

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ИФЭ

ДОЛГОВРЕМЕННОЕ
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
СЕЙСМИЧЕСКОЙ
ОПАСНОСТИ
ПО КОМПЛЕКСУ
ГЕОЛОГО-
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ
ДАННЫХ

· НАУКА ·

К35944

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

Межведомственный совет по сейсмологии
и сейсмостойкому строительству
при Президиуме Академии наук СССР

ДОЛГОВРЕМЕННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ПО КОМПЛЕКСУ ГЕОЛОГО- ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАнных

К35944

*Слу ВЕРСЕТ
К-6 баар ПНИ
Колел Ам Гиллы
Тарлат ФРОЗ
ВНИ Сов Куур
НАМ СМ РУЗ Уе
Слав У ВЗ
Гр ПМ арт
(M)*

Ответственный редактор
доктор геолого-минералогических наук
Г.И. РЕЙСНЕР

св.20
БИБЛИОТЕКА
ОРДЕНА ЛЕНИНА
Института Физики Земли
АН СССР



МОСКВА "НАУКА"

1988

МОСКОВСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Долговременное прогнозирование сейсмической опасности по комплексу геолого-геофизических данных / Л.В. Ивановская, Д.Б. Фирсова, Ю.В. Хоменюк, Ю.К. Щукин. — М.: Наука, 1988. — 108 с. — ISBN 5-02-006015-1

Исследуется проблема оценки сейсмической опасности по комплексу геолого-геофизических данных. Разработаны методические рекомендации по выделению зон возможных землетрясений в различных регионах страны. Составлена серия карт, на основе которой можно осуществить долговременный прогноз сейсмичности исследуемой территории.

Для сейсмологов, геофизиков, строителей.

Табл. 35. Ил. 47. Библиогр.: 28 назв.

Рецензенты:

М.Е. Артемьев, В.Н. Шоло

1903020000-460
Д $\frac{1903020000-460}{042(02)-88}$ 162-88-IV

ISBN 5-02-006015-1

© Издательство "Наука", 1988

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей монографии представлены результаты многолетнего использования системы программ ПОИСК для оценки долговременной сейсмической опасности различных районов Советского Союза по комплексу геолого-геофизических и сейсмологических данных.

Впервые такие работы были выполнены в Северо-Тяньшаньском сейсмоактивном регионе и опубликованы в статьях [Агапова, Хоменюк, Щукин, 1973; Хоменюк, Фирсова, 1975; Хоменюк и др., 1978], а затем распространены на территорию Узбекистана [Хоменюк и др., 1979; Борисов и др., 1983], трассу БАМа [Борисов и др., 1983; Щукин и др., 1984], Балканы [Ивановская, Добрев, Щукин, 1983] и другие регионы, материалы по которым еще не опубликованы. Совершенствование методики обработки исходных данных, интерпретации результатов вычислений, углубление представлений о природе сейсмичности привели к необходимости уточнения некоторых из ранее опубликованных результатов. Были использованы полученные авторами новые материалы для Крымского, Кавказского, Курило-Камчатского, Бухаро-Газлийского регионов, Туркменской ССР, а также территории СССР в целом.

Методика, используемая для обработки комплекса геолого-геофизических данных, и последующая интерпретация результатов этой обработки позволяют выполнять районирование исследуемой территории по степени возможности возникновения в ее пределах землетрясений различной силы, показателем которой может быть либо магнитуда M , либо энергетический класс K . Результаты интерпретации оформляются в виде серии карт, которые позволяют не только осуществить прогноз долговременной сейсмичности, но и оценить степень генетической однородности исследуемых очаговых зон.

Исходными данными для решения этих задач являются результаты сейсмологических (макросейсмических и инструментальных) наблюдений и материалы стандартных производственных геофизических работ (гравиметрия, магнитометрия, сейсморазведка и др.), а также данные геологической, геоморфологической, топографической и др. съемок.

