

УДК 550.341

ДИАГНОСТИКА ПЕРИОДОВ ПОВЫШЕННОЙ ВЕРОЯТНОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ПАМИРЕ И ЮЖНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ ПО АЛГОРИТМУ КН И ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕГИОНА

В.В. Рожкова

*Международный институт теории прогноза землетрясений
и математической геофизики Российской академии наук*

Работа посвящена прогнозу сильнейших землетрясений (магнитуда $M \geq 7.2$) на территории Памира и Южного Тянь-Шаня. На основании современных неотектонических представлений предложена геолого-геодинамическая модель, с учетом которой алгоритм КН дает более точные и устойчивые результаты по сравнению с аналогичными исследованиями, проведенными в этом регионе ранее. Ретроспективно периоды повышенной вероятности (ППВ) сильных землетрясений, диагностированные алгоритмом, предшествовали всем пяти сильным землетрясениям с $M \geq 7.2$, произошедшим в этом районе за период с 1967 по 1994 г. Общая длительность ППВ составила 32.3% от рассмотренного периода. Результаты проведенного исследования показывают, что учет геодинамики и геологического строения района позволяет точнее определить область локализации предвестников сильных событий.

ANALYSIS OF TIMES OF INCREASED PROBABILITY OF EARTHQUAKE OCCURRENCE FOR PAMIR AND SOUTHERN TIEN SHAN USING THE CN ALGORITHM AND A REGIONAL GEODYNAMIC MODEL

V.V. Rozhkova

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

This study is deals with intermediate-term prediction of large earthquakes ($M \geq 7.2$) for the Pamir – Tien Shan region. A geological geodynamic model is proposed based on contemporary neotectonic concepts. Algorithm CN, when used with this model, gives more accurate and stable results as compared to the previous studies. Times of increased probability (TIP's) of large earthquakes diagnosed by the CN algorithm precede all five large earthquakes. The total duration of TIP's is 32.3% of the observation period. These results confirm that consideration of geodynamic and geological structure of a region allows one to determine the locations of earthquake precursors with better precision.

ВВЕДЕНИЕ

Задача прогноза сильных землетрясений для территории Памира и Южного Тянь-Шаня неоднократно рассматривалась различными исследователями [1-5]. Остановимся кратко на работах, которые представляют для нас наибольший интерес с точки зрения выбора регионов для проведения среднесрочного прогноза [1-3]. Регионализация, использованная в этих работах, показана на рис. 1.

В работе [1] для решения задачи прогноза на территории Памира и Южного Тянь-Шаня (рис. 1, а) применялся алгоритм, основанный на комбинации двух предвестников: удаленных афтершоков и сейсмического затишья. В качестве предсказываемых рассматривались землетрясения с $M \geq 6.3$ для периода с 1938 по 1969 г.

