

## IV. АНАЛИЗ СЕЙСМИЧНОСТИ

УДК 550.341

### СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДИНАМИКА И СЕЙСМИЧНОСТЬ МАЛОЙ АЗИИ

Д. В. Рундквист

*Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского*

И. М. Ротвайн

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

Исследованы системы тектонических нарушений (разломы, зоны пластического течения и деформаций), вовлеченные в процесс подготовки сильных землетрясений в масштабе времени один – три года, соответствующему среднесрочному прогнозу землетрясений. Рассмотрена центральная часть Альпийско-Гималайского пояса Тетиса, включающая рифты Мертвого и Красного моря, Аденского залива, структуру Загрос, массив Лут, системы Копет-Дага, Кавказа и Закавказья. Отбирались системы нарушений, в которых формируется комплекс предвестников сильных землетрясений, диагностируемый алгоритмом КН. В отличие от областей, обычно рассматриваемых при тектоническом районировании, где принято выделять исторически взаимосвязанные целостные структуры дугообразных, линейных, складчатых сооружений и систем разломов, в подготовку сильных землетрясений оказываются вовлечеными системы нарушений более сложных конфигураций. К ним относятся системы тройного сочленения рифтов вместе с оперяющими их трансформными разломами (Красное море, Иордано-Мертвоморский разлом); дугообразные системы покровно-складчатых сооружений, сочетающиеся с радиальными зонами разломов (Копет-Даг, Северный Кавказ) или переходящие в структуры субдукционного типа (Загрос, Тавриды, Кипр); спиралеобразные сдвиговые системы, обрамляющие жесткие массивы (Лут). Выделены экранирующие системы нарушений, которые до некоторой степени разделяют поле напряжений в сопредельных блоках. В качестве главного структурного элемента, определяющего взаимодействие блоков в ходе современных движений исследованной части пояса Тетиса, рассмотрена Аравийская плита.

### PRESENT-DAY GEODYNAMICS AND SEISMICITY OF ASIA MINOR

D. V. Rundkvist

*Vernadsky State Geological Museum*

I. M. Rotwain

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

Systems of tectonic displacement (faulting, zones of plastic flow and deformation) have been examined that are involved in the precursory processes of large earthquakes for time scale of one to three years, corresponding to intermediate-term earthquake prediction. The

area of study is the central part of the Alpine-Himalayan Tethys belt which includes the Dead and Red Sea rifts, the Gulf of Aden, the Zagros feature, the Lut Massif, the Kopet Dag, The Caucasus, and the trans-Caucasian region. We selected those systems where the CN algorithm had identified the appropriate set of earthquake precursors. The preparation of large earthquakes affects displacement systems of more complicated configurations that is usual for areas commonly considered in tectonic regionalization where the accepted procedure is to identify historical related features and fault systems. The complex systems referred to include the triple junction of rifts with the corresponding transform faults (Red Sea, Jordan-Dead Sea fault); arcuate systems of folded nappe features either combined with radial fault zones (Kopet-Dag, northern Caucasus) or transforming into subduction-type structures (Zagros, Taurides, Cyprus); spirally strike slip surrounding a rigid massif (Lut). Screening fault systems are identified whose effect is to somewhat divide the stress in adjacent blocks. The Arabian plate is treated as the leading feature that controls block interaction during the present day movements in the part of the Tethys belt concerned.

## ВВЕДЕНИЕ

### Постановка задачи

Как известно, каждое землетрясение есть результат проявления не отдельного изолированного разлома или зоны пластического течения и деформаций, а некоторой системы активно развивающихся нарушений. Определение такой системы весьма существенно для понимания сейсмичности регионов и для прогноза землетрясений.

Как было показано в работах [1, 2], структуры, активизирующиеся на стадии подготовки сильного землетрясения, могут в несколько раз превосходить размеры готовящегося очага. В рамках структур такого масштаба перед сильными землетрясениями происходят характерные изменения сейсмичности, на основе которых и дается прогноз. Однако до последнего времени остается неясным, какую конкретную систему нарушений необходимо рассматривать с целью прогноза того или иного сильного землетрясения.

В данной работе проводится сравнительный анализ прогнозов, полученных для одной и той же серии сильных землетрясений при разном выборе систем нарушений. Для этой цели использовался разработанный В.И.Кейлис-Бороком и И.М.Ротвайн алгоритм "КН" [2]. Как показывает опыт его применения, результаты прогноза существенно зависят от выбора системы нарушений, в пределах которых анализируется сейсмичность. Эта особенность алгоритма и привлекла авторов, так как позволяла одновременно решать две задачи:

1 – разрабатывать современные геодинамические модели регионов, учитывающие взаимосвязи главных структурных элементов, которые определяют развитие сейсмичности;

2 – находить оптимальный для прогноза выбор системы нарушений, участвующих в процессе подготовки сильных землетрясений.

Исследование проводилось для территории, охватывающей центральную часть Альпийско-Гималайского пояса Тетиса длиной около 3 тыс. км. В пределах этой территории более детально анализировалась геодинамическая обстановка проявления сейсмичности рифтов Мертвого и Красного морей и Аденского залива, складчатых систем Загроса, Копет-Дага, Кавказа и Закавказья. Это – достаточно хо-

рошо изученная в геологическом и сейсмотектоническом отношении территория [3, 4].

### Методика работы

Алгоритм КН среднесрочного прогноза землетрясений основан на вариациях сейсмичности в пространстве и времени и использует в качестве предвестников следующие явления:

- увеличение сейсмической активности;
- концентрацию землетрясений во времени и в пространстве;
- нерегулярность потока землетрясений.

Кратко схема работы алгоритма может быть описана следующим образом. Анализируется временная последовательность землетрясений, произошедших в пределах исследуемой территории и определяются характеристики этой последовательности в скользящем временном окне. Алгоритм диагностирует *период повышенной вероятности* (ППВ) сильного землетрясения, если эти характеристики встретились в некоторых комбинациях, типичных для периодов подготовки сильных землетрясений. Сильное землетрясение определяется условием  $M \geq M_0$ , где  $M_0$  – параметр алгоритма, выбираемый для каждой территории в зависимости от времени повторяемости этих землетрясений.

Все параметры алгоритма КН, включая комбинации характеристик, типичных для периодов подготовки сильных землетрясений, и правило диагностики ППВ, были найдены в результате ретроспективного анализа сейсмичности Калифорнии и Невады [5].

Формулировка алгоритма КН позволяет применять его к территориям разного размера и разного уровня сейсмической активности, не прибегая к дополнительной адаптации, что дало возможность использовать его для ретроспективного среднесрочного прогноза в 21 регионе мира [2]. Результаты этого теста можно резюмировать следующим образом: ППВ предшествовали 56 из 68 сильных землетрясений, среднее время тревоги на одно сильное землетрясение составило около двух лет при среднем времени повторяемости сильных землетрясений около восьми лет.

Несмотря на весьма удовлетворительные результаты теста, алгоритм КН имеет ряд существенных недостатков. Прежде всего – это большая территориальная неопределенность прогноза. Для ее преодоления необходимо решить вопрос – где именно возникают землетрясения, формирующие предвестники сильных землетрясений, и как зависит качество прогноза от выбора рассматриваемой системы нарушений. Решение этого вопроса является существенным не только с практической точки зрения, но и для понимания сути происходящих явлений.

Для решения поставленной в работе задачи алгоритм КН применялся для ретроспективного прогноза сильнейших землетрясений регионов Малой Азии за период с 1968 по 1992 гг. При оценке результатов прогноза мы использовали следующие понятия:

- время тревоги – суммарная длительность ППВ;
- пропуск цели – сильное землетрясение, которому не предшествовал ППВ;
- ложная тревога – ППВ, не закончившийся сильным землетрясением.

Практически для всех регионов был использован каталог землетрясений NEIC [6] с 1964 по 1992 гг. Исключение составляли регионы Копет-Дага и рифта Мерг-

вого моря, где каталог NEIC крайне неполон. В этих регионах были использованы локальные каталоги [7, 8].

### **Современная геодинамика Малой Азии**

При проведении исследований авторы считали необходимым использовать, помимо современных представлений плейт-тектоники [9–11], общегеологические принципы анализа материалов, которые обсуждались ранее М.А. Садовским, В.Д. Наливкиным, Л.И. Красным, Д.В. Рундквистом, Ф.А. Летниковым и др. Речь идет, в частности, о временной и пространственной дискретности геологических процессов, их многоуровневой иерархии, необратимой направленности и унаследованности, саморазвитии природных систем (синергетизме) и др. [12–16].

С позиции этих принципов Малую Азию можно рассматривать как единую целостную структуру, сейсмичность которой определяется, в первую очередь, развитием рифтов Красного моря и Аденского залива и перемещением Аравийской плиты по отношению к Евроазиатскому и Африканскому континентам (рис. 1).

По мнению авторов, современная геодинамика Аравийского полуострова является ключевой для понимания сейсмодинамической обстановки в пределах всех стран Ближнего Востока, включая Иорданию, Израиль, Сирию, Восточную Турцию, Иран, Ирак, страны Закавказья и Пакистан.

Аравийская плита представляет собой крупный блок древнейшей докембрийской консолидации, испытавший впоследствии неоднократную тектоническую активизацию с образованием в палеозое и мезокайнозое основных и ультраосновных вулканических и интрузивных пород (например, меловой офиолитовый пояс Омана, лампрофиры и кимберлиты Сирии и т. п.). Северная часть плиты, погружающаяся на протяжении всего мезокайнозоя под Иранскую плиту вдоль складчатой системы Загрос, сформировала здесь вдоль передового прогиба уникальные нефтегазоносные структуры Мессопотамской депрессии и Персидского залива [17].

Сейсмичность в пределах рассматриваемой территории проявляется, главным образом, вдоль границ Аравийской плиты (рис. 2). Западная ее граница представляет собой систему кулисообразных левосторонних сдвигов Восточного Средиземноморья. Наиболее крупный сдвиг с элементами раздвига определяет сейсмоактивную структуру Иордано-Мертвоморского рифта.

Восточная граница Аравийской плиты проходит по крупнейшему трансформному разлому Оуен (см. рис. 1). Западная шельфовая часть Аравийского моря до разлома Оуен может быть рассмотрена как составная часть Аравийской плиты.

Перемещение Аравийской плиты к северу и северо-востоку и формирование вдоль всей северной границы зон напряженного состояния является результатом активного развития в кайнозое раздвигов от осевых рифтов Красного моря и Аденского залива. Эти напряжения частично "гасятся" в системах зон поддвига Загроса, а частично передаются далее на север, определяя особенности современной геодинамики и сейсмичности Восточной Турции, Закавказья, Ирана, Ирака и Пакистана. "Отголоски" этих напряжений распространяются к северу до структур Копет-Дага и Северного Кавказа.

Существующая морфоструктура Аравийской плиты и геодинамическая картина этого района, конечно, значительно сложнее намеченной схемы. В связи с этим обратим внимание на следующие ее особенности.

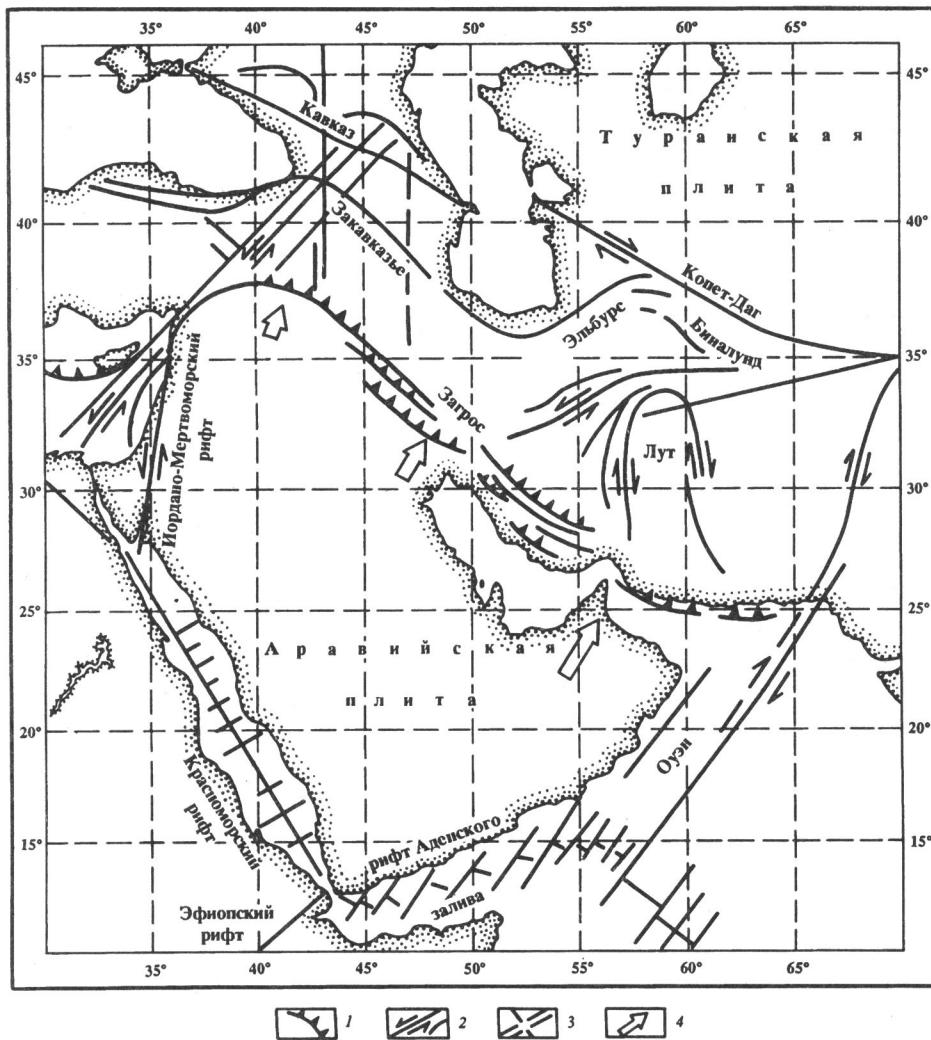


Рис. 1. Главные структурные элементы Малой Азии

1 – зоны надвигов, поддвигов, субдукций вдоль границ плит; 2 – рифты и трансформные разломы; 3 – зоны сдвигов; 4 – направление движения Аравийской плиты

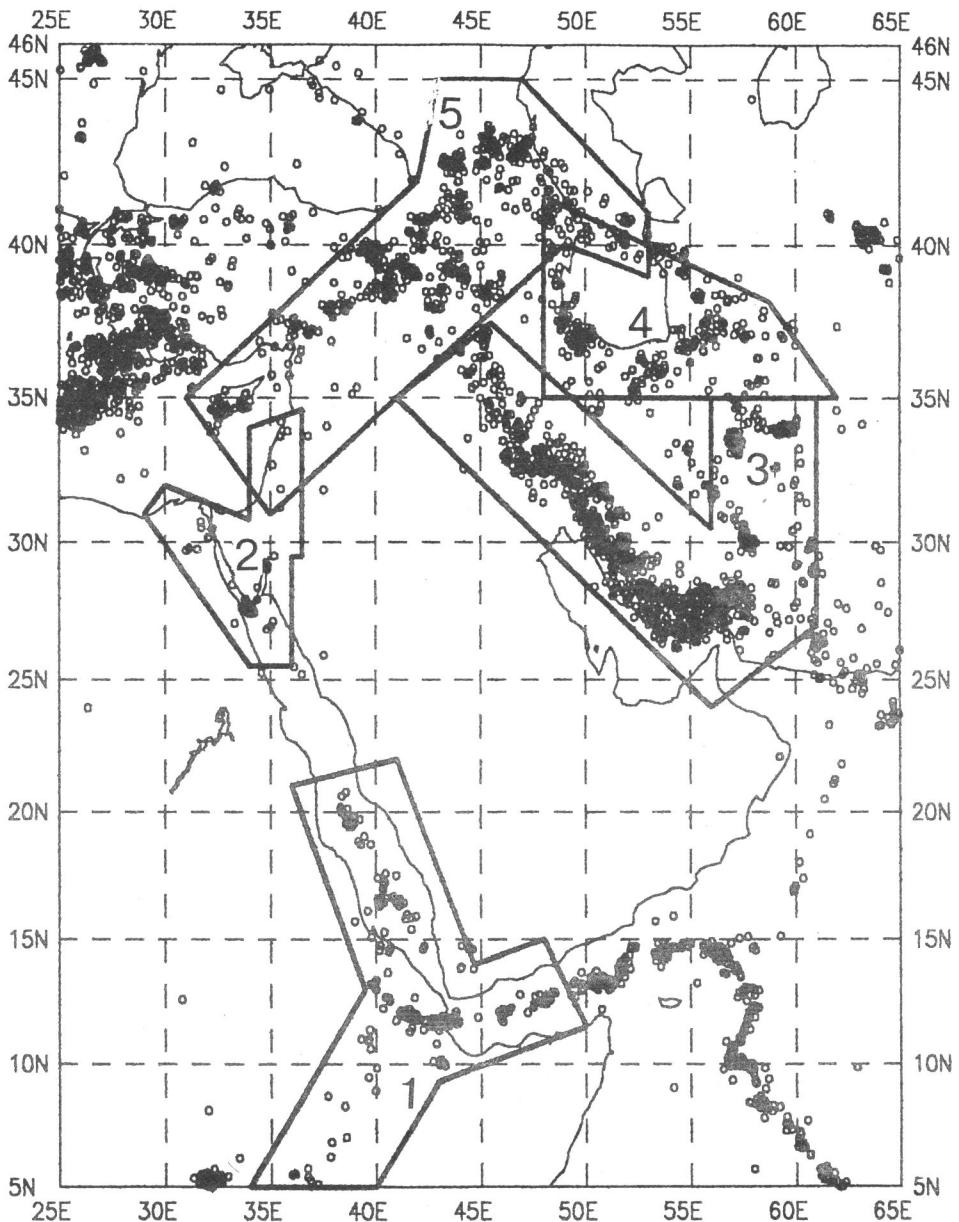


Рис. 2. Общая картина расположения основных сейсмических зон Малой Азии

Кружки – эпицентры землетрясений с магнитудой  $M \geq 4.5$  по каталогу NEIC с 1964 по 1992 гг., прямые линии – примерные контуры регионов, в которых проводился ретроспективный прогноз сильных землетрясений. 1–5 – номера регионов: 1 – рифты Красного моря, Аденского залива и Эфиопский рифт; 2 – Иордано-Мертвоморский рифт; 3 – система Загрос и массив Лут; 4 – Копет-Даг и Эльбурс; 5 – Кавказье

Аравийская плита перемещается с некоторым разворотом против часовой стрелки за счет большей скорости раздвига в восточной части рифта Красного моря и Аденского залива (от 1.5 до 2-3 см/год). Эти движения легко реализуются, благодаря зоне поддвига Загроса, буферной зоне мощных прогибов Персидского и Оманского заливов и отсутствию "упора" – континентальной коры – со стороны Аравийского моря. Западная же часть плиты более жестко "зажата" между Африкой и Анатолийской частью Малой Азии.