В качестве основного средства решения названных задач взяты топологические методы опознавания образов. Они позволяют распространить результаты сейсмологических наблюдений в эпицентральных зонах землетрясений на их окрестности и являются наиболее адекватным математическим аппаратом для такого рода экстраполяций. Практически это осуществляется с помощью описанной ниже программы опознавания

образов ПОИСК. По этой программе ЭВМ обучается в тех точках исследуемой территории, где произошло землетрясение, а затем с помощью системы изолиний сходства (определяется по всей совокупности введенных в ЭВМ данных) экстраполирует результаты своего обучения на еще не изученные части исследуемой территории.

Главное содержание разработанной методики районирования составляют топологические методы ее геометризации. Ее физико-геологическая основа — это естественная связность среды, в которой зарождаются землетрясения, непрерывность отображения ее свойств в различных геолого-геофизических полях, а также локальные корреляционные связи между изменениями параметров и степенью очаговой сейсмичности в пределах ограниченной площади или территории. Тот факт, что такого рода связи в определенном смысле являются случайными и на других площадях или в других районах могут оказаться совершенно иными, нисколько не мешает использовать их для решения задач районирования конкретного региона, для которого они установлены.

В любом исследуемом регионе, где отмечались землетрясения различной силы, указанные выше связи могут быть определены количественно и не на основании абстрактных физико-геологических моделей, а непосредственно по результатам инструментальных либо макросейсмических наблюдений.

Математический аппарат, который используется для этих целей, обеспечивает при каждом обучении ЭВМ на какой-либо площади и для каждого из введенных в нее параметров автоматическое определение и учет корреляционных связей и информационного веса на данной конкретной площади. Те параметры, у которых при таком анализе их информационные веса оказываются пренебрежимо малыми, на окончательные результаты практически не влияют. Благодаря этому алгоритм обработки информации автоматически адаптируется к любому набору вводимых в него данных по тем критериям оптимальности, которые в него заложены.

Авторы сознательно избежали вопросов анализа других известных методов долговременного прогнозирования, разрабатываемых в ИФЗ АН СССР (В.П. Кейлис-Борок, А.Д. Гвишиани; В.И. Бунз; Г.И. Рейснер, Н.В. Шебалин, И.Е. Губин и др.), ИППИ АН СССР (В.Г. Гитис и др.), в других академических институтах страны (В.И. Кнауф, В.П. Солоненко и др.). Многочисленность публикаций на эту тему, незавершенность многих разработок авторов настоящего исследования и другие причины не позволяют выполнить сравнительный анализ методических подходов в задачах долговременного прогнозирования возможных в будущем очагов крупных землетрясений.

Хочется, чтобы разработки авторов воспринимались читателями не как готовые макеты карт регионального прогнозирования землетрясений, а прежде всего как опытно-методические разработки для каждого из выбранных нами сейсмоопасных регионов. Однако эти разработки, дополненные новыми исходными данными, можно преобразовать в практический результат, т.е. геофизическую основу в задачах сейсмического районирования разной детальности. Кроме того, авторы настоящего исследования с оптимизмом смотрят на возможность привлечения данных сейсмологии к задачам практической геологии и геофизики.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ МЕТОДИКИ

1. Физико-геологические и математические основы методики

Все методы выявления, оценки и интерпретации аномальных участков земной коры по геолого-геофизическим данным сводятся, по существу, к одной и той же общей задаче — опознавания тех или иных геологических объектов по совокупности отвечающих им полей, которые всегда можно рассматривать как их образ. Поэтому основу любых методов комплексной интерпретации геолого-геофизических и иных данных в геологии с целью построения по ним соответствующих моделей недр составляют методы опознавания образов [Хоменюк, 1974].