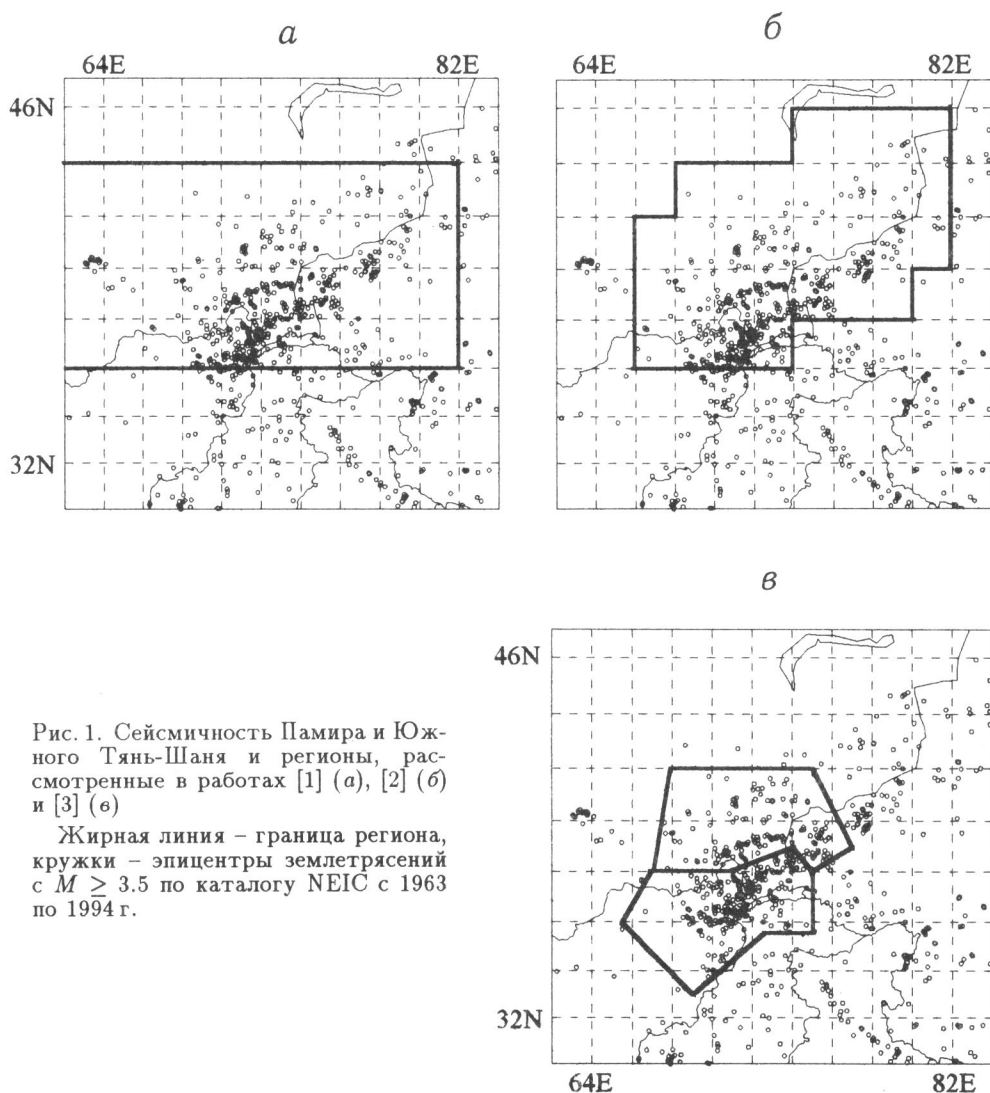


Рис. 1. Сейсмичность Памира и Южного Тянь-Шаня и регионы, рассмотренные в работах [1] (а), [2] (б) и [3] (в)

Жирная линия – граница региона, кружки – эпицентры землетрясений с $M \geq 3.5$ по каталогу NEIC с 1963 по 1994 г.

и с $M \geq 6.5$ для периода с 1970 по 1987 г. Результаты ретроспективного прогноза кратко можно сформулировать следующим образом: в пространственно-временную область повышенной вероятности сильных землетрясений, составляющую от 34 до 50%, попадает 80% сильных событий.

В работе [2] рассматриваемая территория (рис. 1, б) сканировалась окнами размером $40^\circ \times 40^\circ$. Для каждого из окон определялся период повышенной вероятности (ППВ) сильных землетрясений по комплексу сейсмологических предвестников (алгоритм М8). За десятилетний период (1975–1985 гг.) четыре из пяти землетрясений с $M \geq 6.5$ предварялись ППВ. Суммарно пространственно-временной объем ППВ составил 28%.

В работе [3] для рассматриваемого региона (рис. 1, в) решалась задача ретроспективного прогноза землетрясений с $M \geq 6.4$ за период с 1970 по 1991 г. Используемый алгоритм прогноза КН, так же как и М8, основан на комплексе сейсмологических предвестников, определяемых для региона в целом. Результаты прогноза: предсказаны пять из шести сильных землетрясений; общее время тревог для Памира – 46%, для восточной части Южного Тянь-Шаня – 22.4%.

В работах [1, 2] выбор региона для решения задачи ретроспективного прогноза обуславливался территориальными рамками используемых каталогов – в них использован каталог "Землетрясения в СССР" [6]. В работе [3], где использовался каталог NEIC [7], регионализация проведена с учетом сейсмической обстановки на выбранной территории. Тем не менее суммарная длительность ППВ довольно велика: для территории Памира ППВ занимает почти половину времени, а для восточной части Южного Тянь-Шаня при ППВ 22.4% предсказаны два события из трех.