Раздвиг Красного моря в районе Суэцкого канала практически затухает. Напряжения реализуются здесь, как уже говорилось выше, в виде систем левосторонних сдвигов. Данная система сдвигов вместе с Иордано-Мертвоморским рифтом пересекает складчато-надвиговую систему Загрос, образуя северо-западный угол Аравийской плиты, вдающийся вглубь пояса Тетиса. Этот угол – своего рода тектонический клин – в значительной мере и определяет современную геодинамическую обстановку этой части Малой Азии. В частности, с этой системой сдвиговых зон связаны, по-видимому, сильнейшие землетрясения последних лет: Чалдан-Мурадийское (1976 г.), Харасан-Нарманское (1983 г.), Спитакское (1988 г.) и Рачинское (1991 г.).

На востоке трансформный разлом Оуен, по которому происходит значительное правостороннее смещение блоков, подходит к западной границе Индийской докембрийской плиты, где соединяется со складчатым поясом Сулеймановых гор. Соответственно сейсмичность и геодинамика восточной части Дарваза, Белуджистана, Памира и Гиндукуша резко отличаются от рассматриваемой территории Малой Азии и являются самостоятельной сейсмотектонической областью, напряжения в которой определяются взаимодействием Азиатского континента и Индийской плиты. Поэтому в данной работе эта территория не рассматривается.

Существенное значение для понимания общей картины сейсмичности имеет зона, проходящая по Оманскому заливу и побережью Аравийского моря. В настоящее время эта зона представляет собой пассивную окраину континента, но в недавнем прошлом – это зона субдукционного типа погружения океанической плиты Аравийского моря под континент.

Отмеченные уточнения морфологии и характера границ Аравийской плиты, динамика ее развития, соотношение с сопредельными складчатыми структурами и определяют общую картину сейсмичности всех регионов Малой Азии, которые рассмотрены в последующих разделах.

## СРЕДНЕСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ОТДЕЛЬНЫХ РЕГИОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА КН

Ниже приведены результаты исследования по отдельным регионам (см. рис. 2): от структур, непосредственно обрамляющих Аравийскую плиту – рифтов Красного моря и Аденского залива (1), Иордано-Мертвоморского рифта (2), структуры Загрос и массива Лут (3), – до более удаленных – Копет-Дага (4), Кавказа и Закавказья (5).

В каждом из этих регионов апробировались разные варианты полигонов, в которых применялся алгоритм КН: от простейших – линейных зон нарушений, – до более сложных, образованных их сочетанием.

## 1. Рифтовая система Красного моря – Аденского залива

Рифтовая система имеет "поясное" строение магнитного поля, которое позволяет восстановить динамику раздвига, начиная от рубежа палеогена-миоцена. Рифт Красного моря – типично межконтинентальный с участками молодой океанической коры в осевой части. Рифт Аденского залива имеет черты, переходные от межконтинентального к типично срединно-океаническому Восточно-Индийского поднятия. К узлу сочленения рифтов Красного моря и Аденского залива с юга подходит мощная система внутриконтинентальных рифтов Восточной Африки – Эфиопский рифт (рис. 3). К участку тройного сочленения и приурочена наибольшая сейсмическая активность этого региона. При использовании алгоритма КН в качестве полигонов были взяты как элементарные составляющие: рифты Красного моря (полигон I), Аденского залива (полигон II) и Эфиопский (полигон III), так и варианты их сочленений: рифт Красного моря – Аденского залива (I-II); рифт Красного моря – Эфиопский рифт (I-III); рифт Аденского залива – Эфиопский рифт (II-III); тройное сочленение рифтов (I-II-III).

Параметры сильнейших землетрясений этого региона с 1964 г. приведены в табл. 1. Алгоритм КН позволяет прогнозировать лишь землетрясения, произошедшие после 1968 г., т.е. три последних из этого списка. Два землетрясения – N3 и N5 – расположены в узле сочленения рифтов и, следовательно, прогнозировались во всех вариантах.

ТАБЛИЦА 1

N п/п	Дата	Координаты		Глубина, км	<i>M</i>
		$\varphi^\circ, N$	$\lambda^\circ, E$		
1	13.03.1967	19.67	38.75	31	6.3
2	28.03.1967	19.86	38.71	27	6.7
3	29.03.1969	11.97	41.18	0	6.4
4	28.12.1977	16.65	40.27	33	6.8
5	20.08.1989	11.76	41.94	11	6.3

Примечание: *M* – максимальная магнитуда землетрясения по каталогу NEIC.

Результаты прогноза для отдельных полигонов представлены на рис. 4 и 5 и сведены в табл. 2. Наилучшие результаты получены при анализе сейсмичности собственно рифта Красного моря (полигон I) и системы рифта Красного моря и Эфиопского рифта (полигон I-III). Для этих двух полигонов ППВ предшествовали двум из трех сильных землетрясений при минимальном времени и числе ложных тревог. Землетрясение 1977 г., произошедшее в рифте Красного моря, является пропуском цели во всех рассмотренных вариантах.

Следует отметить, что полученный результат является неожиданным. Исходя из приведенной выше общей схемы геодинамики региона, можно было ожидать большей взаимосвязи сейсмических событий в рифтах Красного моря и Аденского залива, поскольку относительное перемещение Аравийской плиты может происходить только при взаимоувязанном оживлении ограничивающих ее рифтов.

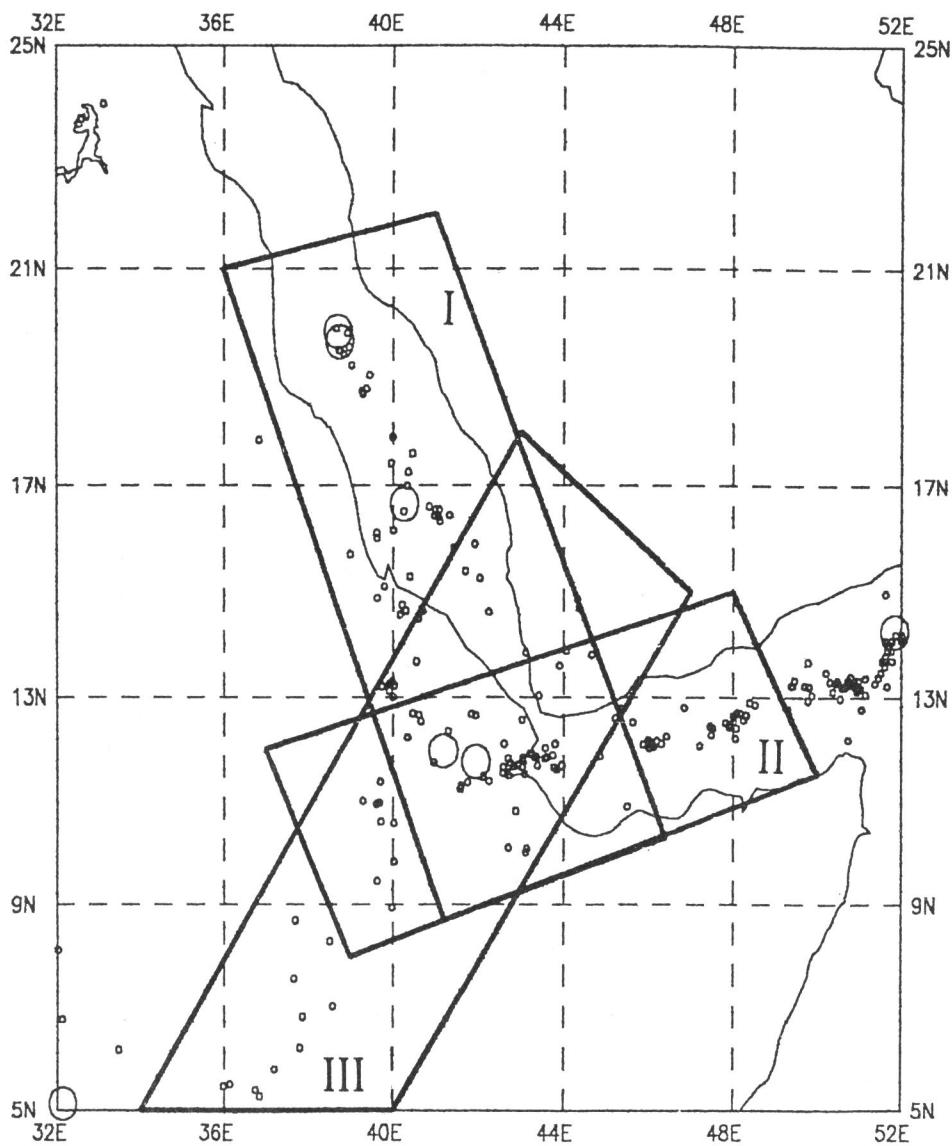


Рис. 3. Сейсмичность рифтов Красного моря (I), Аденского залива (II) и Эфиопского (III) по каталогу NEIC с 1964 по 1992 гг.

Кружки – эпицентры землетрясений: маленькие – с магнитудой  $M \geq 3$ , большие – эпицентры сильных землетрясений; прямые линии – границы полигонов

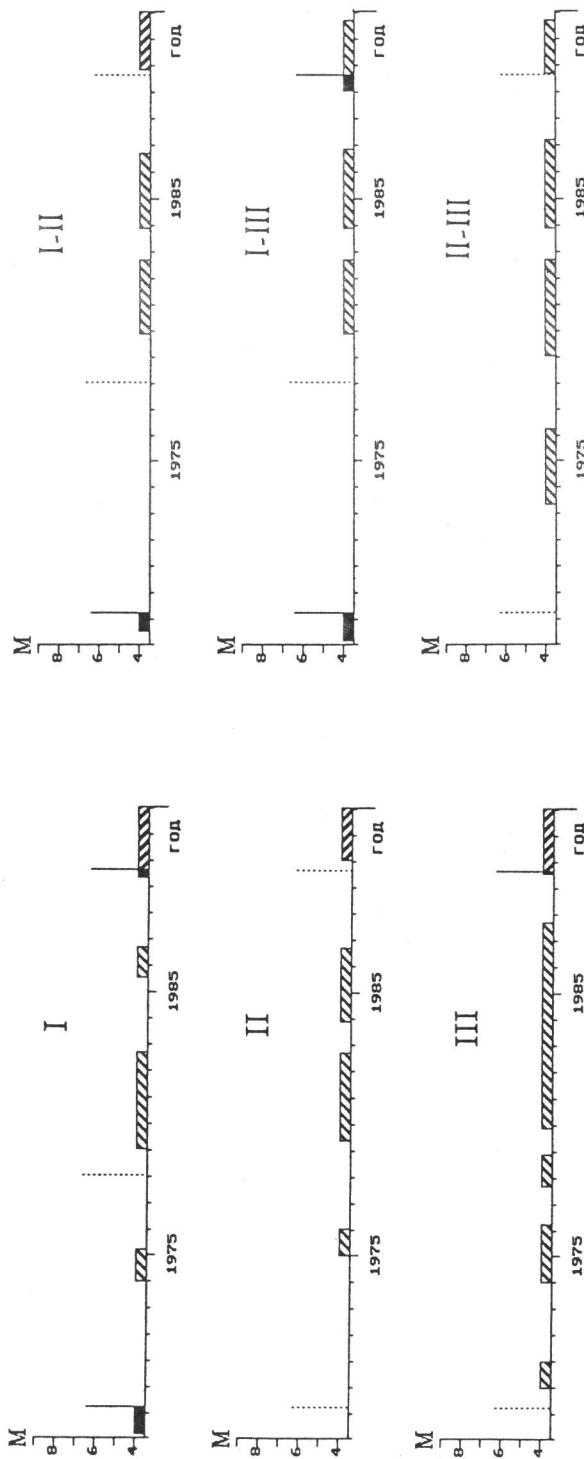


Рис. 4. ППВ и сильные землетрясения дляriftов: Красного моря (I), Аденского залива (II) и Эфиопского (III). Вертикальная сплошная линия – сильное землетрясение, которому предшествовала тревога, пунктира – пропуск цели, ■ – ППВ, предшествующий сильному землетрясению, ▨ – ложная тревога, ▨▨ – текущая тревога.

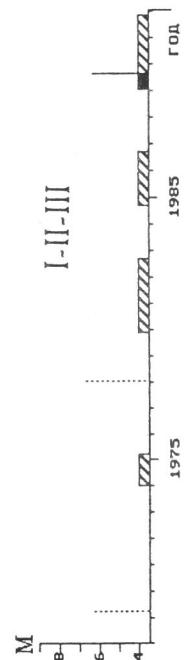


Рис. 5. ППВ и сильные землетрясения для различных соединений riftов: Красного моря–Аденского залива (I-II), Красного моря–Эфиопского (I-III), Аденского залива–Эфиопского (II-III), тройного соединения riftов (I-II-III). Обозначения, как на рис. 4

ТАБЛИЦА 2

Вариант	$n/N$	$\tau, \%$	$k/K$
I	1/3	40.6	3/5
II	2/2	38.2	3/3
III	1/2	61.1	4/5
I-II	2/3	35.7	2/3
I-III	1/3	39.9	3/5
II-III	2/2	49.3	4/4
I-II-III	2/3	36.8	4/5

Примечание:  $N$  – общее число сильных землетрясений;  $n$  – число пропусков цели;  $\tau$  – средняя продолжительность тревог в регионе в процентах к длительности анализируемого периода времени;  $K$  – общее число тревог;  $k$  – число ложных тревог.

Однако полученные результаты, как будто, свидетельствуют о другом: о большой связи в настоящее время геодинамики Красноморского рифта и северной части Эфиопского.

На рис. 6 представлены карты эпицентров землетрясений, предшествующих прогнозируемым землетрясениям 1969 и 1989 гг. и ложным тревогам. Сопоставляя эти карты, можно сделать несколько замечаний. В периоды подготовки сильных землетрясений 1969 и 1989 гг. возникла сейсмическая активность в периферических частях рифтов при относительном сейсмическом затишье в узле их сочленения, где потом и произошли эти сильные землетрясения. В случае ложных тревог сейсмическая ситуация – обратная: мы видим проявление активности только в узле сочленения рифтов. Возможно следующее объяснение этого факта: одновременное оживление нескольких разломов приводит к возникновению сильнейших землетрясений в узле их пересечения, в то время как напряжения, возникшие только в узле пересечения рифтов, реализуются лишь серией слабых землетрясений.

## 2. Иордано-Мертвоморский рифт

Рассмотрим другой участок западной границы Аравийской плиты – Иордано-Мертвоморский рифт. Термин "рифт" используется здесь, как укоренившийся в литературе. Реально же, исходя из геодинамики, это – трансформный разлом, отходящий от Красноморского рифта. При появлении левосторонних сдвигов в локальных изгибах разлома возникают раздвиги типа рифта Мертвого моря.

Для данного региона представляет интерес проанализировать две основные системы нарушений (рис. 7): центральную часть Иордано-Мертвоморского разлома (полигон I) и северо-западную часть рифта Красного моря с оперяющими его разломами, в том числе, южную часть Иордано-Мертвоморского разлома (полигон II).

Данные о сейсмичности этого региона имеются в каталоге NEIC [6] и в детальном локальном каталоге [8]. Однако локальный каталог представлен лишь для территории Центральной части Иордано-Мертвоморского рифта севернее 29.5°N.

