , и существенно связан с параметром n , определяющим "большинство" в условии кластеризации тревог. При уменьшении M_0 область подготовки прогнозируемого землетрясения становится меньше, что ведет, при неизменном шаге по сетке, к меньшему числу кругов исследования, находящихся в состоянии тревоги, и, как следствие, к существенно меньшему числу кругов, удовлетворяющих условию кластеризации. Таким образом, определение "большинства" по сути становится более строгим.

В то же время, адекватная нормализация схемы при переходе к меньшему M_0 требует: а) соответствующего изменения шага по сетке s и одновременного уменьшения радиуса малого круга r пропорционально линейному размеру LS прогнозируемого землетрясения; б) уменьшения магнитудного порога, используемого для выделения сейсмически активной территории. Второе возможно только при уменьшении порога пред-

ставительности каталога. Недоступность более представительного каталога в настоящее время вынудила авторов ограничиться только нормализацией пространственного шага по сетке.

В вариантах II и III соотношения между пространственно-временным объемом тревог и величиной M_0 аналогичны тем, которые получены в стандартном тесте алгоритма M8. В качестве основного был выбран наиболее консервативный вариант (табл. 3), в котором шаг по сетке равен линейному размеру очага ожидаемого землетрясения ($1.0 LS$).

Результаты применения новой схемы прогноза по алгоритму M8 при различных значениях параметра n , определяющего "большинство" в условии кластеризации тревог, суммированы в табл. 4. Рассматривался основной вариант схемы с шагом по сетке s , равным линейному размеру очага прогнозируемого землетрясения. Неудивительно, что при использовании более строгого условия кластеризации пространственно-временной объем тревог уменьшается. Тем не менее, для дальнейшего мониторинга выбор сделан в пользу значения 75% с тем, чтобы избежать эффекта "переподгонки" на ограниченном числе примеров обучения.

ТАБЛИЦА 4. Пространственно-временной объем тревог (в %) на территории Италии в экспериментах с различными значениями параметра n в условии кластеризации

Параметр n	$M6.5+$		$M6.0+$	
	По всем толчкам	По площади	По всем толчкам	По площади
67%	43.1	34.6	46.0	42.9
75%	38.3	30.9	41.9	40.3
85%	36.5	29.3	39.7	37.8

Результат применения алгоритма M8 для прогноза сильнейших землетрясений Италии по новой схеме в основном варианте демонстрирует рис. 3. Землетрясения Assisi, 1997 г. и Voves, 1998 г. разделены во времени интервалом примерно в полгода и произошли в два последовательных полугодовых периода анализа алгоритма, которые характеризуются практически одинаковыми территориями тревог. Заметим, что во всех трех случаях эпицентры землетрясений оказались смещены по отношению к центру области тревог, что говорит в пользу гипотезы о том, что область подготовки сильного землетрясения не ограничивается его будущей эпицентральной зоной, а может простираться на расстояния, во много раз ее превышающие.