Таким образом, при несомненных положительных результатах ретроспективного прогноза для территории Памира и Южного Тянь-Шаня, в работах [1-3] допущены пропуски цели, т. е. для ряда сильных землетрясений не были диагностированы ППВ. Целью данной работы является попытка, используя данные о геологическом строении и геодинамике, задать регионализацию, которая бы обеспечила ретроспективный прогноз всех сильных сейсмических событий на данной территории, и уменьшить суммарную длительность ППВ.

Опыт использования алгоритма КН показал, что результаты прогноза существенно зависят от выбора региона. Так, в работе [8] регионализация территории Малой Азии проводилась с учетом существующих представлений о тектонических взаимодействиях отдельных геологических структур в пределах исследуемого полигона. Это позволило авторам значительно улучшить качество среднесрочного прогноза. В предлагаемой работе этот опыт используется для территории Памира и Южного Тянь-Шаня.

Практически все алгоритмы среднесрочного прогноза основаны на гипотезе, что предвестники сильных сейсмических событий формируются в той же тектонической структуре, где ожидается последующее сильное землетрясение. Однако исследования удаленного взаимодействия событий в сейсмическом процессе [1, 9] установили зависимость последовательностей землетрясений в разных, но тектонически связанных, регионах.

В данной работе была сделана попытка обнаружить такую зависимость в двух геодинамически связанных регионах и использовать ее для прогноза сильных сейсмических событий. С этой целью мы проводили регионализацию, исходя из

представлений о геодинамической обстановке в исследуемом районе. Ретроспективный прогноз проведен с помощью алгоритма КН, основанного на поиске аномальных вариаций сейсмического потока [10].

РЕГИОНАЛИЗАЦИЯ ТЕРРИТОРИИ ПАМИРА И ЮЖНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ С УЧЕТОМ ГЕОДИНАМИКИ РЕГИОНА

Изучаемая территория, которая включает Южный Тянь-Шань, Дарваз, Памир, отроги Гиндукуша и Кунь-Луня, расположена в зоне сочленения Лавразийского и Гондванского континентов.

Современная геодинамика этой территории определяется давлением докембрийской Индийской плиты с юга на субширотные складчатые системы мезо-палеозойского возраста, обрамляющие Лавразию с юга. В результате возникла сложная система покровов, чешуй, блоков различного состава, возраста и строения, которые образуют узел максимального многослойного совмещения на Памире. На восток и на запад от Памира чешуи веерообразно расходятся. Вне узла тектонические структуры постепенно упрощаются, переходя в линейные чешуйчатые покровы и складки коллизионных поясов Гималаев, Каракорума, Гиндукуша.

Памирский блок архейско-протерозойской консолидации, зажаты внутри мезозойского коллизионного пояса, определяет анизотропию распределения напряжений в данном районе.

Консолидированный блок Памира разделен на три дугообразные структуры, характеризующиеся чешуйчатым строением, созданным в результате напользания южных блоков на северные [11]. Активная структура развивается в центральной части Памира, образуя дугу, выпуклую к северу. Эта структура разделяет блок Памира на юго-западную и юго-восточную части с обширными выходами древнейших раннедокембрийских комплексов, возраст которых превышает 1.8–2.6 млрд. лет. На востоке эти комплексы частично перекрыты более молодыми мезокайнозойскими покровами. Геоморфологически эта структура отчетливо проявляется в рельефе. Здесь был выделен регион I (рис. 2).

Самый северный из блоков Памира, образуя (так же, как и первая выделенная структура) дугу, выпуклую к северу, надвигается на структуры Южного Тянь-Шаня, создавая активную тектоническую зону на границе Памира и Тянь-Шаня (регион II на рис. 2). Обширный блок Южного Тянь-Шаня выделен в регион III.

Давление, оказываемое Индийской плитой,двигающейся в северном направлении, может стать причиной распространения напряжений (а поэтому и последовательности сейсмических событий) на рассматриваемой территории с юга на север.

Пространственное распределение землетрясений по каталогу NEIC за период с 1963 по 1994 г. представлено на рис. 2,а. Выделяются два сейсмически активных пояса: один из них (в регионе I) приурочен к линии Мургаб – Хорог – Курган-Тюбе – Термез – и на юг в Афганистан до 35.5° N, другой – к зоне сочленения Памира и Южного Тянь-Шаня (регион II). К северу от этих поясов (в регионе III) количество землетрясений заметно убывает.