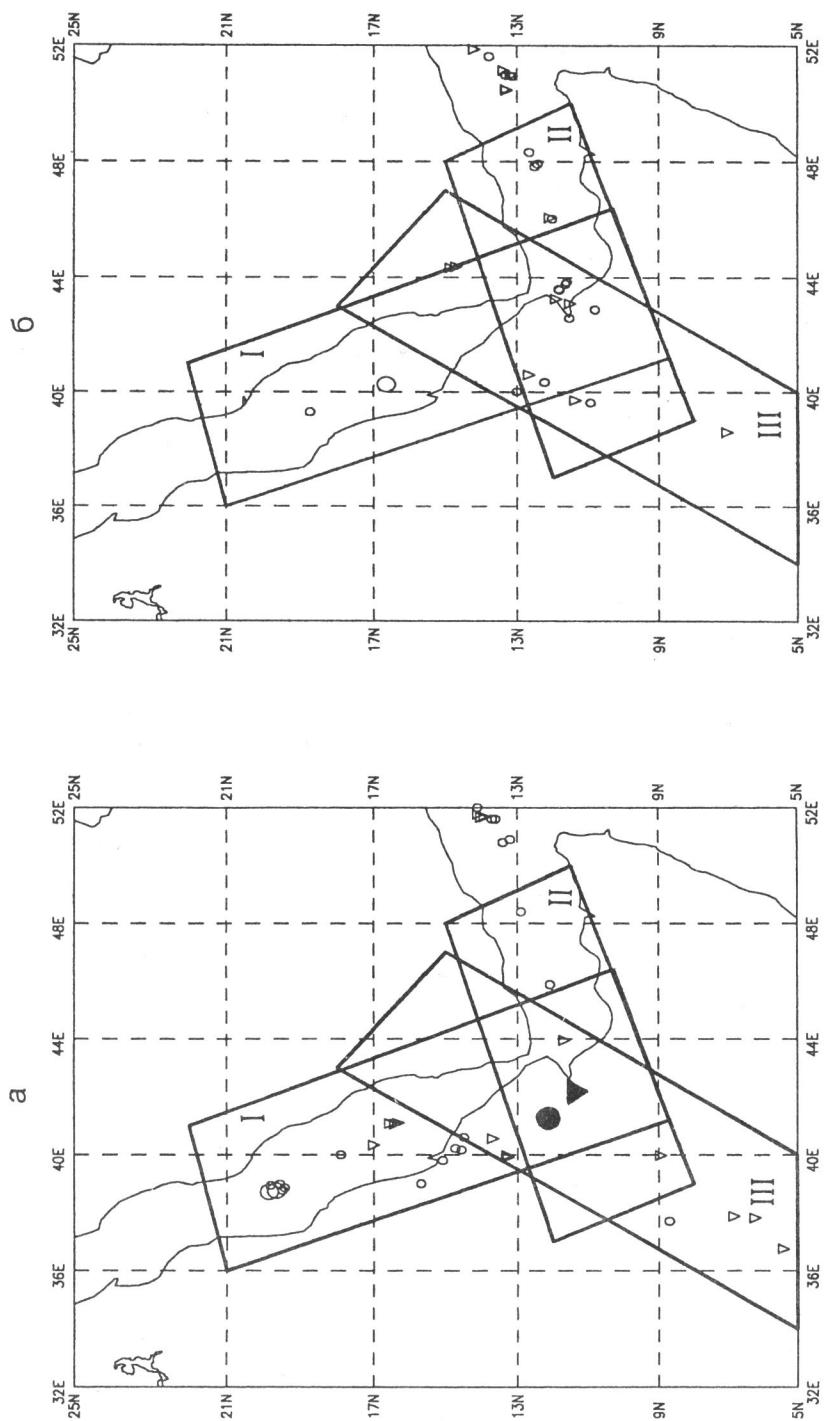


Рис. 6. Сейсмическая ситуация в рифтовой системе Краснодарского моря – Адигенского залива в различные периоды времени

а – перед сильными землетрясениями; с 29.03.1966 по 28.03.1969 (кружки), с 20.08.1986 по 19.08.1989 (треугольники); б – перед ложными тревогами: 01.01.1977 по 01.01.1980 (кружки) с 01.01.1982 по 01.01.1985 (треугольники). Большой черный кружок и треугольник – эпицентры землетрясений, прогнозируемых в соответствующий период времени; прямые линии – границы полигонов

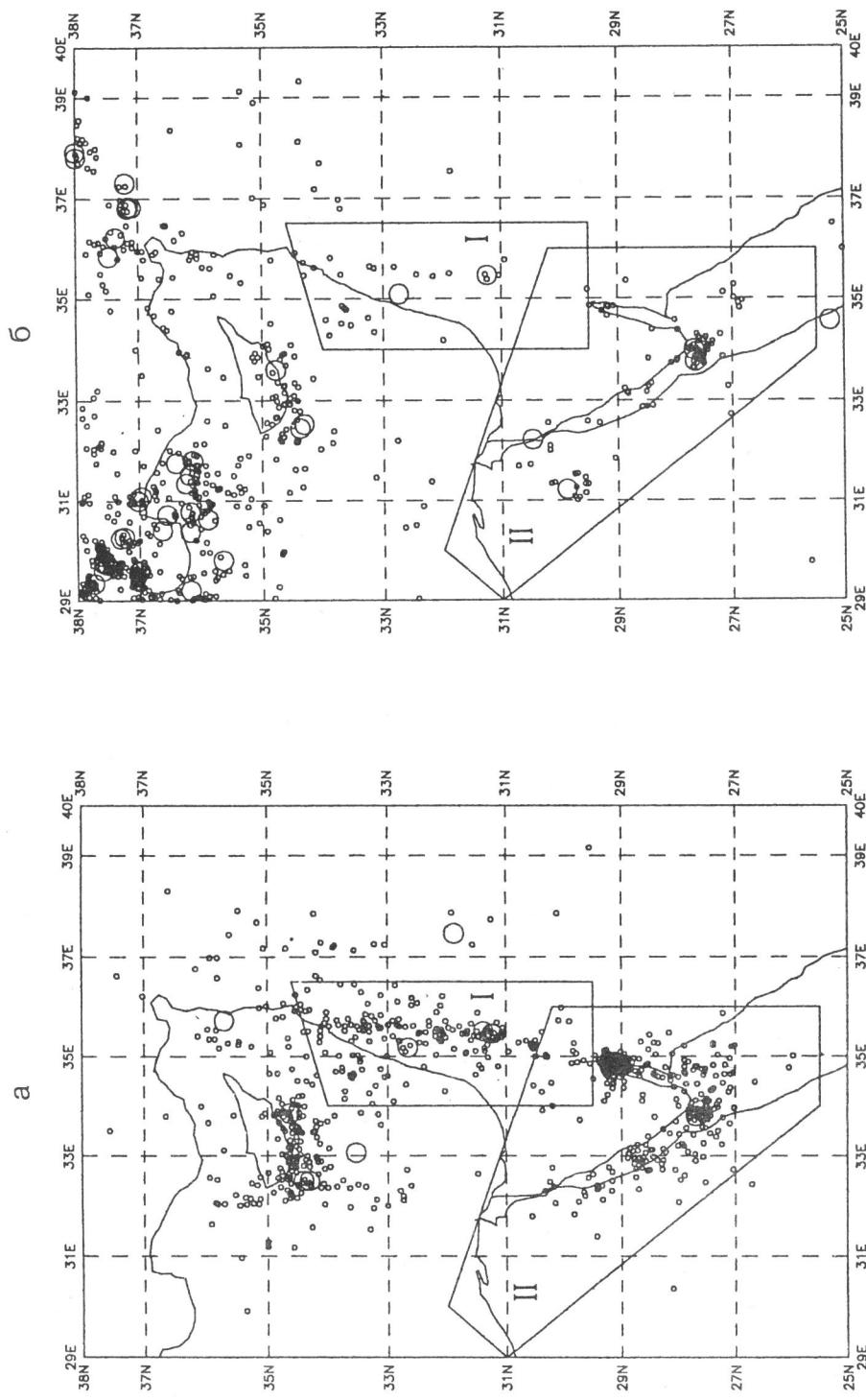


Рис. 7. Сейсмичность Иордано-Мертвоморского разлома (I) и северо-западной части Краснодарского рифта (II)

*a* – по локальному каталогу за 1964–1992 гг., *b* – по каталогу NEIC за 1969–1992 гг. Обозначения, как на рис. 3

Для более южных районов этого региона можно говорить о представительности локального каталога только с 1982 г. Этим и обусловлены границы полигона I. Для полигона II локальный каталог не представителен и для прогноза использовался каталог NEIC, который относительно полон здесь лишь с 1969 г.

Алгоритм КН применялся уже ранее для полигона I [18]. Здесь мы использовали последнюю и более полную версию локального каталога и проделали ряд дополнительных экспериментов, связанных с изменением границ исследованного полигона.

Параметры сильных ( $M \geq 5$ ) землетрясений в пределах полигона I приведены в табл. 3. Результаты прогноза этих землетрясений представлены на рис. 8. Их можно считать удовлетворительными, поскольку все идентифицированные алгоритмом тревоги приурочены к моментам возникновения сильных землетрясений. Суммарная длительность тревог составляет 29.3%.

ТАБЛИЦА 3

N п/п	Дата	Координаты		Глубина, км	$M$
		$\varphi^{\circ}, N$	$\lambda^{\circ}, E$		
1	08.10.1970	31.39	35.51	10	5.0
2	23.04.1979	31.24	35.46	10	5.0
3	24.08.1984	32.66	35.18	18	5.3

Дополнительно был рассмотрен вариант более узкого полигона вдоль Иордано-Мертвоморского разлома шириной один градус от  $35^{\circ}$  до  $36^{\circ}$ Е. Результат прогноза имеет единственное отличие: текущая тревога, диагностируемая алгоритмом в предыдущем варианте полигона, теперь отсутствует. Следовательно, относительно редкие сейсмические события, происходившие вдоль оперяющих главный разлом трещин, не имели существенного значения в подготовке сильных землетрясений прошлого. Однако текущая тревога в зоне Иордано-Мертвоморского рифта

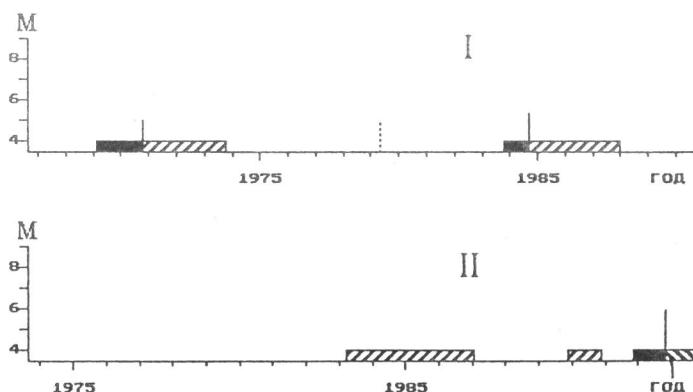


Рис. 8. ППВ и сильные землетрясения для Иордано-Мертвоморского разлома (полигон I) и северо-западной части Красноморского рифта (полигон II). Обозначения, как на рис. 4

возникла за счет увеличения сейсмической активности именно вдоль оперяющих разломов.

В пределах полигона II с 1969 по 1992 гг. произошло 10 событий с  $M \geq 5$ , что исключает возможность среднесрочного прогноза землетрясений такой силы. Поэтому в качестве сильных здесь выбраны четыре сильнейших землетрясения ( $M \geq 5.5$ ), параметры которых приведены в табл. 4. Наличие каталога с 1969 г. позволило применить алгоритм КН с 1973 г. и, по существу, дало возможность прогнозировать единственное событие – землетрясение N3 (12.10.1992) с  $M = 5.9$ , которое произошло в Египте. Результат прогноза представлен на рис. 8. ППВ предшествовал этому сильному землетрясению, однако продолжительность тревог довольно велика. Наиболее длительная ложная тревога связана, по-видимому, с серией землетрясений 1983 – 1985 гг., которые в локальном каталоге имеют магнитуды  $M \geq 5.3$ .

ТАБЛИЦА 4

N п/п	Дата	Координаты		Глубина, км	$M$
		$\varphi^\circ, N$	$\lambda^\circ, E$		
1	31.03.1969	27.67	33.99	0	7.1
2	28.06.1972	27.65	33.76	15	5.6
3	12.10.1992	29.89	31.22	24	5.9
4	03.08.1993	28.71	34.82	7	5.8

Примечание: Землетрясение N4 произошло во время подготовки этой статьи.

Важно отметить также, что текущая тревога, диагностированная алгоритмом в этом полигоне, закончилась сильным землетрясением: N4 (03.08.1993) с  $M = 5.8$ .

Пространственное распределение эпицентров землетрясений в периоды, предшествовавшие сильным землетрясениям 1992 и 1993 гг. (рис. 9, а), позволяет сделать предварительный вывод: предвестниковая сейсмическая активность развивалась вдоль рифта Красного моря, в то время, как в периоды ложных тревог одновременно активизировалась и зона Иордано-Мертвоморского разлома (рис. 9, б).

Отметим в итоге, что так же, как и в предыдущем регионе, наибольшая сейсмическая активность приурочена к узлу сочленения двух главных структур: Красноморского рифта и Иордано-Мертвоморского разлома (см. рис. 7).

К сожалению, представительность и полнота имеющихся для данной территории каталогов не позволяет проверить другие возможные варианты систем нарушений, логически вытекающие из развивающихся геодинамических положений.

### 3. Структура Загрос и массив Лут

Складчатый пояс Загрос, простирающийся в северо-западном направлении почти на 2 тыс. км от  $40^\circ E$  до  $60^\circ E$ , является главной тектонической структурой Малой Азии и представляет собой мощное покровно-складчатое сооружение вдоль северного ограничения Аравийской плиты [17].

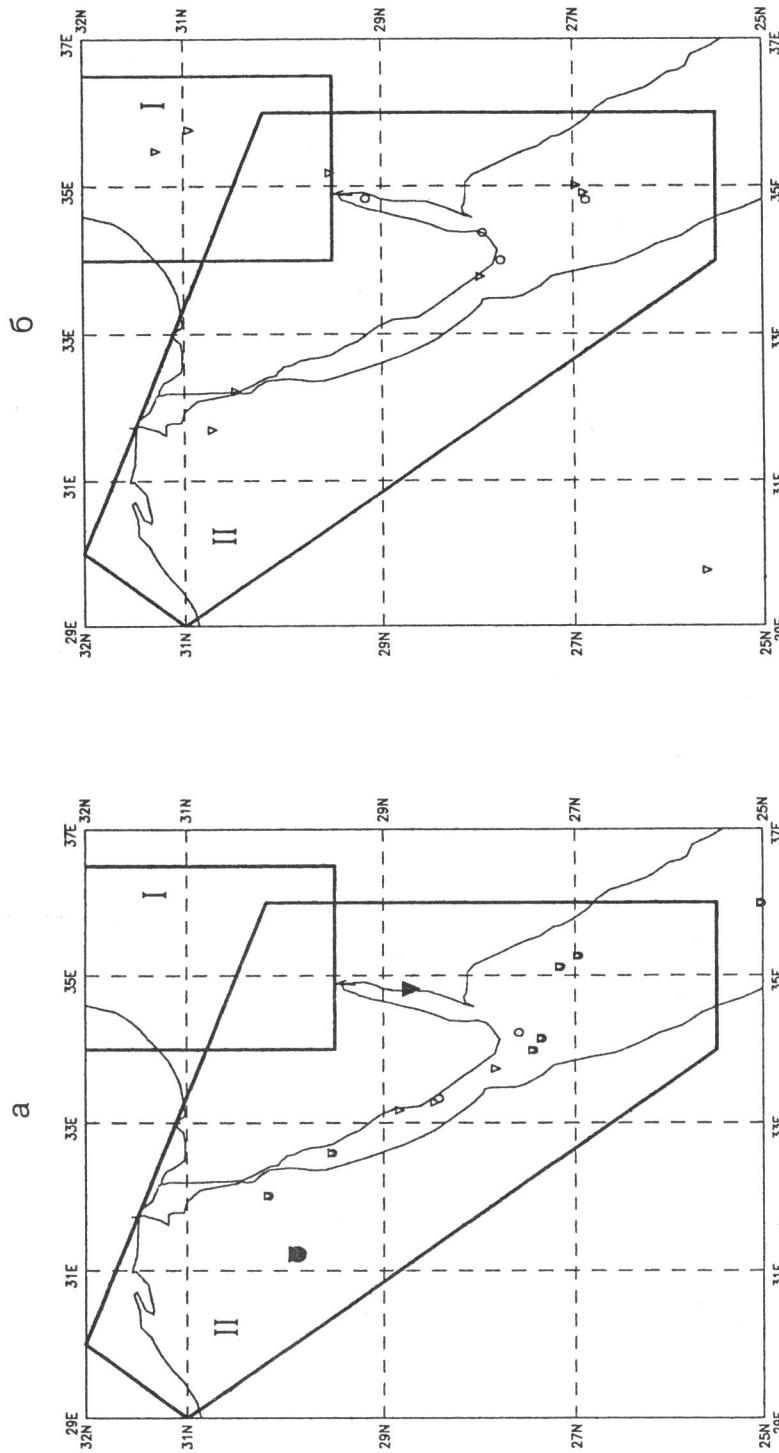


Рис. 9. Сейсмическая ситуация в северо-западной части Краснодарского рифта в различные периоды времени  
 а – перед сильными землетрясениями: с 12.10.1989 по 12.10.1992 (кружки), с 03.08.1990 по 03.08.1993 (треугольники); б – перед ложными тревогами: с 01.03.1980 по 01.03.1983 (кружки) с 01.11.1986 по 01.11.1989 (треугольники). Большой черный кружок и треугольник – эпицентры землетрясений, прогнозируемых в соответствующий период времени; прямые линии – границы полигонов

Загрос – древняя длительно живущая структура, продолжающая активно формироваться в настоящее время. Вдоль этой структуры аккреационные блоки "наползают" с севера на Аравийскую плиту, определяя ее погружение в граничной части и формирование передовых прогибов Персидского залива и Мессопотамии. С позиции общей геодинамики эту границу плит точнее можно определить как поддвиг Аравийской плиты под структуру Загрос.

Типичным для этого региона, как и для других покровно-складчатых сооружений, является не строго линейная, а дугообразная форма структур, обращенных выпуклостью в сторону надвига. Как видно из рис. 10, здесь намечаются две главные дугообразные структуры: "западная" (примерно  $42\text{--}50^\circ\text{E}$ ) и "восточная" ( $50\text{--}58^\circ\text{E}$ ). Наиболее сильные землетрясения возникали в узле сочленения структуры Загрос с жестким массивом Лут – блоком докембрийско-палеозойской консолидированной коры.

Описанная в общих чертах геодинамическая картина структуры Загрос позволяет рассмотреть несколько вариантов систем нарушений (рис. 11):

- 1) Загрос, как единая структура (полигон I);
- 2) две главные дугообразные структуры – восточная и западная (полигоны I-1 и I-2);
- 3) дуга меньшего масштаба, выделенная в пределах восточной структуры (полигон I-1a);
- 4) формально выделенная территория в виде круга с радиусом 300 км (полигон II).

Последний вариант целесообразен для сравнения результатов прогноза на территории, выделяемой с учетом геологических факторов и при формальном ограничении территории.

В качестве сильных землетрясений здесь имеет смысл рассматривать события с  $M \geq 6.5$ . Их параметры приведены в табл. 5.

ТАБЛИЦА 5

N п/п	Дата	Координаты		Глубина, км	$M$
		$\varphi^\circ, N$	$\lambda^\circ, E$		
1	10.04.1972	28.43	52.83	0	6.9
2	21.03.1977	27.63	56.39	29	6.9
3	06.11.1990	28.25	55.46	11	6.7

Результаты применения алгоритма КН к перечисленным вариантам систем нарушений приведены на рис. 12 и сведены в табл. 6. Наилучший результат прогноза достигается при разделении региона на две главные дугообразные структуры: западную и восточную. В этом случае в пределах восточной структуры предсказаны все сильные землетрясения и нет тревог, не связанных с ними (I-1 на рис.12).