Особое место среди них занимают топологические методы опознавания образов [Временные методические указания..., 1979]. С их применением самые разнообразные задачи опознавания в значительной мере утрачивают свою специфику и необходимость в каких-либо особых средствах их решения. Все эти задачи сводятся к общей (а потому и одной из основных) задаче экстраполяции фрагментарного опытного знания от принятых за основу знания отдельных примеров и случаев на значительно более широкую область смежных и аналогичных им ситуаций, которые опытным путем еще не познаны. Решаются такие задачи также единообразно: построением и расширением некоторой отвечающей решаемой задаче топологической структуры и исследованием в ней окрестностей у опорных элементов этой структуры.

Предлагаемая методика выделения потенциальных очаговых зон опирается на следующий элементарный топологический факт: если в какой-либо точке земной коры произошло землетрясение, то новые землетрясения более всего вероятны в некоторой связанной окрестности этой точки, и задача выделения сейсмоопасной зоны на земной поверхности сводится к определению этой окрестности у эпицентров соответствующих землетрясений. Это первая из задач методики — задача оконтуривания сейсмоопасных зон.

Второй задачей методики является прогноз новых очаговых зон путем определения участков земной коры аналогичных сейсмоопасным зонам, которые также должны быть связными. Обе задачи сводятся к построению связных окрестностей, из которых первые строятся по связности и непрерывности вокруг реальных опорных точек (эпицентров), а вторые — вокруг прообразов этих эпицентров.

Геологическим обоснованием предлагаемой методики является сформулированное в работе [Сейсмическое районирование..., 1980] представление об очаге тектонического землетрясения как о некотором физическом объеме или блоке, каждая частица которого, "испытывая в процессе де-

формации блока почти мгновенное смещение на то или иное расстояние, служит источником упругих колебаний". Любые такие объемы или блоки и даже целые регионы в большей или меньшей степени обладают естественной физической связностью, а потому также и плавным изменением физических свойств, которое непрерывно отражается и в соответствующих физических полях приповерхностных и глубинных структур. Резкие изменения свойств среды в зонах разломов, в областях выклинивания слоев и т.п. не противоречат представлению о связности среды, а, наоборот, являются прямым следствием этого основного ее свойства.

Если даже очаг землетрясения рассматривается только как участок разрыва сплошности среды [Костров, 1975], то и тогда изложенные выше соображения полностью сохраняют свою силу, так как среда по обе стороны от разрыва по-прежнему остается связанной. По этим причинам использование топологических методов опознавания образов, которые реализованы в системе программ ПОИСК, для целей прогноза долговременной сейсмической опасности является наиболее адекватным решаемой задаче.

Практическая реализация изложенного подхода может оказать существенную помощь при решении одной из основных задач сейсмологии, которые сформулированы в работе [Сейсмическое районирование..., 1980] "...установить подобие очаговых зон ($M_{\text{макс}}, h$, км) и инженерно-геологических условий в пунктах, где имеются акселерограммы и где их предполагается применить для расчетов".

2. Сущность методики¹

На исследуемой территории разбивается некоторая сеть, которая может быть как равномерной — градусной или прямоугольной, — так и неравномерной. Для каждой из точек (узлов) этой сети по совокупности отвечающих этой точке значений геолого-геофизических параметров определяется степень ее сходства с теми точками территории, где произошли землетрясения определенной силы, оцениваемой магнитудой M или энергетическим классом K . Технически это выполняется с помощью уже упоминавшейся программы опознавания образов ПОИСК. При этом точки, лежащие вблизи эпицентров землетрясений и в зонах заведомо асейсмичных, принимаются за опорные (эталонные) и используются соответственно в качестве эталонов одного из двух классов: класса A , если эти точки лежат в сейсмичной зоне, и класса \bar{A} , если они лежат в асейсмичной зоне. Все остальные точки сети считаются неизвестными (класс X) и опознаются. При этом в отличие от других программ, в которых опознавание сводится лишь к классификации опознаваемых объектов, программой ПОИСК вычисляются различные количественные характеристики степени сходства опознаваемых точек с эталонами, чем обеспечивается возможность не только их классификации, но и более тонкого дифференцирования. Например, по значениям адекватности, характеризующим допустимость приравнивания произвольных точек на площади точкам, которые приняты за эталонные, точки с одинаковыми значениями адекватности соединяются изолиниями. Эти изолинии оконтуривают окрестности различного порядка вокруг соответ-

¹ Подробно описана в работе [Хоменюк, 1974а].