Пространственное распределение нормальных (с глубиной гипоцентра $h < 60$ км) землетрясений (см. рис. 2,б) в целом повторяет общую картину сейсмичности. Глубокофокусные ($h > 60$ км) землетрясения (рис. 2,в) практически все сосредоточены вдоль первого выделенного пояса (регион I).

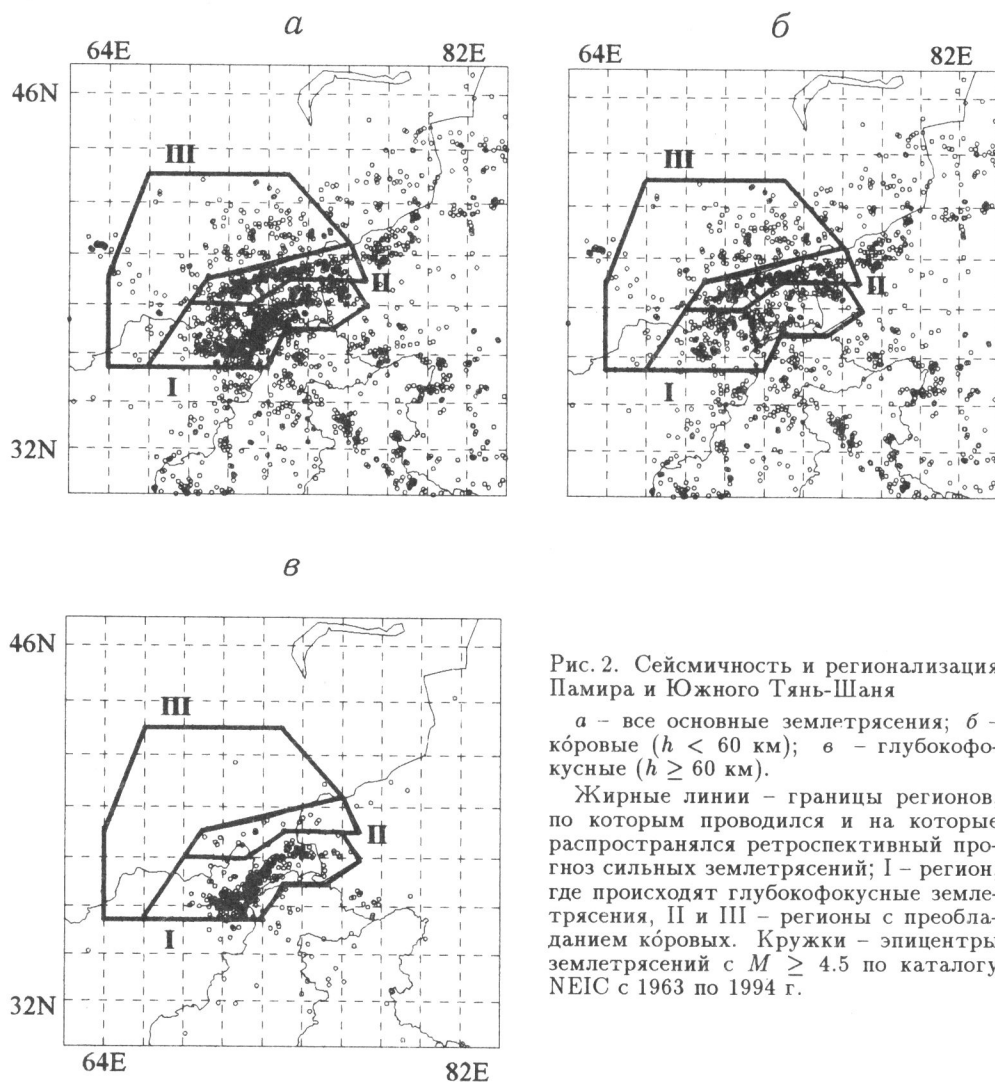


Рис. 2. Сейсмичность и регионализация Памира и Южного Тянь-Шаня

a – все основные землетрясения; *б* – коровые ($h < 60$ км); *в* – глубокофокусные ($h \geq 60$ км).