Активизация, предшествующая сильным землетрясениям 1972 и 1977 гг. (рис. 13, а), локализована практически в месте будущего сильного землетрясения – в юго-восточной части структуры Загрос. Активизация, предшествующая землетрясению 1990 г., локализована в центральной ее части (рис. 13, б).

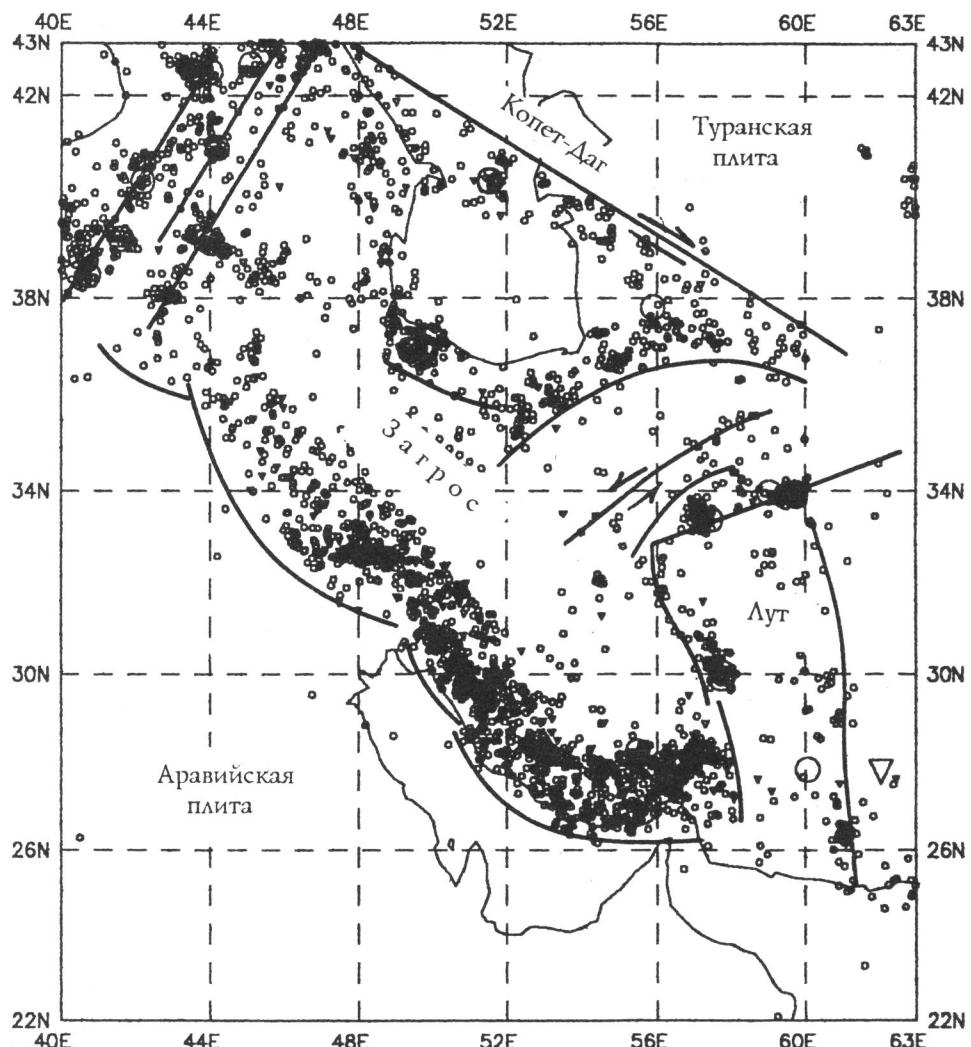


Рис. 10. Сейсмичность и главные элементы геологического строения региона Загрос–Лут  
Кружки – эпицентры поверхностных землетрясений: маленькие – с магнитудой  $M \leq 6.4$ ,  
большие – с  $M \geq 6.5$ ; треугольники – то же для промежуточных и глубоких землетрясений;  
жирные линии – основные системы нарушений

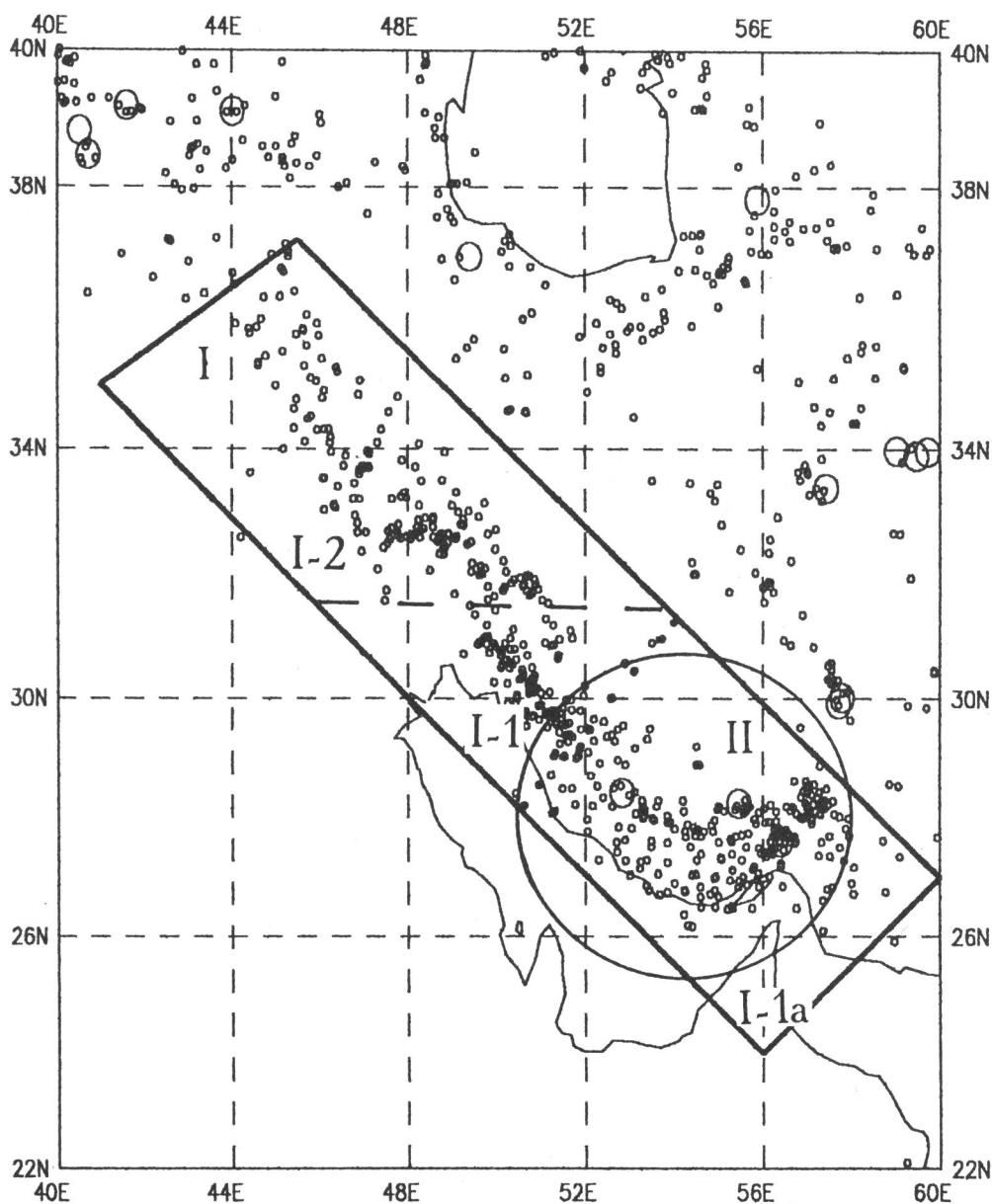


Рис. 11. Сейсмичность и варианты полигонов структуры Загрос

Сплошная линия – граница системы Загрос, как единой структуры (I), штриховая – граница между восточной (I-1) и западной (I-2) дугами, пунктирная – северная граница дуги меньшего масштаба (I-1а), круг – граница формально определенного полигона (II). Обозначения, как на рис. 3.

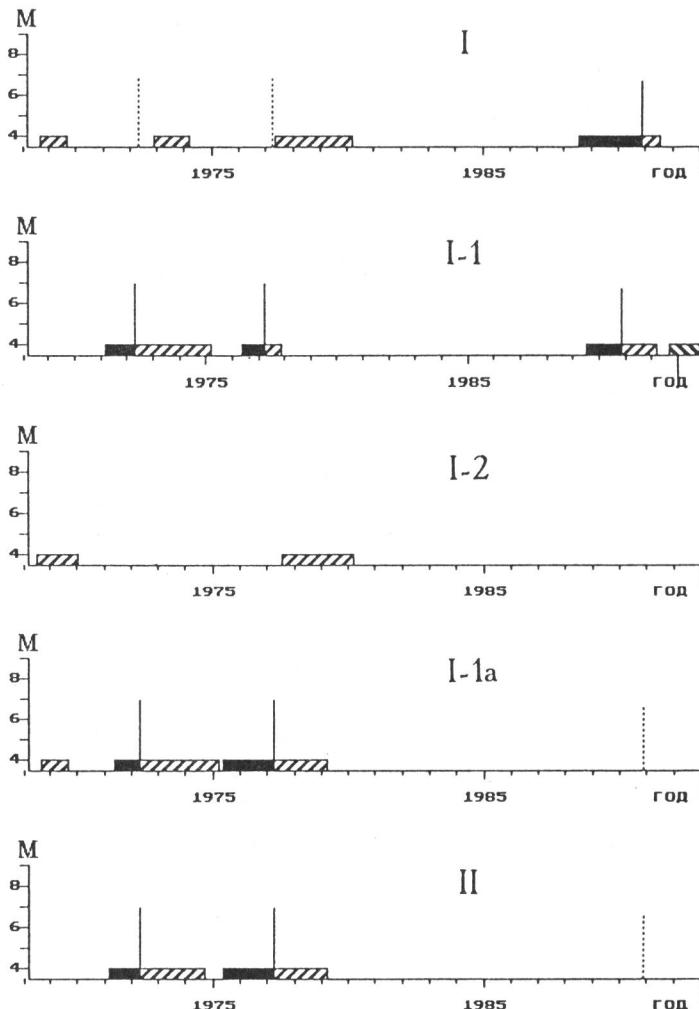


Рис. 12. ППВ и сильные землетрясения для полигонов: Загрос, как единая структура (I); восточная (I-1) и западная (I-2) дуги; дуга меньшего масштаба (I-1a); формально определенный полигон (II). Обозначения, как на рис. 4

В пределах западной структуры за исследуемый период времени сильных землетрясений не было. Сильнейшим событием здесь было землетрясение 14.12.1978 с  $M = 6.2$ . Алгоритм диагностирует в этой структуре две тревоги (I-2 на рис. 12), одна из которых (01.07.1977 – 01.05.1980), возможно, предшествовала землетрясению 1978 г., хотя формально обе тревоги являются ложными.

Результаты прогноза для других вариантов (1, 3, 4 в табл. 6) значительно хуже. В частности, при выделении из восточной дуги структуры меньшего масштаба (I-1a на рис. 12) пропускается землетрясение 1990 г. с  $M = 6.7$ , предвестники которого, как сказано выше, сформировались за счет землетрясений, которые произошли в противоположной части структуры. Аналогичный неудовлетворительный

ТАБЛИЦА 6

Вариант	$n/N$	$\tau, \%$	$k/K$
1	2/3	32.9	4/5
2	0/3	26.5	5/8
3	1/3	34.9	3/5
4	1/3	29.5	2/4

Примечание: Обозначения, как в табл. 2.

результат получается и в случае формального выделения территории в виде круга (II на рис. 12).

Обратимся теперь к зоне сочленения структуры Загрос и массива Лут. Значение срединного массива Лут в общей картине сейсмотектонической активности этого региона очень существенно. В целом, это – типичный пример сочленения активного подвижного пояса и жесткой глыбы. Массив Лут имеет относительно простую прямоугольную форму (рис. 14), вытянутую на 900 км по меридиану при ширине 500–600 км. Западная, в местах сочленения со структурой Загрос, и северная границы массива характеризуются резко повышенной сейсмической активностью. Здесь произошли наиболее сильные землетрясения исследуемого периода времени, параметры которых приведены в табл. 7.

ТАБЛИЦА 7

N п/п	Дата	Координаты		Глубина, км	$M$
		$\varphi^\circ, N$	$\lambda^\circ, E$		
1	31.08.1968	33.97	59.02	13	7.3
2	16.09.1978	33.38	57.43	33	7.4
3	27.11.1979	33.96	59.72	10	7.1
4	28.07.1981	30.01	57.79	33	7.1

По сравнению с высокой сейсмической активностью границ, внутренняя часть массива практически асейсмична. Здесь произошли лишь единичные толчки с магнитудой не более 5.5. Таким образом, пространственное распределение сейсмичности этой территории позволяет сказать, что массив ограничивает (экранирует) распространение на восток сейсмической активности структуры Загрос.

Наличие массива приводит к возникновению напряжений и их реализации вдоль его границ. В соответствии с современными геодинамическими представлениями, массив Лут испытывает некоторый крутящий момент в направлении против часовой стрелки, что формирует вдоль его границ зоны правосторонних сдвигов. Учитывая определенную изолированность массива и проявление в нем эффекта кручения, целесообразно рассмотреть следующие варианты полигонов:

- 1) весь массив, как единая структура (полигон I);
- 2) северная и западная его границы, как наиболее сейсмически активные (полигон I-1);

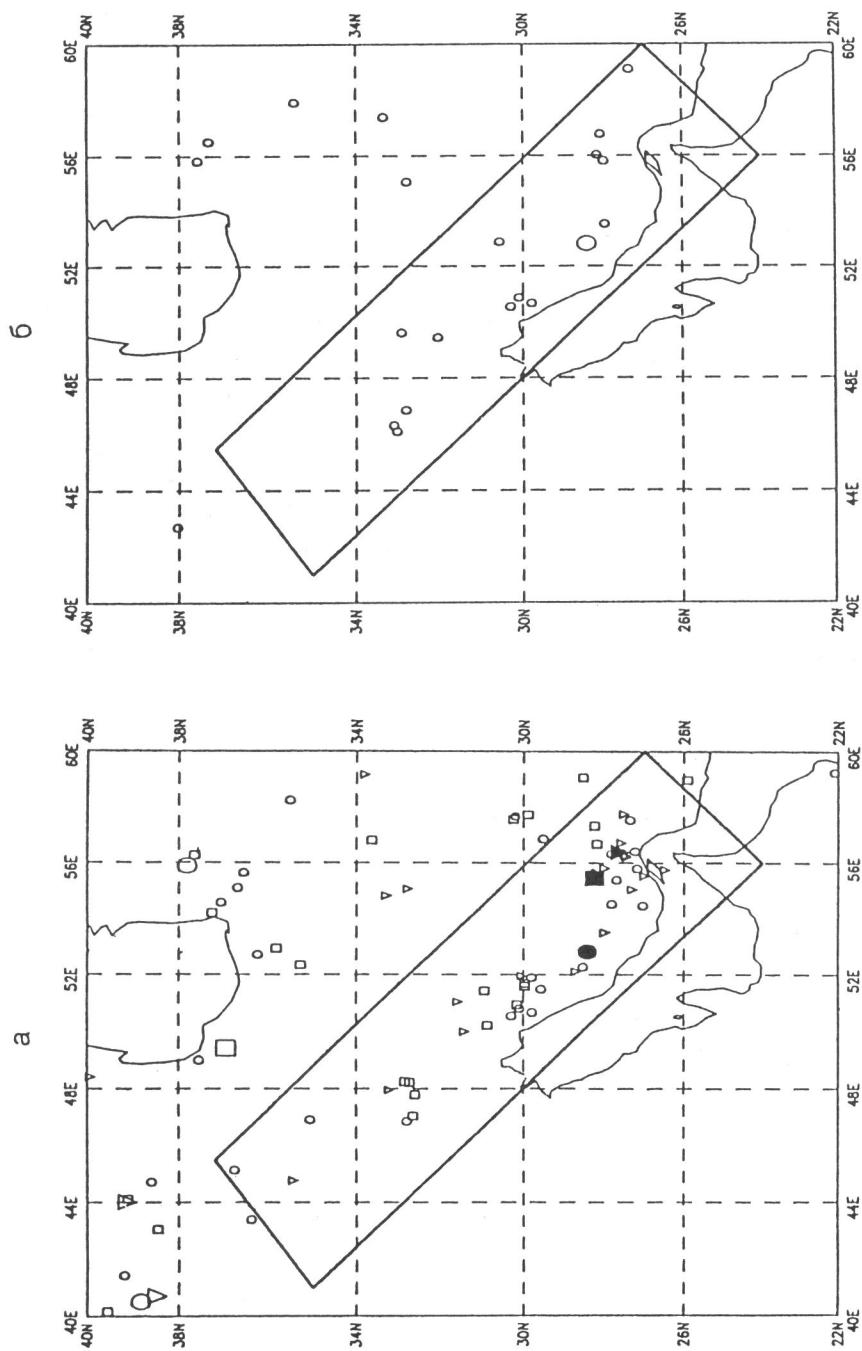


Рис. 13. Сейсмическая ситуация в структуре Загрос в различные периоды времени  
 а – перед сильными землетрясениями: с 10.04.1969 по 09.04.1972 (куружки), с 21.03.1974 по 20.03.1977 (треугольники), с 06.11.1987 по 05.11.1990 (квадраты); б – перед ложной тревогой: с 01.01.1972 по 01.01.1975 (куружки). Большой черный кружок, треугольник и квадрат – эпицентры землетрясений, прогнозируемых в соответствующий период времени; прямые линии – границы структуры Загрос