ствующих опорных точек и тем самым оконтуривают как известные, так и возможные (прогнозные) очаговые зоны. При этом опорным точкам класса A (заведомо высокосейсмичным) отвечает наиболее высокие значения адекватности, а заведомо асейсмичным опорным точкам класса \bar{A} — нулевые значения адекватности.

Глава II

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТОДИКИ

Основой математического обеспечения методики является программа опознавания образов ПОИСК, которая в настоящее время является одной из подсистем одноименной системы программ ПОИСК [Хоменюк и др., 1984]. Первая версия этой программы по алгоритму Ю.В. Хоменюка была составлена В.Р. Лебедеенко в кодах ЭВМ БЭСМ-4 в 1971 г. [Хоменюк, Лебедеенко, 1974]. В дальнейшем были созданы десятки других версий, которые различались между собой языком программирования, типом ЭВМ, на которые они рассчитаны, типом носителя исходной информации и т.д. Тем не менее во всех этих версиях общая структура алгоритма и порядок работы с программой оставались неизменными. Поэтому ниже приведено обобщенное описание программы ПОИСК, которое может быть использовано при работе с любой из ее версий.

Более подробные инструкции и технические описания некоторых из упомянутых выше версий программы ПОИСК уже опубликованы [Хоменюк, 1977, Хоменюк и др., 1984].

1. Общая характеристика программы ПОИСК

Многоцелевая программа опознавания образов ПОИСК предназначена для решения широкого круга прогнозных и иных задач в науках о Земле и ряде других научных областей. Программа реализует топологический подход к проблеме опознавания образов и не требует каких-либо априорных предположений статистического характера, специфических для той или иной конкретной задачи, решаемой с ее помощью.

Программа ПОИСК не требует, чтобы число эталонов различных классов было одинаковым; чтобы комплекс параметров, которыми описываются эталонные и опознаваемые объекты, был стабильным (даже в пределах одной и той же задачи), не требует, наконец, чтобы используемые для прогноза признаки были только количественными или только качественными или же чтобы они имели "физический" или "геологический" смысл, достаточно понятный использующему их специалисту, и т.п.

Все это значительно облегчает практическую работу исследователя, позволяя и помогая ему сосредоточиться на других — более важных и более принципиальных для него вопросах. К их числу относятся прежде всего анализ нюансов постановки решаемой задачи, анализ оценок значений и информативности используемых параметров, а также выбор их рационального комплекса, содержательный анализ результатов корреляционного и дисперсионного анализа. Этот анализ выполняется не только

с точки зрения выявления связей между различными характеристиками используемых параметров и геологией исследуемого объекта, но и с точки зрения возможности использования оценок изменчивости исходных параметров и корреляционных связей между ними в качестве новых дополнительных параметров и признаков.

Основными результатами вычислений по программе ПОИСК являются характеристики абсолютной и относительной степеней соответствия (сходства) между признаками того или иного опознаваемого объекта или явления и опорными элементами (эталоны) соответствующих классов. Помимо этого, по программе ПОИСК вычисляются производные от значений близости и адекватности — чебышевские оценки относительной вероятности принадлежности точек к тому или иному классу, а также выдается информация о ближайших эталонах из этих классов, которая позволяет выделить в них соответствующие подклассы — кластеры.