Жирные линии – границы регионов, по которым проводился и на которые распространялся ретроспективный прогноз сильных землетрясений; I – регион, где происходят глубокофокусные землетрясения, II и III – регионы с преобладанием коровых. Кружки – эпицентры землетрясений с $M \geq 4.5$ по каталогу NEIC с 1963 по 1994 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА КН

Напомним кратко схему работы алгоритма КН. Сейсмичность региона описывается определенным набором характеристик сейсмического потока. Каждая из этих характеристик представляется одной или несколькими функциями, значения которых вычисляются в скользящем временном окне. ППВ диагностируется, когда значения этих функций встречаются в комбинациях, типичных для предвестниковых явлений, и отменяются, когда значение функции, отвечающей за выделившуюся в виде землетрясений энергию напряжений, превышает определенное значение параметра алгоритма.

Геодинамика исследуемой территории (см. рис. 2, регионы I, II, III) позволяет предположить, что предвестники сильных событий для всей территории могут формироваться в ограниченной ее части (регионе I), включающей пояс землетрясений с гипоцентрами глубже 60 км.

С целью проверки этой гипотезы методика применения алгоритма КН была изменена следующим образом: значения функций характеристик сейсмического потока рассчитывались для выбранного региона I и для этого же региона рассчитывалось значение выделенной энергии напряжений, при этом предвестниковые явления определялись для сильных событий на всей исследуемой территории (регион I + регион II + регион III).

Пороговое значение магнитуды $M_0 = 7.2$ выбрано, исходя из следующего условия: прогнозируемые события случаются в пределах исследуемой территории в среднем один раз в 6–8 лет. Используемый в работе мировой каталог NEIC [7] для исследуемой территории имеет необходимую представительность с 1963 г. На этой территории (см. рис. 2) за период с 1963 по 1995 г. в каталоге NEIC зарегистрировано шесть сильных землетрясений с $M_0 \geq 7.2$ (см. таблицу, (а)). Имея данные о землетрясениях с 1963 г., мы можем рассчитывать функции и диагностировать ППВ с 1968 г.; за период с 1968 по 1995 г. в каталоге NEIC зарегистрировано пять сильных землетрясений с $M_0 \geq 7.2$. Результат применения алгоритма с указан-

Землетрясения с магнитудой $M > M_0$

Дата	Координаты		Глубина, км	Магнитуда
	φ° N	λ° E		

(а) $M \geq 7.2$, каталог NEIC, регионы I+II+III, 1963-1995гг.

14.03.1965	36.30	70.70	219	7.5
30.07.1974	36.35	70.76	211	7.4
11.08.1974	39.45	73.83	9	7.3
30.12.1983	36.37	70.73	215	7.2
23.08.1985	39.43	75.22	7	7.5
19.08.1992	42.14	73.58	27	7.5

(б) $M \geq 6.9$, каталог NEIC, регион I, 1963-1995гг.

14.03.1965	36.30	70.70	219	7.5
30.07.1974	36.35	70.76	211	7.4
16.12.1982	36.14	69.01	36	6.9
30.12.1983	36.37	70.73	215	7.2
09.08.1993	36.36	70.85	230	6.9

(в) $M \geq 7.2$, каталог "Землетрясения в СССР",
регионы I+II+III, 1955-1990гг.

14.03.1965	36.40	70.50	215	7.5
30.07.1974	36.50	70.70	200	7.3
11.08.1974	39.40	73.90	5	7.3
23.08.1985	39.00	75.70	0	7.2

ными выше изменениями в методике: ППВ предшествуют всем пяти сильным событиям 1968–1995 гг.; суммарная длительность ППВ (время тревог) равна 118 мес, что составляет 38.1% от общего времени (рис. 3, а).

Для того чтобы ответить на вопрос: действительно ли предвестники сформировались только за счет сейсмических событий в регионе I, алгоритм КН был применен на всей территории в целом. Результат прогноза: предсказано два из пяти сильных землетрясений; увеличилось количество ППВ, за которыми не следует сильное событие (ложные тревоги); суммарное время тревог составило 124 мес и тем самым увеличилось до 40% от общего времени (рис. 3, б). Таким образом, результат этого прогноза отличается от предыдущего в худшую сторону, поскольку фоновая сейсмичность территории в целом "забивает" сейсмический поток, ответственный за формирование предвестниковых явлений.