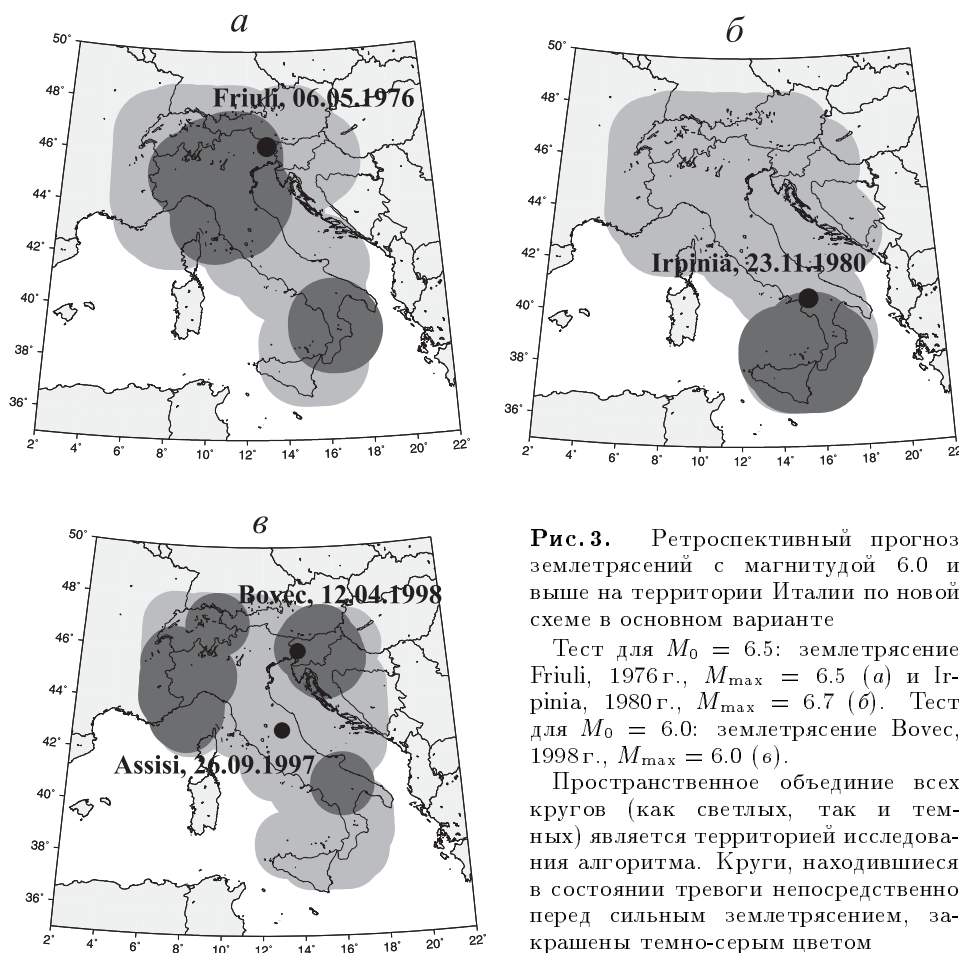


Рис. 3. Ретроспективный прогноз землетрясений с магнитудой 6.0 и выше на территории Италии по новой схеме в основном варианте

Тест для $M_0 = 6.5$: землетрясение Friuli, 1976 г., $M_{\max} = 6.5$ (а) и Irpinia, 1980 г., $M_{\max} = 6.7$ (б). Тест для $M_0 = 6.0$: землетрясение Bovis, 1998 г., $M_{\max} = 6.0$ (в).

Пространственное объединение всех кругов (как светлых, так и темных) является территорией исследования алгоритма. Круги, находившиеся в состоянии тревоги непосредственно перед сильным землетрясением, закрашены темно-серым цветом

Сравнение значений пространственно-временных объемов тревог, полученных в трех различных экспериментах по прогнозу землетрясений с магнитудой 6.0 и выше в Италии, представлено в табл. 5.

ТАБЛИЦА 5. Пространственно-временной объем тревог (в %) на территории Италии при использовании стандартной процедуры и новой схемы применения алгоритма M8

Эксперименты	$M_{6.5+}$		$M_{6.0+}$	
	По всем толчкам	По площади	По всем толчкам	По площади
PFGING, 1996	37.3	31.6	47.7	41.2
CCI+NEIC, 2000	34.8	26.0	33.7	32.0
Новая схема, 2001	38.3	30.9	41.9	40.3

Из табл. 5 видно, что в первом (1996) и втором (2000) экспериментах применялась стандартная схема алгоритма M8 в небольшом количестве редко расставленных кругов исследования [10, 11]. Все параметры алгоритма, за исключением каталогов землетрясений, в этих двух экспериментах полностью совпадают. В третьем эксперименте (2001) использовалась новая схема применения алгоритма M8 с автоматической расстановкой большого количества кругов исследования и процедурой кластеризации тревог [13, 14].

Предложенная схема позволяет избавиться от субъективизма при выборе областей исследования, принимая во внимание пространственное распределение сейсмической активности, и увеличивает стабильность и надежность прогноза, устраняя случайно возникающие тревоги. Как видно из табл. 5, в случае Италии все это достигается без какого-либо значительного увеличения пространственно-временного объема тревог.