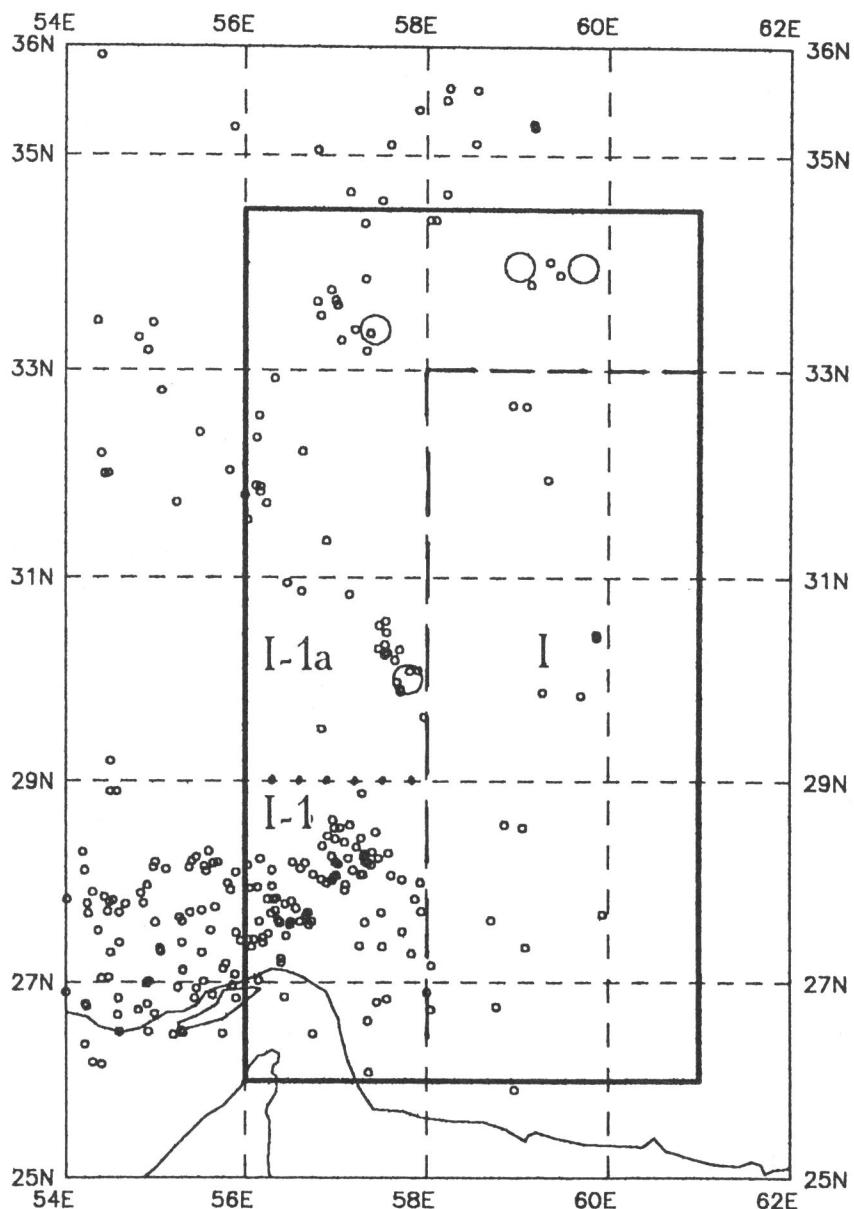


Рис. 14. Сейсмичность и варианты полигонов для массива Лут

Сплошная линия – граница массива Лут, как единой структуры (I), штриховая – граница, отделяющая наиболее сейсмически активную часть массива (I-1), пунктирная – южная граница сейсмически активной части массива без узла сочленения структуры Загрос и массива Лут (I-1a). Обозначения, как на рис. 3

3) модификация предыдущего варианта, в котором восточное окончание дуги – узел сочленения системы Загрос и массива Лут – исключено из рассмотрения (полигон I-1a).

Заметим, что вдоль западной и северной границ массива Лут, в отличие от структуры Загрос, сильнейшие события имеют магнитуды  $M > 7$  (см. табл. 7). Результаты применения алгоритма КН для прогноза этих землетрясений в перечисленных выше полигонах приведены на рис. 15 и сведены в табл. 8.

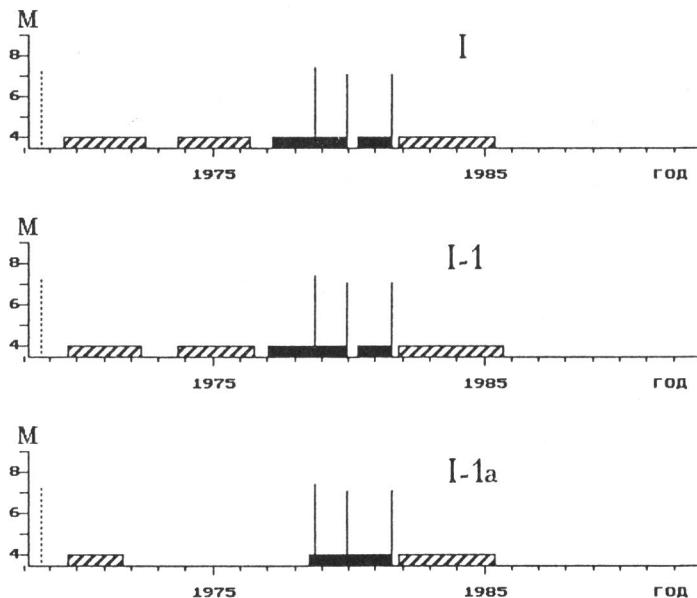


Рис. 15. ППВ и сильные землетрясения для полигонов: массив Лут, как единая структура (I), сейсмически активная часть массива (I-1), то же без узла сочленения системы Загрос и массива Лут (I-1a). Обозначения, как на рис. 4

Для всех вариантов полигонов ППВ предшествовали трем из четырех сильных землетрясений, но наилучший результат прогноза относится к варианту анализа сейсмичности полигона I-1a, включающего северную и западную границы массива Лут без узла сочленения его со структурой Загрос (вариант 3). В этом варианте длительность ППВ минимальна.

ТАБЛИЦА 8

Вариант	$n/N$	$\tau, \%$	$k/K$
1	1/4	52.9	3/6
2	1/4	54.3	3/6
3	1/4	34.3	3/5

Примечания: Обозначения, как в табл. 2.

На рис. 16 даны карты эпицентров землетрясений, произошедших в периоды перед сильными землетрясениями и в периоды ложных тревог. Существенного различия в локализации эпицентров в эти два типа периодов не наблюдается – во всех случаях активизируются обе границы массива Лут. В периоды ложных тревог эта активизация проявляется, может быть, лишь несколько слабее.

Подводя итог ретроспективному прогнозу землетрясений на территории, рассмотренной в этом разделе, отметим следующее.

Наилучшие результаты получаются при оптимальном выборе размеров выделяемых регионов. Так, оказалось необходимым рассмотреть не всю структуру Загрос, а только ее восточную дугу; не весь массив Лут и сопределенную зону Загроса, а только северную и западную его границы.

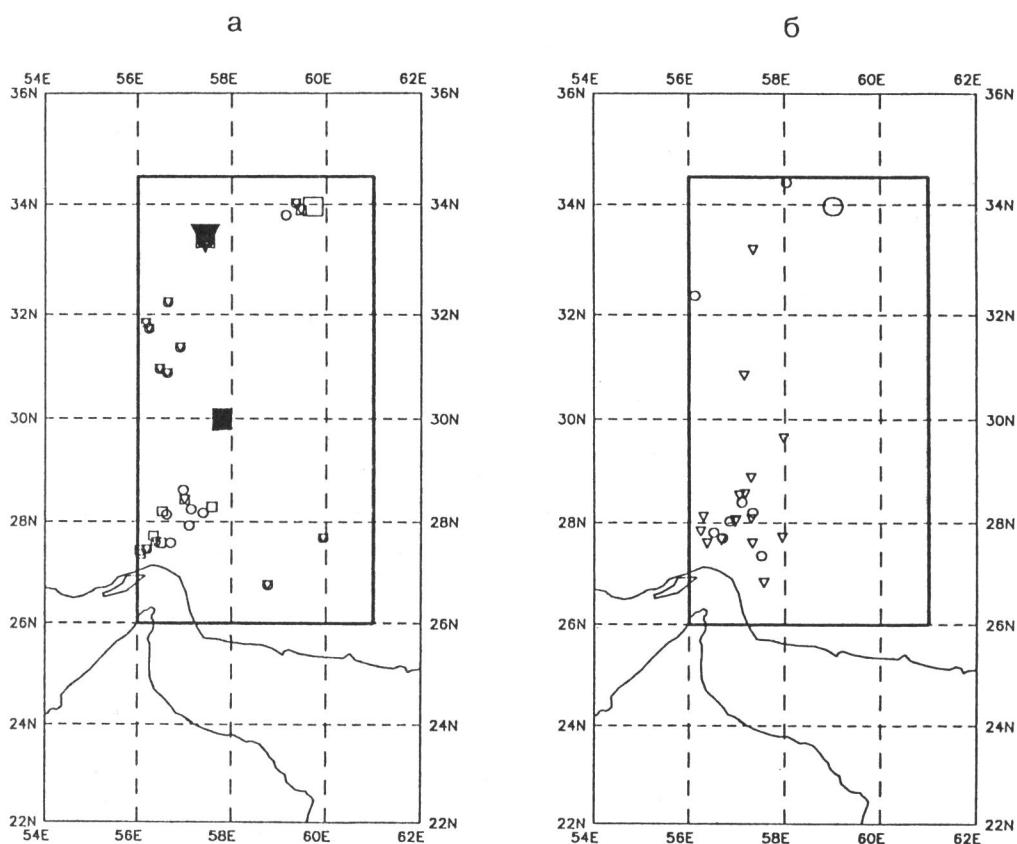


Рис. 16. Сейсмическая ситуация на территории массива Лут в различные периоды времени

*a* – перед сильными землетрясениями с 16.09.1975 по 15.09.1978 (кружки), с 27.11.1976 по 26.11.1979 (треугольники), с 28.07.1978 по 27.07.1981 (квадраты); *б* – перед ложными тревогами: с 01.09.1964 по 01.09.1969 (кружки), с 01.01.1982 по 01.01.1985 (треугольники). Большой черный треугольник и квадрат – эпицентры землетрясений, прогнозируемых в соответствующий период времени; прямые линии – границы массива Лут.

С другой стороны, мы увидели, что и чрезвычайно дробное деление ухудшает результат, что и произошло при разделении восточной дуги на две части.

Важным также представляется вывод об экранирующем влиянии жестких глыб, ограничивающих фронт распространения землетрясений и создающих естественные границы сейсмических областей. В этом случае оказывается необходимым выделять сложные по конфигурации, Г-образно изогнутые контуры исследуемых регионов. Эти контуры объединяют структуры с различными направлениями, контролирующие сейсмические события.

Наконец, обратим внимание на одну интересную методическую деталь – разделение структуры Загрос на две дуги оказалось наиболее удачным при проведении границы между ними по участкам относительно слабой сейсмичности.

#### 4. Структура Копет-Даг

В геологическом отношении линейная структура Копет-Даг западного–северо-западного простирания представляет собой длительно (с позднего протерозоя) развивающуюся тектоническую зону сочленения блоков принципиально различного строения (см. рис. 1): Туранской плиты – с севера и складчатого пояса Эльбурс – с юга. Туранская плита – палеозойская складчатая область с мезо-кайнозойским плитным комплексом пассивных окраин континента. Мезозойский пояс Эльбурс, представленный здесь горами Эльбурса–Аладага–Биналунда, сложен покровно складчатыми сооружениями, образующими дугу, обращенную выпуклостью на север.

Сочленение этих принципиально различных блоков – плит земной коры – и определяет геодинамическую обстановку: сдвиги по линейной структуре Копет-Даг, складчатые дислокации палеоген-неогеновых осадочных пород, прилегающих к зоне сдвига, и систем покровов и надвигов складчатой дуги восточного Эльбурса. При этом южный блок как бы наползает на северный, определяя его погружение в северной, прилегающей к Копет-Дагу, части.

В пределах структуры Копет-Даг известно несколько очень сильных землетрясений, в том числе Ашхабадское 1948 г. По глубине гипоцентров этот регион, главным образом, характеризуется проявлением приповерхностных землетрясений с глубинами до 10 км.

Рассмотренное геологическое строение Копет-Дага определило несколько вариантов полигонов, отражающих различный приоритет тектонических движений вдоль систем разломов.

1) Приоритет сдвиговых движений по Копет-Дагскому разлому (полигоны I, II, III на рис. 17, а).

2) Приоритет покровно-надвиговых движений южной складчатой дуги и связанных с ними сдвигов по Копет-Дагскому разлому (полигоны IV, V на рис. 17, б).

3) Модификация предыдущего варианта с разделением складчатой дуги Эльбурса и Копет-Дага на 2 части – западную и восточную – по отношению к фронтальной части дуги (полигоны VI, VII на рис. 17, в).

В качестве исходных данных использован каталог [7] –регулярные сейсмологические наблюдения ведутся здесь с 1962 г. Алгоритм КН применялся для прогноза землетрясений с  $M \geq 6.4$ , параметры которых приведены в табл. 9.

ТАБЛИЦА 9

N п/п	Дата	Координаты		Глубина, км	$M$
		$\varphi^\circ, N$	$\lambda^\circ, E$		
1	30.07.1970	37.8	56.0	0	6.7
2	16.09.1989	40.6	51.8	0	6.5

Результаты прогноза во всех рассмотренных полигонах, приведенные на рис. 18 и в табл. 10, показывают, что пропуски цели отсутствуют только в 3-м варианте, где анализируется сейсмичность сочленения структуры Копет-Даг (западная часть) и складчатой дуги Эльбурса. Во всех остальных случаях, когда анализ проводился отдельно для каждой структуры или ее части, землетрясение N2 (16.09.1989) с  $M = 6.5$  в северо-западной части Копет-Дагской линейной зоны, предсказать не удалось. Из табл. 10 видно также, что и другие характеристики качества прогноза – количество ложных тревог и средняя продолжительность тревог в регионе – наилучшие именно в этом варианте полигонов.

ТАБЛИЦА 10

Вариант	$n/N$	$\tau, \%$	$k/K$
1	1/2	34.1	7/8
2	1/2	40.3	5/6
3	0/2	27.3	2/4

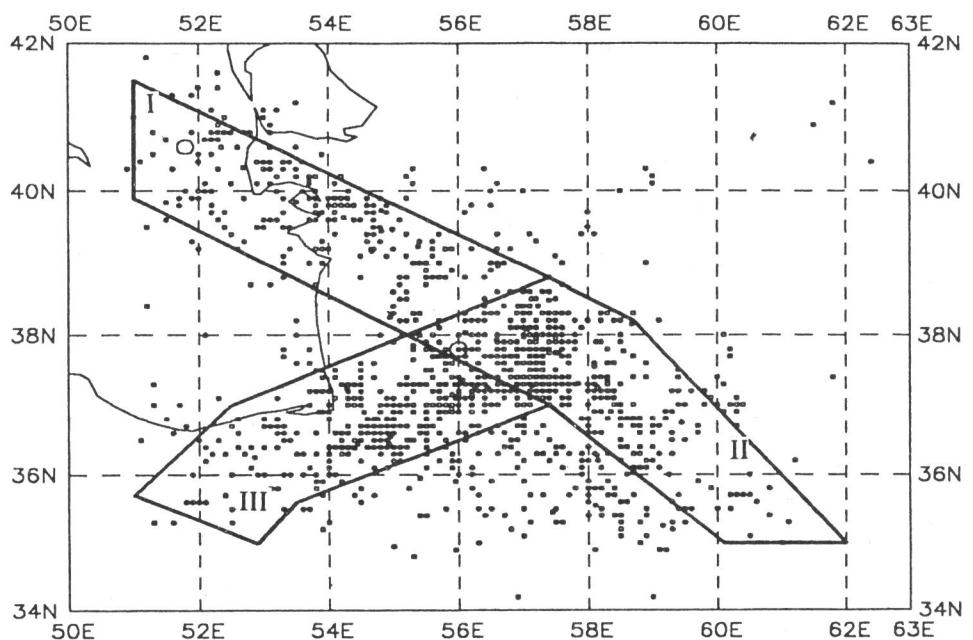
Примечания: Обозначения, как в табл. 2.

Таким образом, анализ отдельных элементов тектонических структур, как и в рифтовой системе Красного моря – Аденского залива, оказался менее перспективным по сравнению с анализом взаимодействия разломов с точки зрения процесса подготовки и локализации предвестников сильных землетрясений. Кроме того, как и в ранее рассмотренных системах разломов, наиболее сейсмически активный участок – место сочленения структур, в данном случае – Копет-Дагской линейной зоны и складчатой дуги Эльбурса (см. рис. 17).

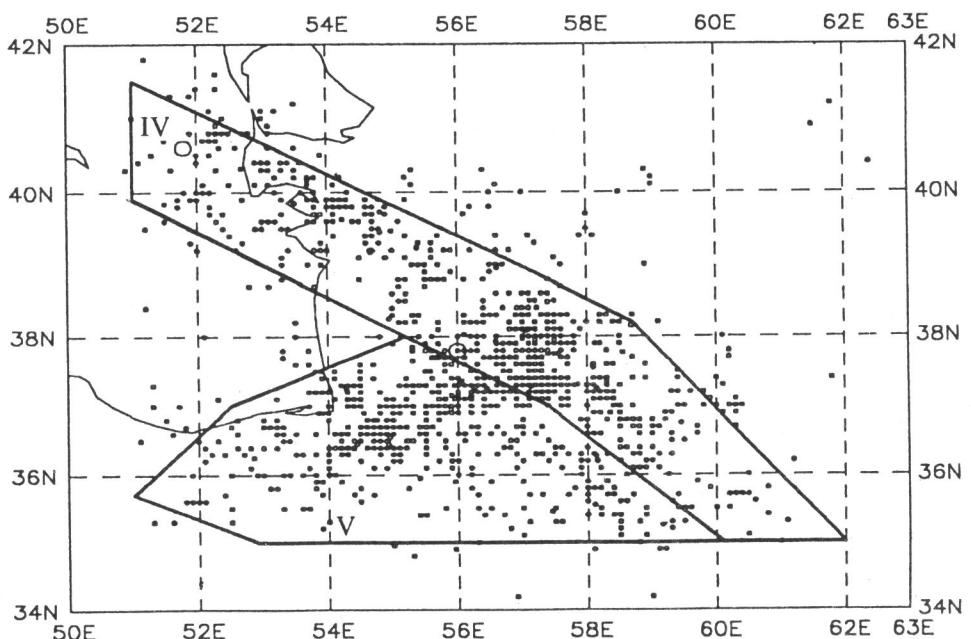
Пространственное распределение сейсмичности в периоды, предшествующие сильным землетрясениям (рис. 19, а) и ложным тревогам (рис. 19, б), позволяет предположить, что в периоды подготовки сильных землетрясений одновременно активизируются структуры различных простираций при относительном затишье в узлах их пересечения.