Однако возникает вопрос, не являются ли предвестники, сформированные в регионе I, предвестниками меньших по магнитуде событий в пределах этого региона. Пороговое значение M_0 для сильных землетрясений региона I было снижено до 6.9,

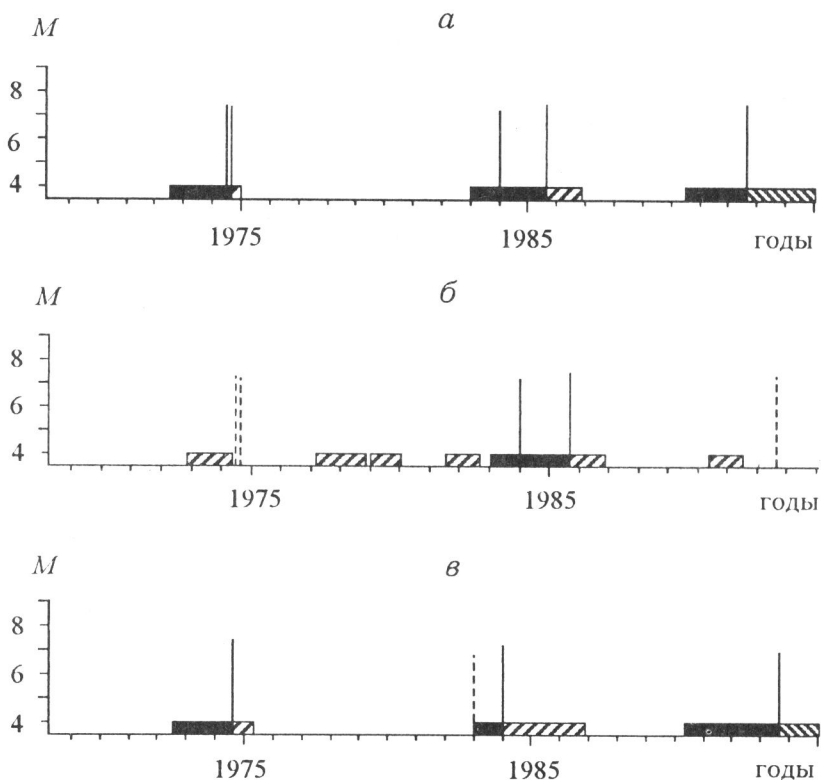


Рис. 3. ППВ и сильные землетрясения на территории Памира и Южного Тянь-Шаня

а – по всем землетрясениям региона I для регионов I + II + III; б – по землетрясениям регионов I + II + III для регионов I + II + III; в – по землетрясениям региона I для региона I.

Вертикальная сплошная линия – сильное землетрясение, которому предшествовала тревога, штриховая – пропуск цели; ■ – ППВ, предшествующий сильному землетрясению, ▨ – ложная тревога, ▩ – пропуск цели.

с тем, чтобы их число за период с 1963 по 1994 г. приблизительно совпало с числом сильных событий, выделенных для всей исследуемой территории. С 1968 по 1995 г. (период, для которого мы можем рассчитывать функции и диагностировать ППВ) в регионе I, согласно каталогу NEIC, зарегистрировано четыре землетрясения с $M_0 \geq 6.9$ (см. таблицу, (б)). По результатам прогноза (рис. 3, в) время тревоги увеличилось до 40%; из четырех ретроспективно предсказаны три события, причем пропущенное событие имеет в каталоге NEIC магнитуду 6.9, что дает основание предполагать, что оно ответственно за формирование предвестников.

Заметим, что алгоритм КН обычно применялся в областях с коровой сейсмичностью. Исключение составляли территории Вранча в Румынии [12], где большинство сейсмических событий происходит на промежуточной глубине, и Малые Антильские острова [13], расположенные в зоне субдукции. Если во Вранче и сильные события и их предвестники происходят на глубинах от 60 до 170 км, то на Малых Антильских островах они локализованы на глубинах до 40 км. Для рассматриваемой в этой работе территории вопрос о том, на каких глубинах формируются предвестники, представляет несомненный интерес. Поэтому, помимо