4. Тестирование нового подхода на территории Калифорнии и Невады

Новая схема применения алгоритма M8 была протестирована нами на данных по территории Калифорнии и Невады в двух магнитудных диапазонах: M6.5+ и M7.0+. Использовался каталог NEIC [5], полноты которого в этом районе за период с 1963 по 2001 годы достаточно для применения стандартной версии алгоритма M8 (10 и 20 основных толчков в круге в год). Поскольку для 93% событий из рассматриваемой территории в каталоге NEIC приводится значение локально-калиброванной магнитуды M_l , магнитуда M в расчетах определялась однозначно в соответствии с приоритетом $M_l \gg M_S \gg m_b \gg M_p$ (M_p – прочие магнитуды).

Моделировался эксперимент по прогнозу вперед, для чего расчеты по алгоритму M8 относились к периодам, оканчивающимся через каждые полгода с января 1985 года по январь 2002 года в кругах, центры которых автоматически определялись по пространственному распределению эпицентров землетрясений малых магнитуд. Использовался основной вариант новой схемы с шагом по сетке, равным линейному размеру очага прогнозируемого землетрясения LS , и 75%-ным параметром n , определяющим понятие "большинства" в условии кластеризации тревог. На рис. 4 показаны эпицентры всех десяти землетрясений с магнитудой 6.5 и выше, которые произошли с 1985 по 2001 год на исследуемой территории.

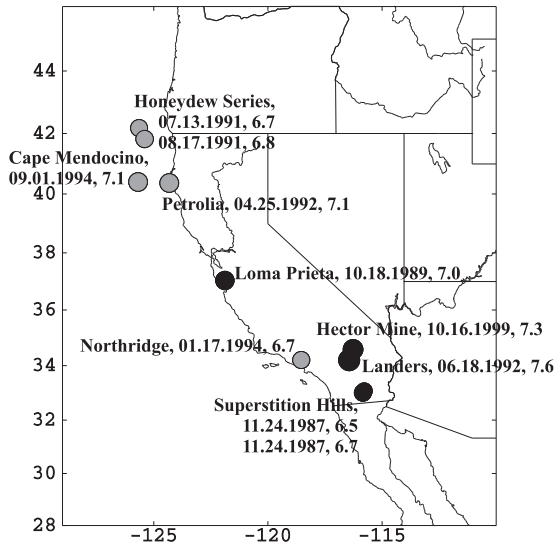


Рис. 4. Эпицентры землетрясений с магнитудой 6.5 и выше, которые произошли на территории Калифорнии и Невады в 1985–2001 гг.

Темно-серые кружки – землетрясения, предсказанные по новой схеме, светло-серые – пропущенные землетрясения

Результаты данного эксперимента суммированы в табл.6: пять из шести землетрясений, произошедших на территории, расположенной к югу от 40°N , предсказываются новой схемой алгоритма M8, а все четыре землетрясения, произошедшие к северу от этой широты (в районе мыса Мендосино и его окрестностей), пропускаются. Возможно, причины пропуска этих четырех землетрясений следует искать в тектонической особенности региона, обусловленной наличием на исследуемой территории трех различных тектонических плит: Тихоокеанской

ТАБЛИЦА 6. Результаты ретроспективного прогноза землетрясений Калифорнии и Невады по новой схеме алгоритма M8

Название землетрясения	Дата	Координаты		Глубина, км	M	Прогноз по M8
		широта $^{\circ}\text{N}$	долгота $^{\circ}\text{W}$			
Superstition Hills earthquake series	24.11.1987	33.08	115.78	4	6.5	Да
	24.11.1987	33.01	115.84	2	6.7	Да
Loma Prieta	18.10.1989	37.04	121.88	18	7.0	Да
Landers	28.06.1992	34.20	116.44	1	7.6	Да
Nothridge	17.01.1994	34.21	118.54	18	6.7	Нет
Hector Mine	16.10.1999	34.59	116.27	0	7.3	Да
Honeydew earthquake series	13.07.1991	42.18	125.64	11	6.7	Нет
	17.08.1991	41.82	125.40	13	6.8	Нет
Petrolia	25.04.1992	40.37	124.32	15	7.1	Нет
Cape Mendocino	01.09.1994	40.40	125.68	10	7.1	Нет

плиты, континентальной Северо-Американской и океанической плиты

Хуан де Фука – граница между двумя последними как раз проходит примерно на широте 40°N.