Самостоятельный интерес представляет дополнительный рассмотренный регион, отражающий особенности внутреннего строения Южного Прикаспия. Как известно из геофизических данных, примерно на продолжении Талышского рифта выделяется относительно изометричный участок на юге Каспийского моря с корой субокеанического типа. Природа этой структуры Каспия остается неясной: по одним данным, это – незакрывшийся рифт, по другим – начало активного развития мантийного диапира [19]. В связи с этим была проанализирована сейсмичность в региональном кольце, обрамляющем южную часть Каспия (рис. 20).

а



б



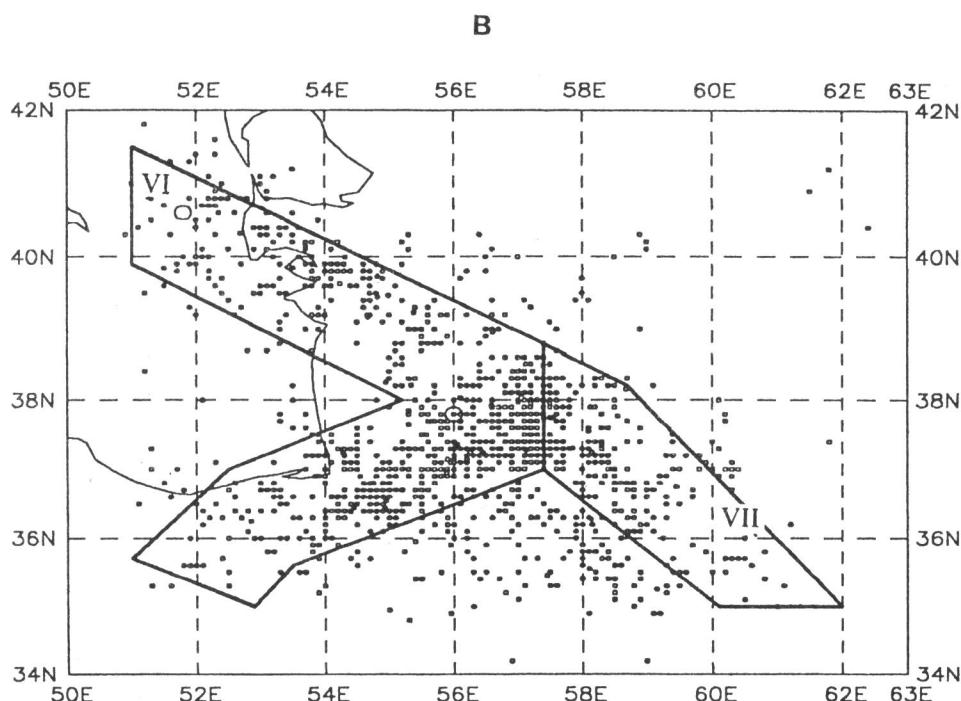


Рис. 17. Сейсмичность и варианты полигонов, отражающие различные приоритеты тектонических структур Копет-Дага и Эльбурса  
 а – приоритет сдвиговых движений по Копет-Дагскому разлому (полигоны I, II, III); б – приоритет покровно-надвиговых движений (полигоны IV, V); в – приоритет покровно-надвиговых движений для восточной и западной части дуги Эльбурса и Копет-Дага (полигоны VI, VII). Обозначения, как на рис. 3

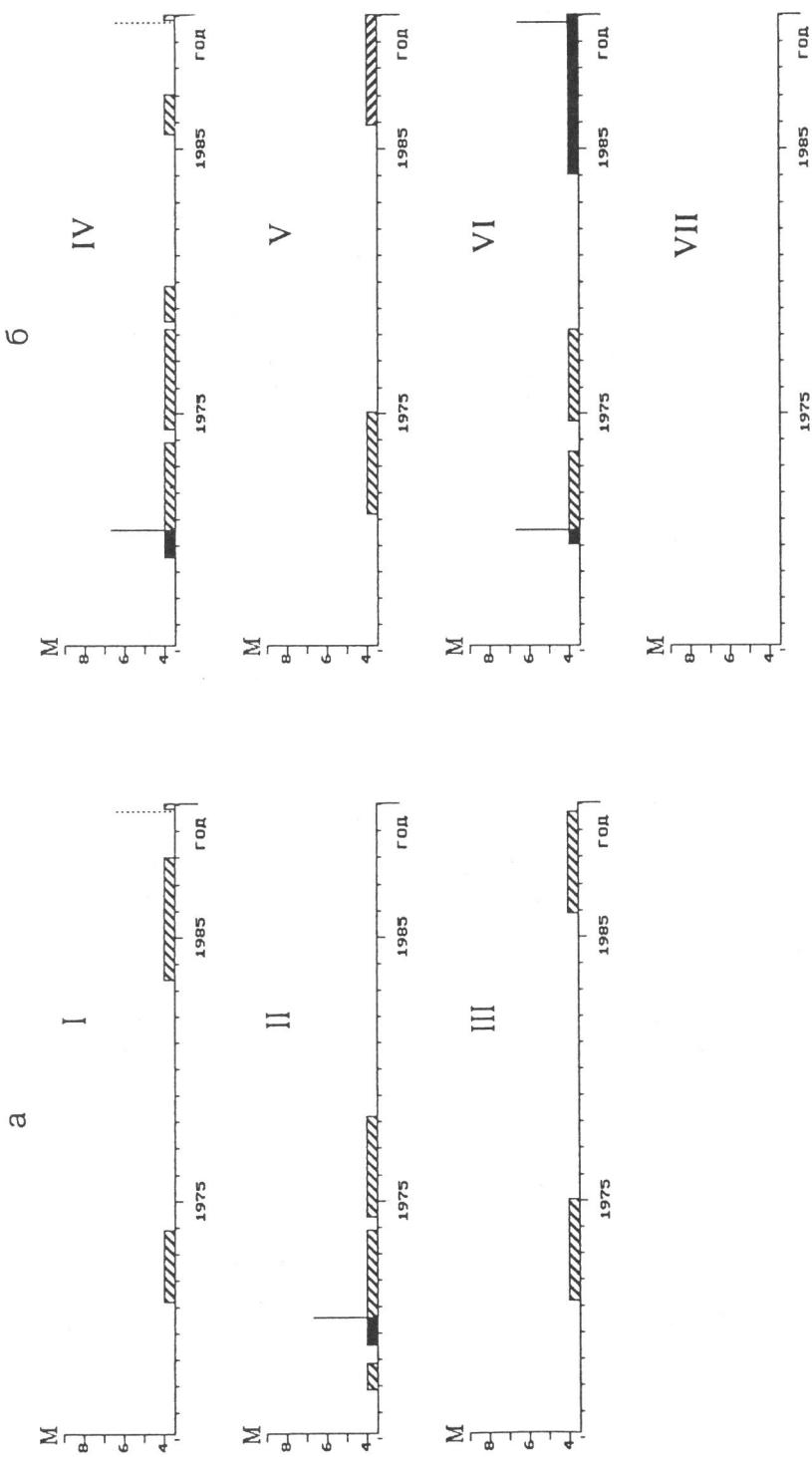


Рис. 18. ПШВ и сильные землетрясения для полигонов а – для приоритета сдвиговых движений по Копег-Дагскому раздлому (полигоны I, II, III); б – для приоритета покровно-надвиговых движений (полигоны IV, V, VI, VII). Обозначения, как на рис. 4

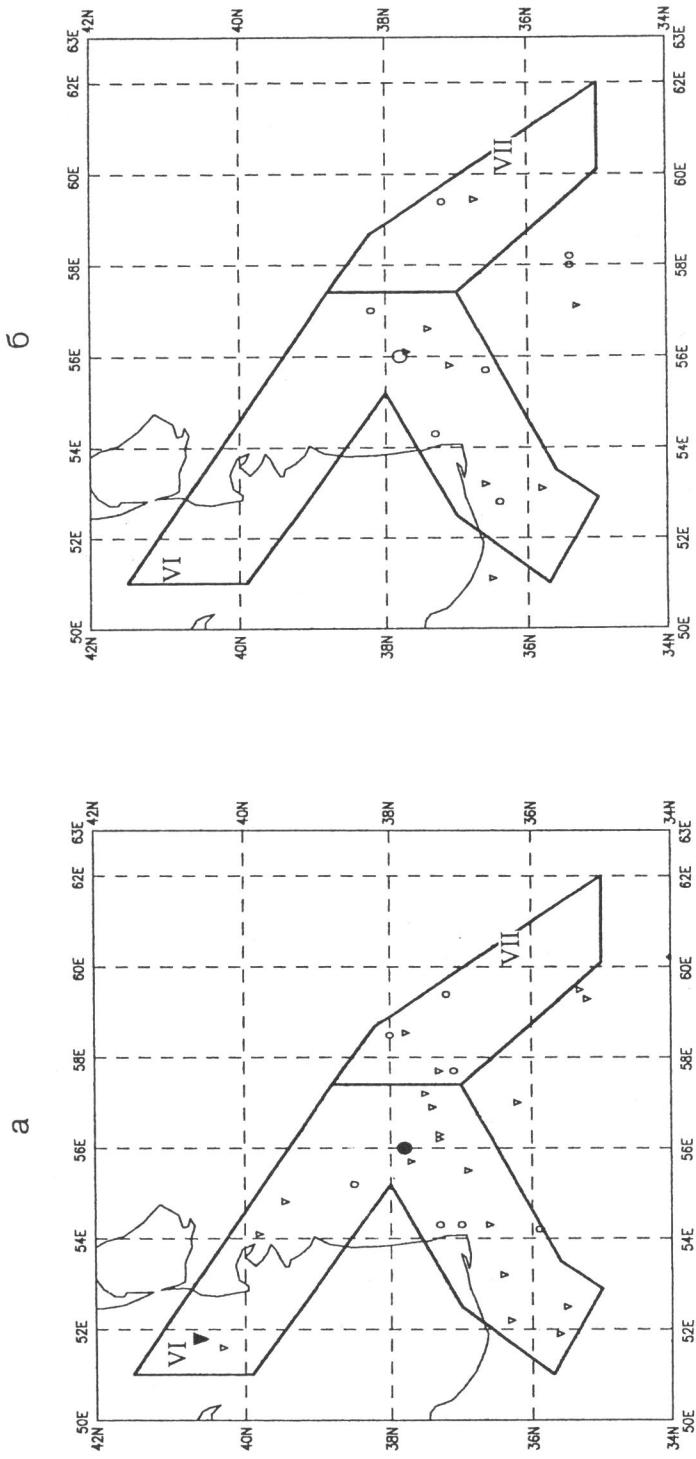


Рис. 19. Сейсмическая ситуация на территории структуры Копет-Дага и Эльбурса (полигоны VI, VII на рис. 7, в) в различные периоды времени  
 а – перед сильными землетрясениями с 30.07.1967 по 29.07.1970 (кружки), с 16.09.1986 по 16.09.1989 (треугольники); б – перед ложными тревогами с 01.01.1973 по 01.01.1976 (кружки), с 01.01.1973 по 01.01.1976 (треугольники). Большой черный кружок и треугольник – эпицентры землетрясений, прогнозируемых в соответствующий период времени, прямые линии – границы полигонов

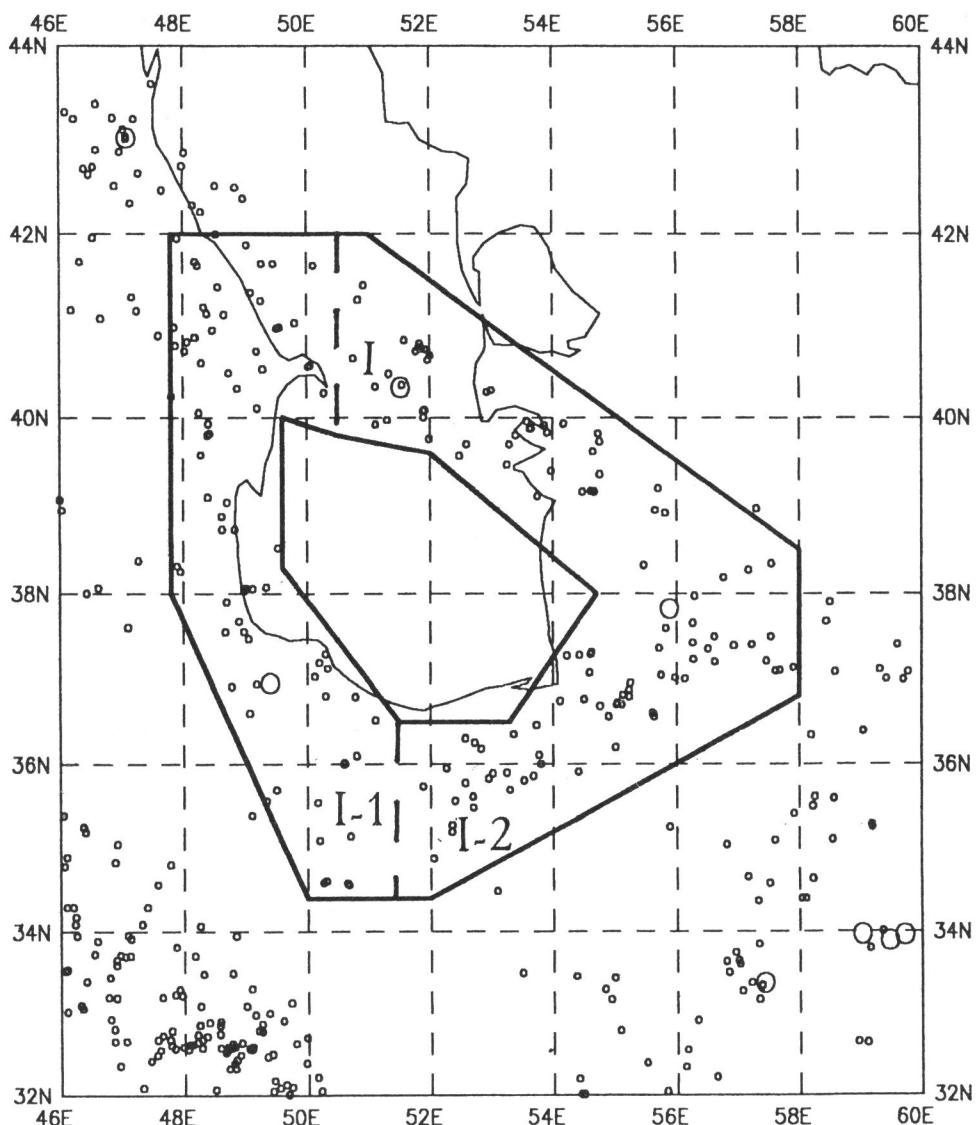


Рис. 20. Сейсмичность и варианты полигонов Южного Прикаспия  
Сплошная линия – граница южного Прикаспия, как единой структуры (I), штриховая –  
граница между западной (I-1) и восточной (I-2) его частями. Обозначения, как на рис. 3

Поскольку значительная часть этой территории выходит за пределы СНГ, в качестве исходных данных здесь использован каталог NEIC за 1964 – 1992 гг. В пределах этой территории с 1964 г. произошли три землетрясения с  $M \geq 6.5$ , параметры которых приведены в табл. 11.

ТАБЛИЦА 11

N п/п	Дата	Координаты		Глубина, км	$M$
		$\varphi^{\circ}, N$	$\lambda^{\circ}, E$		
1	30.07.1970	37.82	55.88	19	6.6
2	16.09.1989	40.33	51.53	54	6.5
3	20.06.1990	36.95	49.40	18	7.7

При анализе сейсмичности в пределах всего кольца (см. рис. 20) алгоритм КН диагностировал тревоги только перед двумя последними сильными событиями при практическом отсутствии ложных тревог, за исключением периода после первого сильного землетрясения 1970 г. (рис. 21, полигон I). Попытка прогноза сильных землетрясений этого региона отдельно для западной и восточной его части оказалась неудачной (рис. 21, полигон I-2): во-первых, значительно увеличивается число ложных тревог и, во-вторых, сильное землетрясение 1990 г. в Иранском Прикаспии удается предсказать, анализируя всю структуру в целом, и не удается – при анализе сейсмичности только ее западной части (рис. 21, полигон I-1). Мы можем предположить связь процесса подготовки этого землетрясения с тектоническими движениями в Эльбурс-Копет-Дагской области, что подтверждается распределением эпицентров в периоды, предшествующие сильным землетрясениям (рис. 22).