Все эти дополняющие друг друга характеристики строятся на одной и той же математической основе, что исключает возможность какого-либо внутреннего противоречия между ними и тем самым значительно облегчает возможность их интерпретации, которая не отличается какими-либо априорными моделями или схемами. В то же время, при любой такой интерпретации, необходимо постоянно иметь в виду, что все те характеристики, которые мы относим непосредственно к опознаваемым точкам, объектам или явлениям, вычисляются не для самих этих точек, объектов или явлений, а лишь для их образов, которые определяются используемым нами набором параметров. ЭВМ может по соответствующей программе провести сколь угодно глубокий анализ этих параметров, однако никак не может извлечь из них информации, которая в них отсутствует. Поэтому, чтобы избежать заблуждений, связанных с неправильным истолкованием возможностей ЭВМ или же комплекса вводимых в нее параметров, в программе ПОИСК предусмотрен своего рода самоконтроль в виде контрольного опознавания (самоопознавания) эталонных объектов, при котором вычисляются их типичность и надежность опознавания новых объектов, а также различные количественные характеристики информативности имеющегося комплекса данных и точности вычисления результативных характеристик по данным этого комплекса.

2. Описание основной части алгоритма

Описываемые здесь версии программы ПОИСК рассчитаны на два класса и работают следующим образом.

1. Для обработки на ЭВМ отбираются: обучающая совокупность $\{a_i\}_{i=1}^{m(A)}$, состоящая из $m(A)$ известных представителей класса A ; обучающая совокупность $\{\bar{a}_i\}_{i=1}^{m(\bar{A})}$, состоящая из $m(\bar{A})$ известных представителей класса \bar{A} , а также совокупность $\{x_i\}_{i=1}^{m(X)}$ из $m(X)$ опознаваемых объектов класса X .

2. Каждый из объектов, отобранных по п. 1, описывается в системе из n определяющих параметров $\{\xi^{(1)}, \xi^{(2)}, \dots, \xi^{(n)}\}$ таким образом, что произвольному реальному объекту v_i из V , где $V = A, \bar{A}, X$, ставится в соот-

ветствие его образ

$$\dot{v}_i = \varphi(v_i) \equiv (v_i^{(1)}, v_i^{(2)}, \dots, v_i^{(n)}) \quad (1)$$

Здесь $v_i^{(1)}, v_i^{(2)}, \dots, v_i^{(n)}$ — значения определяющих параметров объекта v_i , а $\varphi: U \rightarrow \Xi$ — отображение множества $U = A \cup \bar{A} \cup X$ всех рассматриваемых нами реальных объектов универсума U в n -мерное пространство определяющих параметров Ξ .

Тем самым для произвольного отображения φ соотношение (1) устанавливает эквивалентность следующих трех различных понятий: точки \dot{v}_i n -мерного пространства определяющих параметров Ξ , φ -образа $\varphi(v_i)$ отвечающего ей реального объекта v_i и описания $(v_i^{(1)}, v_i^{(2)}, \dots, v_i^{(n)})$ этого объекта в системе определяющих параметров $\{\xi^{(1)}, \xi^{(2)}, \dots, \xi^{(n)}\}$.

Систематическое использование этих обозначений и эквивалентностей позволяет свести очень широкий круг задач опознавания реальных объектов самой разнообразной природы к задачам опознавания образов чисто геометрическими методами [Хоменюк, 1974б].

3. Для каждой из обучающих совокупностей $\{a_i\}_{i=1}^{m(A)}$ и $\{\bar{a}_i\}_{i=1}^{m(\bar{A})}$ вычисляются отвечающая ей квазиковариационная матрица $Q(A) = \|q_{gh}(A)\|$ или $Q(\bar{A}) = \|q_{gh}(\bar{A})\|$ соответственно, где

$$q_{gh}(A) = \frac{n}{[m(A) - 1] m(A)} \sum_{i=1}^{m(A)} \sum_{j=1}^{m(A)} (a_i^{(g)} - a_j^{(g)}) (a_i^{(h)} - a_j^{(h)}) \quad (2)$$

и

$$q_{gh}(\bar{A}) = \frac{n}{[m(\bar{A}) - 1] m(\bar{A})} \sum_{i=1}^{m(\bar{A})} \sum_{j=1}^{m(\bar{A})} (\bar{a}_i^{(g)} - \bar{a}_j^{(g)}) (\bar{a}_i^{(h)} - \bar{a}_j^{(h)}) \quad (3)$$

Если определенные в п. 2 описания известных представителей из классов A и \bar{A} рассматривать как случайные n -мерные векторы, а совокупности $\{a_i\}_{i=1}^{m(A)}$ и $\{\bar{a}_i\}_{i=1}^{m(\bar{A})}$ — как случайные выборки из этих классов [Уилкс, 1967], то можно показать, что отвечающие им выборочные ковариационные матрицы будут точно в $2n$ раз меньше соответствующих квазиковариационных. Этим и объясняется их название.