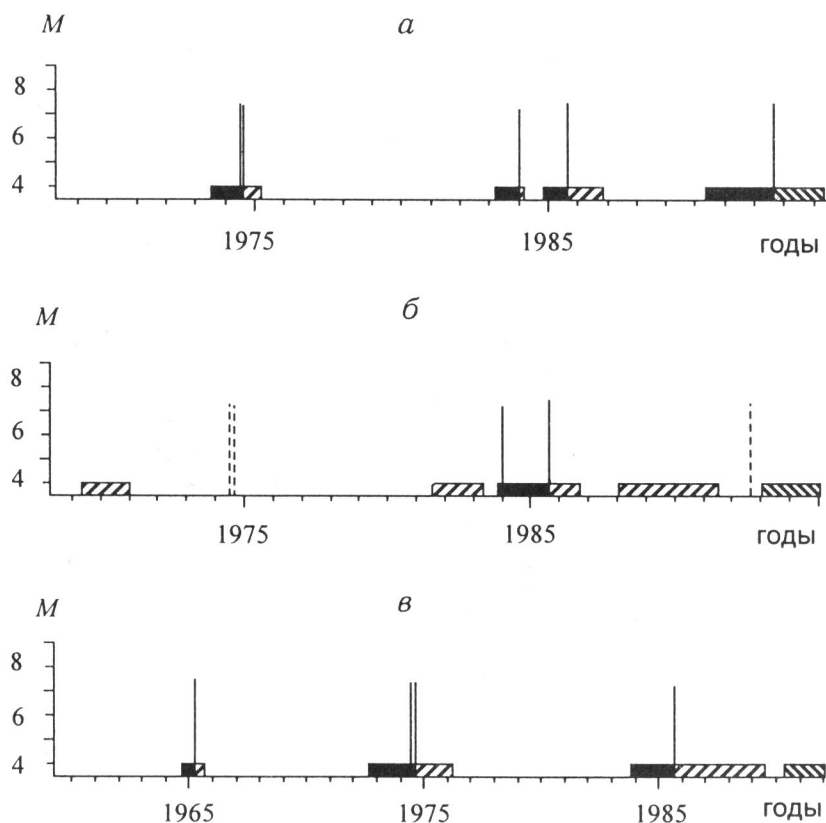


Рис. 4. ППВ и сильные землетрясения на территории Памира и Южного Тянь-Шаня
 а – по коровым землетрясениям ($h < 60$ км); б – по глубокофокусным ($h \geq 60$ км);
 в – по землетрясениям из каталога [6]

Обозначения, как на рис. 3

основного (см. рис. 3,а), было рассмотрено еще два варианта прогноза: по кóровым и по глубокофокусным событиям региона I для регионов I+II+III.

При исключении землетрясений с гипоцентрами глубже 60 км из рассматриваемого множества сейсмических событий региона I результат прогноза улучшился: *ППВ предшествуют всем пяти сильным землетрясениям (с $M_0 \geq 7.2$) 1968–1995 гг., а суммарное время тревог уменьшилось и составило 100 мес (или 32.3% от общего времени)* (рис. 4,а).

При попытке дать прогноз на исследуемую территорию только по глубокофокусным событиям выделенного региона результат значительно ухудшился, что видно на рис. 4,б: ретроспективно предсказано лишь два из пяти сильных событий, увеличилось количество ложных тревог, суммарное время ППВ составило 130 мес (или 41.9% от общего времени). Таким образом, регион I действительно ответствен за формирование предвестниковых явлений для данной территории, причем последовательность глубокофокусных событий, зарегистрированных в нем, не влияет на формирование предвестниковых характеристик алгоритма КН.

КОНТРОЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для проверки устойчивости результатов прогноза по отношению к выбранному каталогу прогноз для всей территории был повторен с использованием каталога, подготовленного Таджикским институтом сейсмостойкого строительства и сейсмологии за период 1955 по 1985 г. и дополненный за период с 1985 по 1990 г. по каталогу "Землетрясения в СССР" [6]. Список сильных ($M_0 \geq 7.2$) землетрясений (см. таблицу, (в)) отличается от аналогичного списка для каталога NEIC (см. таблицу, (а)). Каталог имеет для исследуемой территории необходимую представительность с 1955 по 1990 г. – этим объясняется возможность предсказывать событие 14.03.1965 г. Землетрясение 30.12.1983 г., имеющее по каталогу NEIC [7] магнитуду 7.2, в каталоге [6] зарегистрировано с магнитудой 6.99. Так как представительность каталога [6] ограничена 1990 г., событие 19.08.1992 г. в список предсказываемых не попадает. Результат прогноза представлен на рис. 4,в. Ретроспективно предсказываются четыре из четырех сильных событий; суммарная длительность ППВ составляет 130 мес, или 34% от общего времени; текущая тревога с 01.05.1990 г., вероятно, отвечает за землетрясение 19.08.1992 г., не представленное в каталоге, который оканчивается декабрем 1990 г.