В табл. 7 приводятся значения пространственно-временных объемов тревог, полученных для всей исследуемой территории и для ее части, не включающей область мыса Мендосино (до 40°N).

ТАБЛИЦА 7. Пространственно-временной объем тревог (в %) на территории Калифорнии и Невады

Территория	M7.0+		M6.5+	
	По всем толчкам	По площади	По всем толчкам	По площади
Вся территория	24.3	21.0	20.7	15.7
Без мыса Мендосино	27.3	18.8	23.6	18.4

Видно, что эти значения в Калифорнии примерно в полтора раза меньше тех, которые были получены в Италии. Одной из причин этого может быть использование в данном эксперименте каталога NEIC, представляющего более надежные и однородные сейсмические данные по сравнению с итальянским каталогом. Это позволило работать со стандартным для M8 более высоким порогом среднегодовой активности в кругах исследования, что, по-видимому, сказалось на диагностике тревог, увеличив ее стабильность и надежность.

Нами также были проведены эксперименты по прогнозу сильных землетрясений Калифорнии и Невады по новой схеме с использованием различных способов определения шага по пространственной сетке, тестирувавшихся в Италии. Во всех рассматриваемых вариантах набор предсказанных и пропущенных землетрясений одинаков. Различие в величине пространственно-временного объема не превосходит нескольких процентов. Таким образом, новая схема так же, как и в случае Италии, демонстрирует стабильность по отношению к изменению свободных параметров.

Обсуждение

Важным является вопрос о том, на какой диапазон магнитуд следует распространять прогноз алгоритма M8 при работе с последовательными значениями M_0 . В глобальном тесте алгоритма M8, спроектированном для прогноза сильнейших землетрясений мира, считается, что прогноз распространяется на землетрясения, имеющие магнитуду больше, либо равную M_0 , т.е. на землетрясения с $M \geq 8.0$. То же самое

предполагается, когда прогноз ведется для $M_0 = 7.5$. В случае, когда алгоритм М8 последовательно применяется для прогноза землетрясений во многих магнитудных диапазонах, размер кругов исследования для меньших величин M_0 перестает адекватно представлять размер зоны подготовки землетрясений из больших магнитудных диапазонов. Следовательно, анализ должен предполагать наличие набора интервалов $M_0 \leq M \leq M_0 + \Delta M$ и таким образом обеспечивать иерархию прогноза по отношению к магнитудным диапазонам M_0+ . Ширина магнитудного диапазона ΔM характеризует неопределенность линейного размера ожидаемого землетрясения $L(M_0)$. В практических приложениях $\Delta M = 0.5$ может быть слишком мало, в то время как $\Delta M = 1$ уже слишком велико, поскольку площадь очага сильных событий на верхней границе диапазона на порядок превышает площадь очага землетрясений с магнитудой M_0 . Такой разброс не соответствует пространственной точности прогноза, постулируемой алгоритмом, и практически не наблюдался как в ретроспекциях [2], так и в глобальном тесте М8 [4, 6, 7]. Поэтому необходимо в каждом конкретном регионе анализировать материал обучения с тем, чтобы по возможности "оптимизировать" значение величины ΔM . В проведенных нами исследованиях оказалось, что при прогнозе землетрясений на территории Италии $\Delta M = 0.5$ является адекватным магнитудным диапазоном, в то время как в Калифорнии и Неваде наилучшим, по-видимому, является несколько большее значение ΔM .

Отметим, что новая схема применения алгоритма М8 работает с переменным набором кругов исследования в отличие от стандартной методики, в которой количество кругов и их расположение фиксируется перед началом эксперимента. Это обусловлено способом выбора локально сейсмически активных мест, используемых в качестве центров кругов исследования, на основе анализа каталога в скользящем временном окне. С возрастанием представительности каталога увеличивается область, где возможно применение алгоритма. Однако, как и в стандартной схеме, не представляется сложной проблема мониторинга тревоги в любой конкретной точке исследуемой территории.