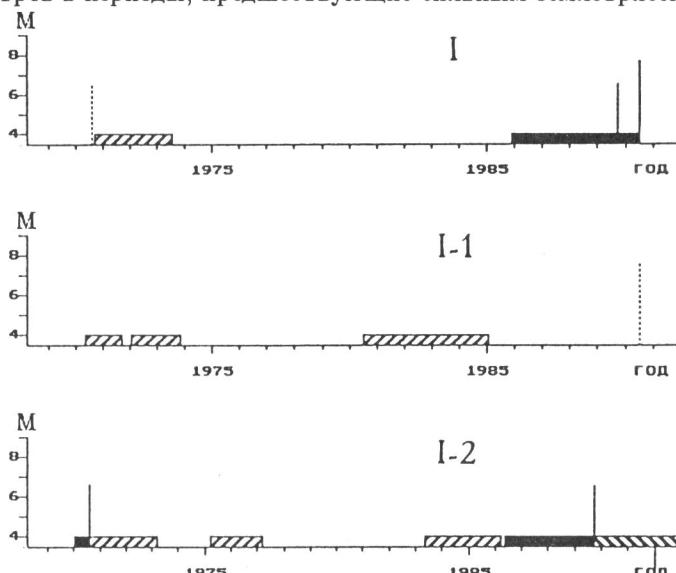


Рис. 21. ППВ и сильные землетрясения для полигонов: Южный Прикаспий, как единая структура (I), западная (I-1) и восточная (I-2) часть Южного Прикаспия. Обозначения, как на рис. 4

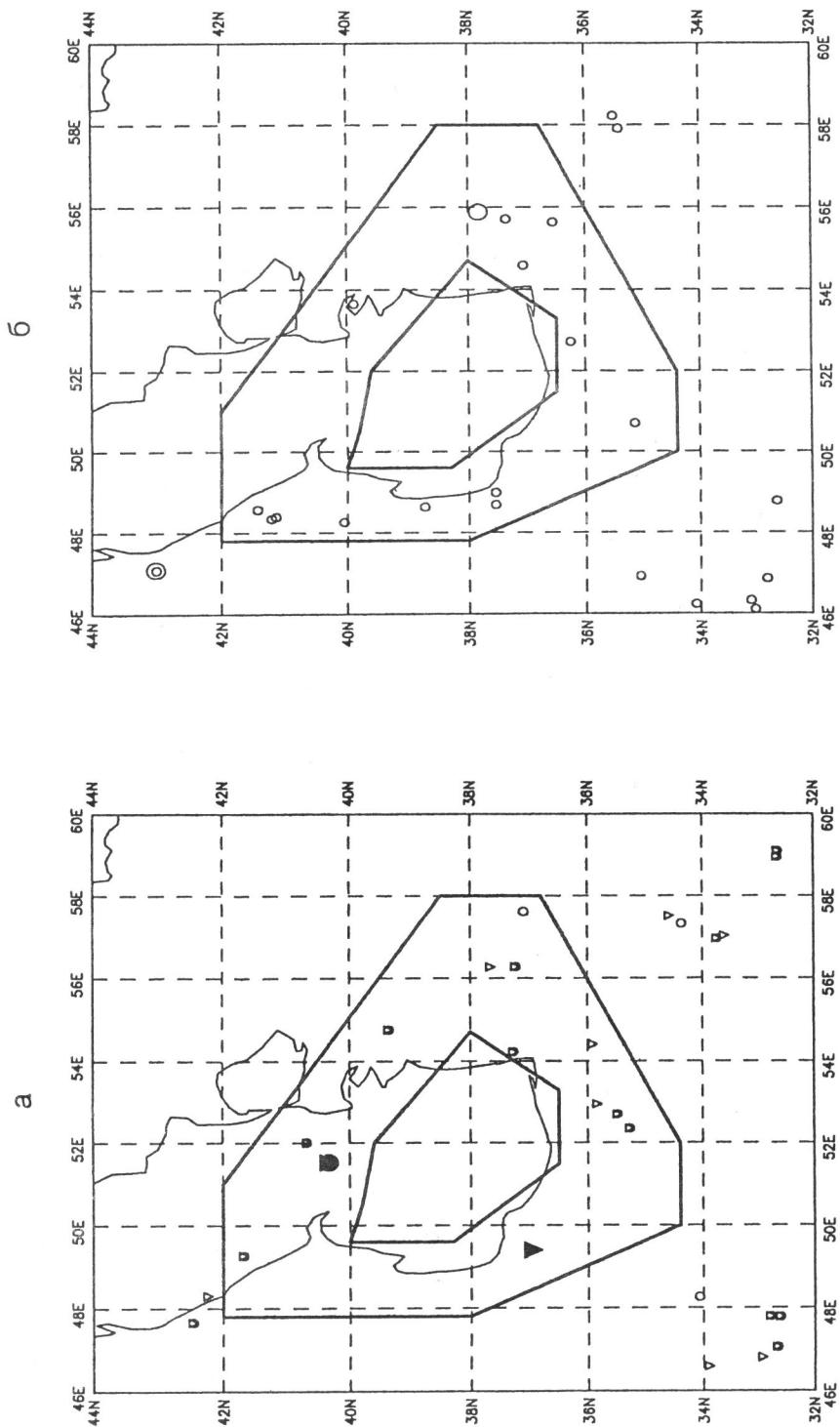


Рис. 22. Сейсмическая ситуация на территории Южного Прикаспия в различные периоды времени  
 а – перед сильными землетрясениями с 16.09.1986 по 15.09.1989 (кружки), с 20.06.1987 по 19.06.1990 (треугольники); б – перед ложной тревогой с 01.01.1970 по 01.01.1973 (кружки). Большой черный кружок и треугольник – эпицентры землетрясений, прогнозируемых в соответствующий период времени

Из сравнения результатов прогноза для Южного Прикаспия с результатами прогноза для Копет-Дага видно, что сильное землетрясение 1970 г. можно устойчиво прогнозировать лишь в случае анализа локального каталога. Каталог NEIC для рассматриваемой территории, по-видимому, недостаточно полон в период с 1964 по 1970 гг.

В заключение сделаем некоторые выводы, основанные на результатах ретроспективного прогноза землетрясений в системах нарушений, рассмотренных в этом разделе.

Прежде всего, еще раз подчеркнем, что выделение Копет-Дага как целостной самостоятельной геологической структуры не оправдывает себя для целей прогноза. Геодинамическая картина здесь, как и в ранее рассмотренных регионах, оказывается более сложной: на сейсмичность Копет-Дага влияет как сопредельная складчатая дуга Эльбурса–Аладага–Биналунда, так и массив Лут.

Развитие сейсмических событий можно естественно объяснить с помощью геодинамической модели, изображенной на рис. 1. Давление, передаваемое массивом Лут на север, естественно разделяет структуру Копет-Дага на две части: западную – сейсмичную и восточную – асейсмичную. Повышенная сейсмичность западной части, как и правосторонние сдвиги по Копет-Дагскому разлому и левосторонние по системе Эльбурс, в рассматриваемой модели получают объяснение с позиции вытеснения треугольного блока, зажатого между системами нарушений Копет-Дага и Эльбурса. Этим и объясняются наилучшие результаты прогноза в системе разломов, включающей в себя сочленение линейной зоны Копет-Дага и дуги Эльбурса.

## 5. Кавказ и Закавказье

Современная геодинамика этого региона – типичный случай внутриплитной коллизионной тектоники – может быть рассмотрена в модели общего сжатия как результат сближения Туранской плиты с севера и Аравийской с юга. Не менее существенно для понимания геодинамики и то, что на западе и востоке происходит развитие молодых рифтогенных структур растяжения вблизи впадин Черного моря (Аджаро-Триалетская, Риони – западный Кавказ) и юга Каспия (Талышская, Куринская – восточный Кавказ). Сложное геологическое строение региона как аккреционного складчатого пояса с жесткими блоками докембрийской и палеозойской консолидации и мезокайнозойскими зонами рифтогенного, субдукционного типов определяют резко неоднородную картину распределения напряжений. Как следствие этого, на фоне общего сжатия возникают многочисленные более частные структуры растяжения, области пониженного давления, концентрация тектонических напряжений в узких пограничных зонах между блоками. Такая неоднородность в геологическом строении верхних горизонтов коры тесно взаимосвязана и с ее глубинной неоднородностью.

Генерализованную структуру Кавказа и Закавказья можно представить себе как решетку двух линейных систем разрывных нарушений различной природы (рис. 23): восток–северо-восточного (I–IV) и меридионального (A) простираций, наложенных на складчато-надвиговые дугообразные общекавказские запад–северо-западные структуры. Важно, что разрывы в дугообразных структурах обще-кавказского простирания проявляются дискретно, концентрируясь в нескольких

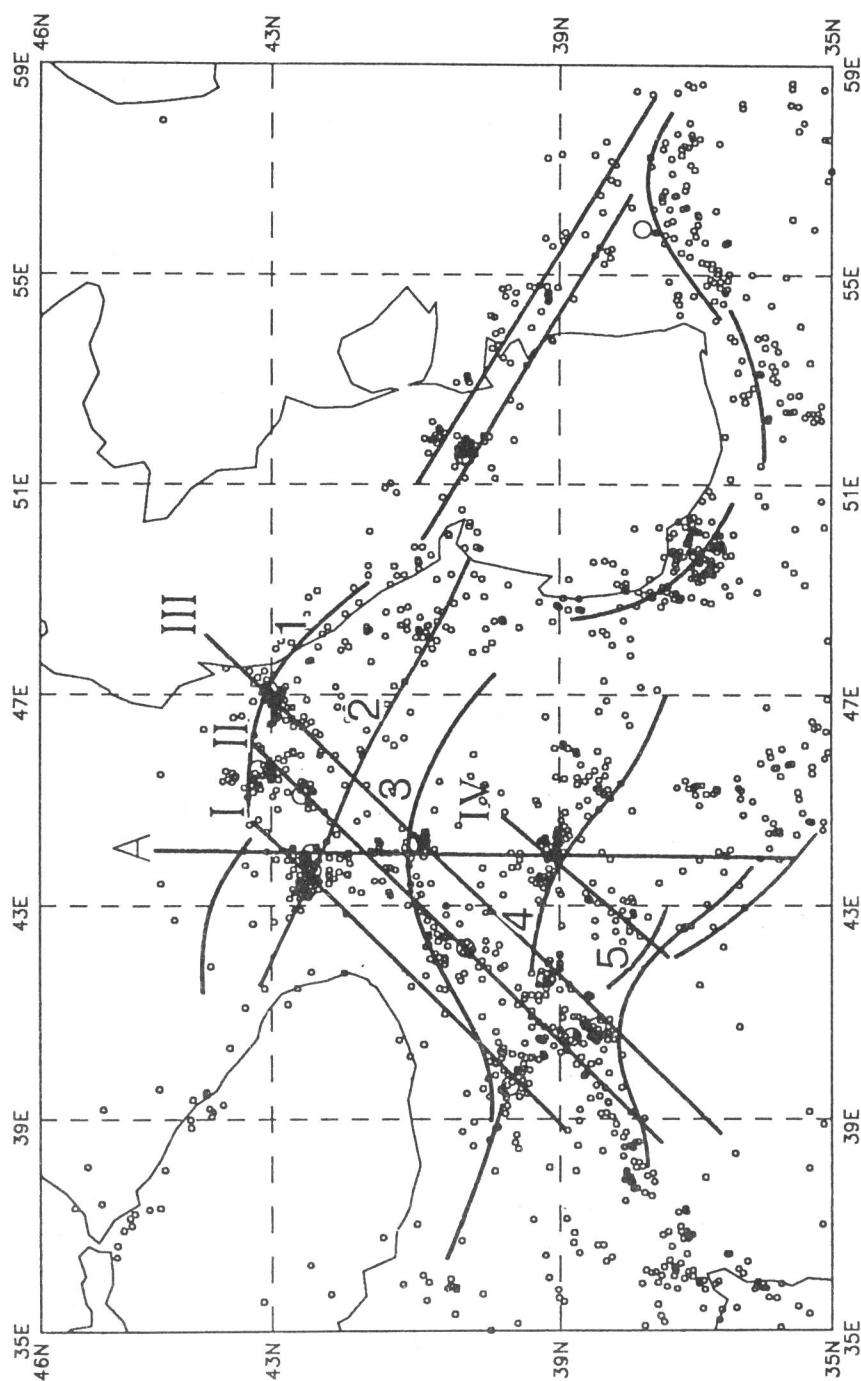


Рис. 23. Сейсмичность и главные структурные элементы Кавказа и Закавказья  
I–IV – разрывные нарушения восток-северо-восточного простирания, A – разрывные нарушения меридионального простирания; 1–5 – главные сейсмополакующие зоны. Кружки – эпицентры землетрясений:  
маленькие – с магнитудой  $M \geq 3$ , большие – с  $M \geq 6,5$ .

главных ослабленных зонах, с максимально благоприятными для проявления по- движек физико-механическими свойствами пород. Можно выделить пять таких главных сейсмолокализующих зон. Перечислим их последовательно с севера на юг (см. 1–5 на рис. 23).

1. Зона северного предгорья Большого Кавказа с системами формирующихся складок, покровов в молодых мел-палеогеновых и неоген-четверичных отложений.

2. Зона южного склона Большого Кавказа, представленная системами продол- ных грабенов и горстов в юрско-меловых породах. В мезозое здесь предполагается зона субдукционного типа развития.

3. Зона Севано-Аккеринской главной сутуры, разделяющей Большекавказскую и Закавказскую плиты с выходами офиолитовых комплексов мелового возраста, местами серпентинитовым меланжем и системами сбросо- и взбросо-сдвигов. Эта зона, переходящая далее на запад в Северо-Анатолийскую, как и другие подобного типа сутуры, местами сложно разветвляется на серии субпараллельных наруше- ний с узкими горсто-грабеновыми блоками внутри зон.

4. Сутурная зона с меловыми гипербазитами Южно-Анатолийского разлома, проходящая вблизи озера Ван.

5. Зона покрово-надвиговых структур Загроса вдоль границы с Аравийской плитой, которая рассматривалась выше.

Системы поперечных разрывных нарушений, пересекающих складчатые дуги Кавказа и Закавказья северо-восточного и меридионального простирания, имеют различную природу и геологическое выражение.

Линеаменты северо-восточного простирания располагаются кулисообразно (I, II, III, IV на рис. 23) и представляют собой фрагменты региональной системы разломов, развивающихся от Средиземноморья до Северного Кавказа и Каспия.

Динамика перемещения Аравийской плиты определяет преобладающее развитие левосторонних сдвигов. Реально, в верхнем структурном этаже эта система ку- лисообразных левосторонних сдвигов выражена неотчетливо в многочисленных, но мелкоамплитудных сдвигах. Можно предполагать, что в нижнем этаже это направление проявлено более отчетливо и наследует первичную неоднородность и простижение структур докембрийско-палеозойского фундамента.

Система разломов меридионального простирания (A на рис. 23) проявлены очень отчетливо и выделялись всеми исследователями Кавказа как главные поперечные структуры, контролирующие кайнозойский магматизм и оруденение [9, 11, 20]. Разломы меридионального простирания четко выражены на всех геоморфологи- ческих схемах Кавказа по "ступеням" рельефа и хорошо дешифруются на косми- ческих снимках [21].

Сопоставим теперь охарактеризованную общую картину разрывных структур Кавказа и Закавказья с сейсмичностью этого региона. В основном здесь происхо- дят коровые землетрясения с гипоцентрами на глубине не более 10–12 км. Карта эпицентров землетрясений (рис. 24) показывает резкую пространственную нерав- номерность сейсмической активности. Обращает на себя внимание то, что места наибольшей сейсмической активности приурочены к узлам пересечения систем ду- гообразных покровно-надвиговых складчатых структур с линейными разрывными нарушениями.

На основе предложенной геодинамической модели Кавказа и Закавказья было

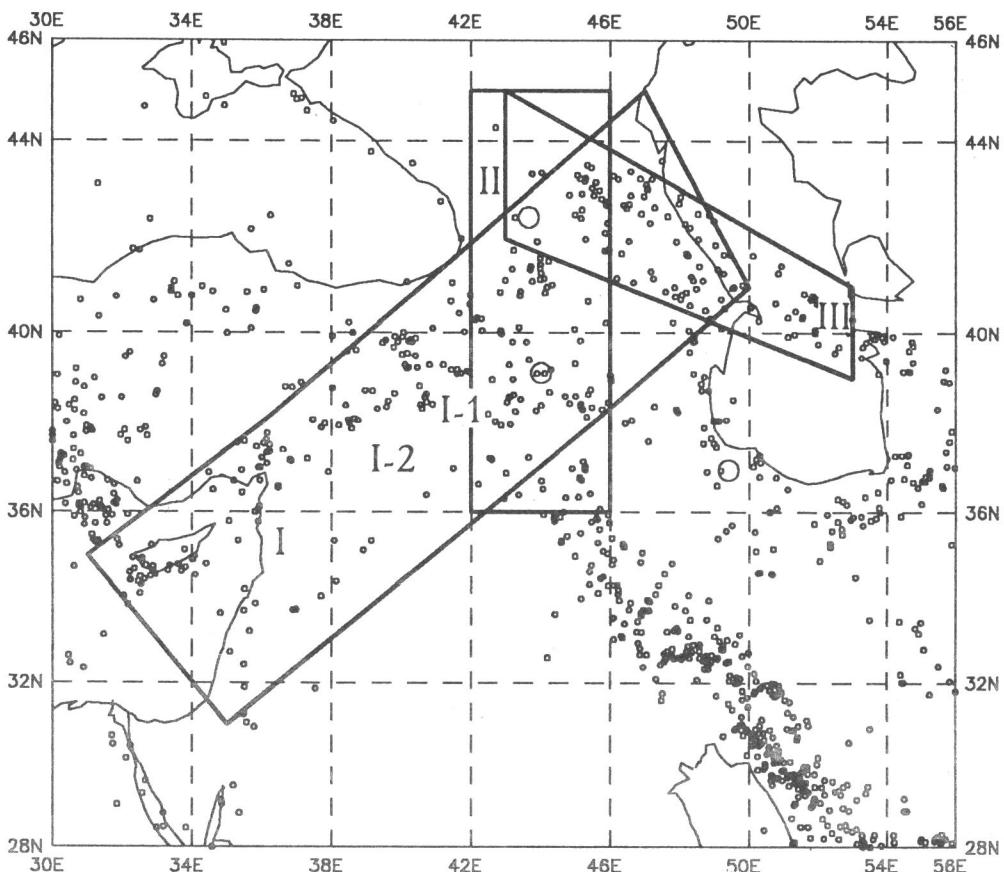


Рис. 24. Сейсмичность и варианты полигонов для Кавказа и Закавказья

Сплошная линия – границы структур: северо-восточного простирания (I), меридионального простирания (II), юго-западного простирания (III). Штриховая линия – граница между северной (I-1) и южной (I-2) частями структуры северо-восточного простирания. Обозначения, как на рис. 3

рассмотрено несколько вариантов систем нарушений (см. рис. 24):

1) структуры северо-восточного простирания региональной системы сдвигов Крит–Северный Кавказ (полигон I);

2) структуры меридионального простирания молодых разломов магнитизма и неотектонических поднятий (полигон II);

3) структуры общекавказского северо-западного простирания Большого Кавказа за продолжении сейсмической зоны Копет-Дага (полигон III).