Таким образом, прогноз по каталогу [6] фактически повторяет результат, полученный по каталогу NEIC. С учетом сравнительно более слабой представительности каталога [6] для территории Афганистана, Пакистана и Китая результат прогноза может считаться вполне устойчивым.

ВЫВОДЫ

Учет геолого-геодинамической обстановки рассмотренной территории позволили предложить более адекватную регионализацию Памира и Южного Тянь-Шаня. В результате удалось улучшить ретроспективный прогноз на этой территории.

Сейсмологические предвестники формируются в наиболее тектонически активных зонах. При этом сильные землетрясения, являющиеся следствием активности этих зон, могут происходить и на других, но тектонически взаимосвязанных с ними, территориях.

Как и для Малых Антильских островов, оказалось, что даже при наличии глубокофокусных событий в сейсмическом потоке региона, предвестники сильных землетрясений, используемые алгоритмом КН, формируются, в основном, за счет коровых событий.

Результат ретроспективного прогноза для Памира и Южного Тянь-Шаня устойчив по отношению к используемому каталогу.

Благодарности. Автор благодарен академику Д.В. Рундквисту и доктору физ.-мат. наук И.М. Ротвайну за постоянное внимание и консультации в ходе работы и помощь в обсуждении результатов. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 94-05-16599) и ИНТАС (грант INTAS 93-457).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Прозоров А.Г.* Алгоритм прогноза землетрясений для региона Памира и Тянь-Шаня по комбинации удаленных афтершоков и затиший // Компьютерный анализ геофизических полей. М.: Наука, 1990. С.75-84. (Вычисл. сейсмология; Вып.23).
2. *Кособоков В.Г., Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х.* Испытание алгоритма М8. Восток Средней Азии // Долгосрочный прогноз землетрясений. М.: Наука, 1986. С.96-97.
3. *Gahalaut V.K., Kuznetsov I.V., Rotwain I.M., Gabrielov A.M., Keilis-Borok V.I.* Application of pattern recognition algorithm in the seismic belts of Indian convergent plate margin – CN algorithm // Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet. Sci.). Vol.101, N 3. 1992. P.227-238.
4. *Негматуллаев С.Х., Ротвайн И.М., Сидоренко Т.В.* Долгосрочные сейсмологические предвестники сильных землетрясений. II. Памир и Тянь-Шань // Математические модели строения Земли и прогноза землетрясений. М.: Наука, 1982. С.11-15. (Вычисл. сейсмология; Вып.14).
5. *Речицкая Н.Н.* Взрывы афтершоков и сильные землетрясения в трех регионах востока Средней Азии // Теория и анализ сейсмологической информации. М.: Наука, 1985. С.113-116. (Вычисл. сейсмология; Вып. 18).
6. *Землетрясения в СССР, 1962–1985гг.* М.: Наука.
7. *World's hypocenters data file 1900–1993.* USGS-NEIC, USA. 1993.
8. *Рундквист Д.В., Ротвайн И.М.* Современная геодинамика и сейсмичность Малой Азии // Теоретические проблемы геодинамики и сейсмологии. М.: Наука, 1994. С.201-244. (Вычисл. сейсмология; Вып. 27).
9. *Press F., Allen C.* Patterns of Seismic Release in the Southern California Region. Carnegie DTM, 1994.
10. *Аллен К., Хаттон К., Кейлис-Борок В.И., Кузнецов И.В., Ротвайн И.М.* Долгосрочный прогноз землетрясений и автомодельность сейсмологических предвестников // Достижения и проблемы современной геофизики. М.: Наука, 1984. С.152-165.
11. *Хаин В.Е.* Региональная геотектоника: Альпийский Средиземноморский пояс. М.: Недра, 1984. 344с.
12. *Novikova O.V., Vorobieva I.A., Enescu D., Radulian M., Kuznetsov I.V., Panza G.F.* Prediction of the strong earthquakes in Vrancea, Romania, using the CN algorithm // PAGEOPH. Vol.145, N 2. 1995.
13. *Жирарден Н., Ротвайн И.М.* Диагностика периодов повышенной вероятности землетрясений с $M \geq 5.5$ на Малых Антильских островах // Геодинамика и прогноз землетрясений. М.: Наука, 1994. С.9-16. (Вычисл. сейсмология; Вып.26).