Выбирая локально сейсмически активные места в качестве центров кругов исследования алгоритма М8, мы добиваемся расположения областей исследования вдоль осей сейсмических поясов. Однако такая процедура не гарантирует от всех противоречий, связанных с несоответствием размера круга исследования размеру попавшей в него части сейсмической зоны. Например, в случае изолированного в пространстве локально активного участка территории, удаленного от основного сейсмического пояса на расстояние чуть меньше радиуса круга исследова-

ния, уровня сейсмической активности в круге исследования с центром в этом локально активном месте может, тем не менее, оказаться достаточно для формального применения алгоритма М8. При этом диагностика повышенной вероятности возникновения сильного землетрясения будет проводиться на основе анализа процессов, происходящих на двух небольших и, возможно, тектонически независимых сейсмических территориях. В этом примере более адекватной была бы процедура выделения узлов сетки для дальнейшего использования их в качестве центров кругов алгоритма М8, которая следит за сохранением достаточно высокого уровня сейсмической активности в иерархии последовательно расширяющихся кругов.

Предложенная нами методика не позволяет, пока, учесть все сложности, которые могут возникнуть на практике, и, безусловно, допускает дальнейшие улучшения и доработки. В частности, не рассматривалось соответствие предлагаемой здесь методики циклу работ по распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений, хотя для обеих территорий такие работы проводились [15–17]. Тем не менее, уже сейчас очевидно преимущество методики по отношению к использованию М8 "глобально-повсеместно" без какого-либо учета особенностей пространственного распределения сейсмичности, как это делалось до последнего времени в работах Б. Минстера и Н. Уилльямс [18, 19]. Осреднение и рандомизация прогноза безусловно способны увеличить надежность диагностики тревог, и работы в этом направлении будут продолжены. В частности, вслед за выделением по новой схеме сейсмически активной территории следует изучить вопрос о ее границах и дополнительно исследовать условие кластеризации, которое очевидно неодинаково во внутренних и пограничных точках.

Таким образом, нами разработана новая пространственно-стабилизированная схема применения алгоритма М8. Эта схема принимает во внимание естественное распределение сейсмической активности, устраняет неоднозначность в определении областей исследования и обеспечивает дополнительную стабильность прогноза по отношению к стандартному варианту алгоритма М8. По результатам ретроспективного тестирования предложенной схемы на данных по территории Италии и прилегающих регионов можно сделать вывод, что это повышение надежности достигается без каких-либо значительных потерь в эффективности прогноза. А именно, список предсказанных землетрясений Италии остался тот же, что и в предшествующих применениях стандартной схемы алгоритма, при практически неизменной величине пространственно-временного объема тревог. Дополнительное тестирование новой схемы на данных по территории Калифорнии и Невады по-

высило уверенность в ее эффективности. Прделанные эксперименты уже в настоящее время могут служить основой для систематического среднесрочного прогноза сильных землетрясений Италии и Калифорнии в реальном времени. Вопрос об использовании новой схемы в ведущемся глобальном тесте алгоритма M8 требует специального исследования.

Авторы признательны И.А.Воробьевой и П.Н.Шебалину за высказанные замечания и предложения по улучшению содержания и текста статьи.

Работа выполнена при частичной поддержке Международного научно-технического центра (проект N 1538-00), Российского фонда фундаментальных исследований (проект N 00-15-98507) и Фонда Джеймса МакДоннелла (the 21st Century Collaborative Activity Award for Studying Complex Systems, project "Understanding and Prediction of Critical Transitions in Complex Systems").