Выбор этих трех полигонов позволяет исследовать вопрос о приоритете структур различного простирания в формировании сейсмичности Кавказа и Закавказья. Для структуры северо-восточного простирания было рассмотрено три варианта: северо-восточная зона как единая структура и отдельно ее северная, наиболее сейсмически активная часть, где сконцентрированы все землетрясения с  $M \geq 6.5$ ,

которые произошли здесь с 1992 г. (полигон I-1) и южная, менее активная (полигон I-2).

В качестве сильных здесь рассматривались землетрясения с  $M \geq 7.0$ , параметры которых приведены в табл. 12.

ТАБЛИЦА 12

N п/п	Дата	Координаты		Глубина, км	$M$
		$\varphi^\circ, N$	$\lambda^\circ, E$		
1	24.11.1976	39.12	44.02	36	7.3
2	29.04.1991	42.45	43.67	17	7.0

Заметим, что разрушительное Спитакское землетрясение 1988 г. имеет в каталоге NEIC магнитуду 6.8 и поэтому не было включено в число сильных землетрясений и не прогнозировалось.

Результаты прогноза для всех рассмотренных вариантов даны на рис. 25 и сведены в табл. 13. Наилучший результат достигается при анализе сейсмичности структур северо-восточного простирания – главной сдвиговой зоны Крит – Северный Кавказ (полигон I), причем при раздельном анализе южной и северной его частей. Результаты прогноза для полигона II оказались неудовлетворительными – оба сильных землетрясения являются пропусками цели. Для полигона III результат положительный – ППВ предшествует единственному для этого полигона Рачинскому землетрясению 1992 г. Заметим, что алгоритм КН диагностирует здесь текущую тревогу, т.е. возможно возникновение сильного землетрясения на территории Большого Кавказа в пределах этого полигона.

ТАБЛИЦА 13

Вариант	$n/N$	$\tau, \%$	$k/K$
I	0/2	47.8	4/6
I-1	0/2	27.5	2/4
I-2	0/0	0	0/0
II	1/2	67.4	4/5
III	0/1	38.9	2/3

Примечания: Обозначения, как в табл. 2.

Сравнение карт эпицентров землетрясений в периоды, предшествующие сильным землетрясениям (рис. 26), позволяют сделать выводы о локализации предвестников сильных землетрясений данного региона. Землетрясения, сформировавшие предвестники сильного землетрясения 1976 г., приурочены к сдвиговой структуре северо-восточного простирания Крит–Северный Кавказ. Сейсмическая активность, предшествовавшая Рачинскому землетрясению 1992 г., локализована как в структуре северо-восточного простирания, так и в структурах общекавказского северо-западного простирания, чем объясняются положительные результаты прогноза для этих двух полигонов.

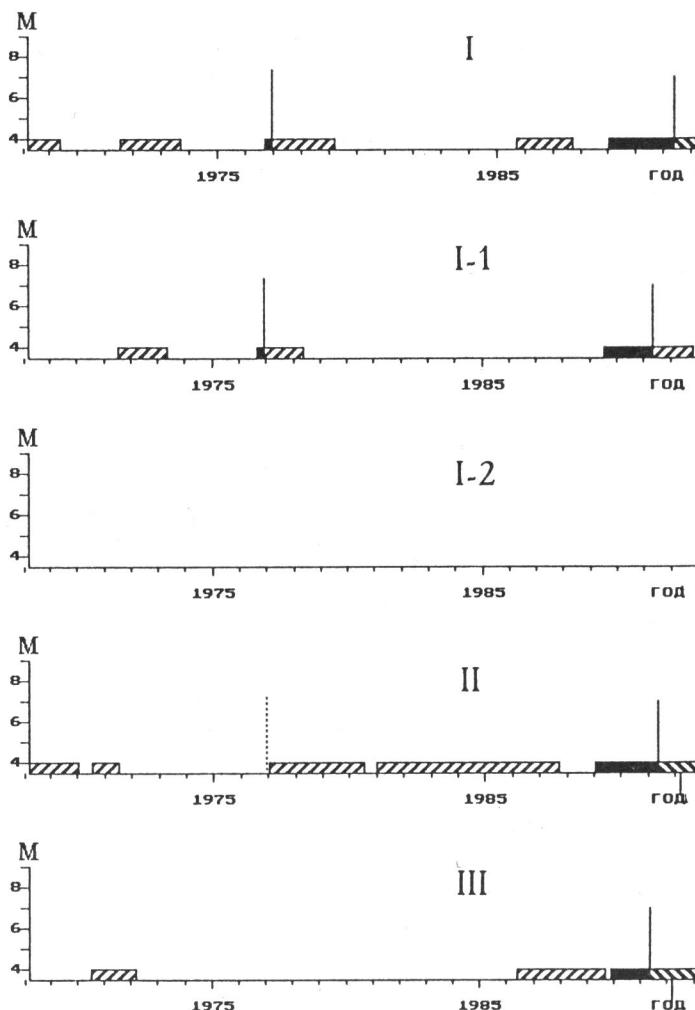


Рис. 25. ППВ и сильные землетрясения для полигонов Кавказа и Закавказья: структуры северо-восточного простирания (I), ее северной (I-1) и южной (I-2) части; структуры меридионального простирания (II); структуры юго-западного простираия (III). Обозначения, как на рис. 4

Таким образом, из самого общего анализа геодинамики, сейсмичности и результатов прогноза для территории Кавказа и Закавказья можно сделать следующие выводы.

Во-первых, как и в других регионах, сейсмотектоническая активность распределена здесь крайне неравномерно и определяется, в региональном плане, местами пересечений сейсмолокализующих структур – дуг, горизонтов, покровов – и разрывными структурами северо-восточного простирания.

Во-вторых, использование алгоритма КН позволило сделать важное заключение: из трех систем секущих нарушений сдвиги меридионального направления значи-

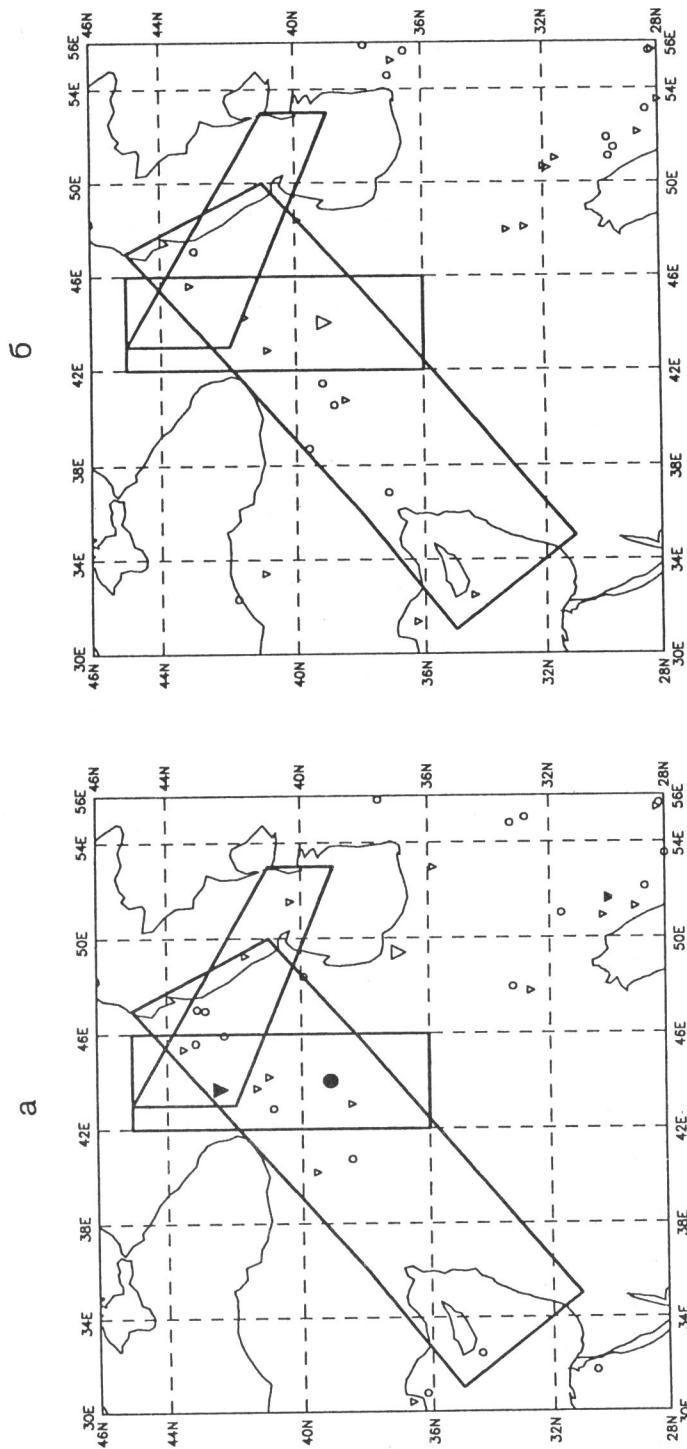


Рис. 26. Сейсмическая ситуация на территории Кавказа и Закавказья в различные периоды времени

*a* – перед сильными землетрясениями с 24.11.1973 по 23.11.1976 (кружки), с 29.04.1991 по 28.04.1991 (трехугольники); *b* – перед ложными тревогами с 01.07.1968 по 01.07.1971 (кружки), с 01.05.1975 по 01.05.1978 (треугольники). Большой черный кружок и треугольник – эпицентры землетрясений, прогнозируемых в соответствующий период времени; прямые линии – границы полигонов

тельно меньше влияют на возникновение сильных землетрясений данного региона, в то время как основное значение имеет развитие левосторонних сдвигов северо-восточного простирания, экранирующее развитие напряжений, связанных с воздействием Аравийской плиты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведем итоги проведенного исследования.

1. При использовании алгоритма КН были получены удовлетворительные результаты по ретроспективному прогнозу землетрясений практически для всех проанализированных регионов. Это подтверждает ранее сделанный вывод о том, что качество прогноза существенно зависит от выбора анализируемых полигонов, отражающих различные варианты взаимодействия активных тектонических нарушений. Иными словами, знание реальной геологии, тектонического строения и современной геодинамики – необходимое условие при разработке и применении алгоритмов прогноза.

2. Оптимальные варианты прогноза получаются при выделении блоков, зон, систем активных тектонических нарушений, которые во многих случаях принципиально отличаются от обычно принимаемого в тектоническом районировании. Главное отличие заключается в том, что при тектоническом районировании выделяются исторически взаимосвязанные целостные структуры дугообразных и линейных складчатых сооружений, а также систем разломов (весь Копет-Даг, Загрос, Красноморский рифт и т.д.). Для целей же прогноза землетрясений более перспективно, оказывается, выделять полигоны довольно сложных очертаний – "Г", "Т", "L"-образно изогнутые, объединяющие взаимосвязанно развивающиеся системы разломов и пликативных дислокаций, которые могут быть различной природы, иерархии, масштабов проявления и являться фрагментами разных геологических структур. В итоге проведенного исследования устанавливается несколько типичных вариантов взаимодействия систем активно развивающихся нарушений.

В частности, это:

- системы тройного сочленения рифтов, а также рифтов и оперяющих их сдвиговых зон типа трансформных разломов (Красное море, Иордано-Мертвоморский разлом и т.д.);

- дугообразные системы покровно-складчатых сооружений, сочетающиеся с радиальными (по отношению к фронтальным поверхностям покровов) зонами разломов (Копет-Даг, Северный Кавказ); в ряде случаев такие системы покровно-складчатых сооружений на своем продолжении могут переходить в структуры субдукционного типа (Загрос, Тавриды, Кипр);

- системы регионального проявления кулисообразных сдвиговых зон, пересекающие покровно-складчатые структуры (Кавказ, Закавказье, Загрос), а также спиралеобразные сдвиговые системы, обрамляющие жесткие массивы (Лут).

В заключение подчеркнем, что при разделении структур глобального масштаба – поясов – на отдельные сейсмотектонические области (табл. 14) существенное значение имеют экранирующие системы нарушений, которые локализуют напряжения, "гасят" их и не передают в сопредельные блоки. Так, для рассмотренной области Малой Азии такими экранирующими нарушениями, определяющими гра-

ТАБЛИЦА 14. Иерархия сейсмотектонических единиц

Масштаб	Сейсмотектоническая единица	Примеры
Глобальный	Сейсмотектонический пояс	Тетис
Региональный	Сейсмотектоническая область Сейсмотектонический регион	Малая Азия Кавказ
Локальный	Сейсмотектонический район Сейсмотектонический узел	Севанский район Спитакский узел

ницы областей, являются системы левосторонних сдвигов восточного Средиземноморья и трансформного разлома Оуэн (см. рис. 1). Эти две границы подразделяют Альпийско-Гималайский пояс на три сейсмотектонические области: Восточное Средиземноморье, Малая Азия (рассмотренная в статье) и Индо-Памир.

При этом существенно, что в каждой сейсмотектонической области проявляется свой главный структурный элемент, определяющий распределение основных векторов напряжений, динамику перемещения блоков и их взаимодействие. Для рассмотренной части Тетиса в качестве такого главного элемента, как мы видели, может быть выделена Аравийская плита, перемещение которой к северу предопределяет развитие сейсмических событий на территории Малой Азии.

Для Центрального и Восточного Средиземноморья, по-видимому, главное значение в современной геодинамике могут иметь мантийные диапирсы, а для Индо-Памира – взаимное перемещение жестких глыб – Деканская, Таримская и др.

Более детальное рассмотрение Средиземноморья и Индо-Памира позволит в дальнейшем проверить намеченные в статье выводы и высказанные гипотезы.

**Благодарности.** Работа была поддержана Государственным Департаментом США по программе "Человек и Биосфера" (грант 1753-300201); И. М. Ротвайн была поддержана также Международным Научным фондом (грант MB3000). Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить академика В.И.Кейлис-Борока за постоянное внимание и плодотворные дискуссии в ходе работы и О.В.Новикову за помощь в подготовке этой статьи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Keilis-Borok V.I., Kossobokov V.G. Premonitory activation of earthquake flow: algorithm M8 // Phys. Earth and Planet. Inter. 1990. Vol.61, N.1-2. P.73-83.
2. Keilis-Borok V.I., Rotwain I.M. Diagnosis of time of increased probability of strong earthquakes in different regions of the world: algorithm CN // Phys. Earth and Planet. Inter. 1990. Vol.61, N.1-2. P.52-72.
3. Seismotectonic map of the Middle East. Scale 1:5000000. Complited by A.Haghipour. Publ. by Geol. Survey of Iran. and Comission for the Geological Map of the World, 1992.
4. Seismological map of Iran Scale 1:25000000. Complited by M.Berberian. Printed by N.C.C. Offset Press Tehran, 1976. Geological Survey of Iran, Report N39, 1976.
5. Аллен К.А., Кейлис-Борок В.И., Ротвайн И.М., Хаттен К. Комплекс долгосрочных сейсмологических предвестников (Калифорния и некоторые другие регионы)

- // Математические методы в сейсмологии и геодинамике. М.: Наука, 1986. С.23–37.  
(Вычисл. сейсмология; Вып.19).
6. Global Hypocenter Data Base CD-ROM, 1964 – 1992. USGS-NEIC, USA. 1993.
  7. Землетрясения в СССР, 1962–1991 гг. М.: Наука, 1964–1992.
  8. Arieh E., Artzi D., Benedik N., et.al. Revised and apdated catalog of earthquake in Israel and adjacent areas, 1900–1992. Inst. Petroleum Res. Geophys. Holon: Israel. 1993.
  9. Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И. Палеогеодинамика. М.: Наука, 1993. 191c.
  10. Рундквист Д.В., Волчанская И.К. Неотектоника и металлогенез // Геотектоника, 1987. N3. С.3–15.
  11. Adamia S., Bergougnan H., Fourgnin C., et al. The Alpine Middle East between the Aegean and the Oman traverses // Geologie des Chaines Alpines ussues de la Tethys. Theme 3. Alpine Asia. P.122–136.
  12. Красный Л.И. Глобальная делимость литосферы в свете геоблоковой концепции // Сов. геология, 1984. N 7. С.17–31.
  13. Летников Ф.А. Синергетика геологических систем. Новосибирск: Наука, 1992. 229c.
  14. Рундквист Д.В. О пространственно-временных закономерностях размещения месторождений полезных ископаемых // Проблемы развития сов. геологии. Тр. ВСЕГЕИ, новая серия. 1971. Т.177. С.266–300.
  15. Рундквист Д.В. Фактор времени и две категории законов в геологии. Минералогия – народному хозяйству // Материалы VII съезда ВМО АН СССР. Л.: Изд. ВМО, 1987. С.7–11.
  16. Садовский М.А., Болхвитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М: Наука, 1987. 100c.
  17. Хайн В.Е., Балуховский А.Н. Историческая геотектоника (мезозой и кайнозой). М.: Авиар. 1993. 450 с.
  18. Arieh E., Rotwain I.M., Steinberg J., et al. Diagnosis of time of increasd probability of strong earthquakes in the Jordan-Dead sea rift zone // Tectonophysics, 1992. T.202. P.351–359.
  19. Зоненшайн Л.П., Ле Пишион К. Глубоководные впадины Черного и Каспийского морей – остатки мезозойских тыловых бассейнов. История океана Тетис. М: Институт океанологии АН СССР. 1987. С.74–93.
  20. Лордкапанидзе М.Б. Альпийский вулканализм и геодинамика центрального сегмента Средиземноморского складчатого пояса. Тбилиси: Мецниереба. 1980.
  21. Рундквист И.К., Тронин А.А., Захаров В.И. и др. Геодинамически активные зоны разломов в период аэрокосмических фото и тепловых съемок. Экспресс Информация N 2-90 АН СССР. Научный совет по космическим исследованиям. С.2–11.