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кейлис-Борок В.И., Кособокков В.Г.* Периоды повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира // Математические методы в сейсмологии и геодинамике. М.: Наука, 1986. С.48–58. (Вычисл. сейсмология; Вып.19).
2. *Keilis-Borok V.I., Kossobokov V.G.* Preliminary activation of seismic flow: Algorithm M8 // Phys. Earth Planet. Inter. 1990. Vol.61, N 1–2. P.73–83.
3. *Kossobokov V.G.* User Manual for M8 / Eds Healy J.H., Keilis-Borok V.I., Lee W.H.K. // Algorithms for earthquake statistics and prediction (IASPEI Software Library, Vol.6.) El Cerrito, CA: Seism. Soc. Amer. 1977. P.167–221.
4. *Healy J.H., Kossobokov V.G., Dewey J.W.* A test to evaluate the earthquake prediction algorithm, M8 // USGS Open-File Rep. 1992. Iss. 401. 23 p.
5. Global Hypocenters Data Base, 2002. CD-ROM NEIC/USGS, Denver. CO. 1989 and its updates through January 2002.
6. *Kossobokov V.G., Healy J.H., Dewey J.W.* Testing an earthquake prediction algorithm // Pure Appl. Geophys. 1997. Vol.149. P.219–232.
7. *Kossobokov V.G., Romashkova L.L., Keilis-Borok V.I., Healy J.H.* Testing earthquake prediction algorithms: statistically significant advance prediction of the largest earthquakes in the Circum-Pacific, 1992–1997 // Phys. Earth Planet. Inter. 1999. Vol.111. P.187–196.
8. *Gabrielov A., Newman W.I., Turcotte D.L.* An exactly soluble hierarchical clustering model: inverse cascades, self-similarity, and scaling // Phys. Rev. E. 1999. Vol.60. P.5293–5300.
9. *Gabrielov A., Keilis-Borok V., Zaliapin I., Newman W.I.* Critical transitions in colliding cascades // Phys. Rev. E. 2000. Vol.62, N1. P.237–249.
10. *Romachkova L.L., Kossobokov V.G., Panza G.F., Costa G.* Intermediate-term prediction of earthquakes in Italy: Algorithm M8 // Pure Appl. Geophys. 1998. Vol.152. P.37–55.

11. *Romashkova L.L., Kossobokov V.G., Panza G.F., Peresan A.* Comparative analysis of the intermediate-term prediction of earthquakes in Italy by different catalogues: Algorithm M8. Report. Trieste: ICTP, 2000. 27 p.
12. *Кособоков В.Г., Мажкенов С.А.* Диагностика периодов повышенной вероятности сильных землетрясений в Восточном Тянь-Шане по алгоритму M8 // Теория и алгоритмы интерпретации геофизических данных. М.: Наука. 1989. С.41–45. (Вычисл. сейсмология; Вып.22).
13. *Romashkova L.L., Kossobokov V.G., Peresan A., Panza G.F.* Intermediate-term medium-range earthquake prediction algorithm M8: A new spatially stabilized application in Italy. Internal report, IC/IR/2001/21. Trieste: ICTP, 2001. 33 p.
14. *Kossobokov V.G., Romashkova L.L., Panza G.F., Peresan A.* Stabilizing intermediate-term medium-range earthquake predictions // J. Seism. Earthq. Engin. 2002 (in press).
15. *Горшков А.И., Кануто М., Кейлис-Борок В.И., Офицерова Е.И., Раницман Е.Я., Ротвайн И.М.* Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. IX. Италия, $M \geq 6,0$ // Теория и анализ сейсмологических наблюдений. М.: Наука, 1979. С.3–17 (Вычисл.сейсмология; Вып.12).
16. *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.
17. *Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Кейлис-Борок В.И., Кнопоф Л., Пресс Ф., Раницман Е.Я.* Условия возникновения сильных землетрясений (Калифорния и некоторые другие регионы) // Исследование сейсмичности и моделей Земли. М.: Наука, 1976. С.3–91. (Вычисл. сейсмология; Вып.9).
18. *Minster J.B., Williams N.P.* The "M8" intermediate term earthquake prediction algorithm: An independent assessment // EOS, Transactions, 1992. Vol.73, N43. AGU, Fall Meeting. P.366.
19. *Minster J.B., Williams N.P.* Intermediate term earthquake prediction algorithms // SCEC, Progress Report, 1996. P.491–496.