4. Квазиковариационные матрицы $Q(A)$ и $Q(\bar{A})$ обращаются по методу квадратного корня, а полученные из них матрицы $Q^{-1}(A)$ и $Q^{-1}(\bar{A})$ используются в качестве матриц естественных метрических тензоров классов A и \bar{A} соответственно [Хоменюк, 1967].

Евклидовы расстояния, ассоциированные с этими тензорами, называются естественными. Для обучающей совокупности $(v_i)_{i=1}^{m(V)}$, где $V = A, \bar{A}$, естественное расстояние $\rho(\dot{v}_i, \dot{v}_j)$ между φ -образами $\dot{v}_i = \varphi(v_i)$ и $\dot{v}_j = \varphi(v_j)$ произвольных объектов v_i и v_j из класса V остается физически безразмерным. Среднеквадратичное значение этого расстояния меж-

ду φ -образами отдельных объектов из обучающей совокупности $\{v_i\}_{i=1}^{m(V)}$ этого класса — равным единице.

Иными словами, если координатное описание отрезка, который соединяет, например, точки \dot{v}_i и \dot{v}_j в пространстве определяющих параметров \bar{Z} , представить в виде $1 \times n$ матрицы-строки

$$(\dot{v}_i - \dot{v}_j) = \| v_i^{(1)} - v_j^{(1)}, v_i^{(2)} - v_j^{(2)}, \dots, v_i^{(n)} - v_j^{(n)} \|,$$

то естественное расстояние между ними, ассоциированное с тензором¹ $Q^{-1}(A)$, определяется соотношениями

$$\rho(\dot{v}_i, \dot{v}_j) = [(\dot{v}_i - \dot{v}_j) Q^{-1}(V) (\overline{\dot{v}_i - \dot{v}_j})]^{1/2}, \quad (4)$$

$$\rho(\dot{v}_i, \dot{v}_j)_{cp} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m(V)} \sum_{j=1}^{m(V)} (\dot{v}_i - \dot{v}_j) Q^{-1}(V) (\overline{\dot{v}_i - \dot{v}_j})}{m(V)[m(V) - 1]}}. \quad (5)$$

Здесь черта над матрицей есть символ перехода к сопряженной матрице.

Естественный характер метрики (4) определяется тем, что поскольку, согласно формуле (5), среднее расстояние между образами всех известных представителей класса V равно 1, то решение вопроса о том, является ли некоторый из опознаваемых объектов достаточно близким к ним или же нет, зависит от того, насколько большими или малыми по сравнению с единицей являются расстояния, которые отделяют его образ от образов известных представителей этого класса.

Большое достоинство этого критерия — помимо его наглядности и простоты — заключается также в том, что он инвариантен к числу определяющих параметров n . Поэтому он может применяться вне зависимости от используемого числа параметров n , в частности, в тех случаях, когда используемая система параметров не обеспечивает стабильного комплекса параметров для всей исследуемой территории.

5. Для каждого опознаваемого объекта x из класса X вычисляется расстояние

$$\rho(\dot{x}, \dot{a}_i) = \sqrt{(\dot{x} - \dot{a}_i) Q^{-1}(A) (\overline{\dot{x} - \dot{a}_i})}, \quad (6)$$

при $i = 1, 2, \dots, m(A)$ и расстояние

$$\rho(\dot{x}, \dot{\bar{a}}_i) = \sqrt{(\dot{x} - \dot{\bar{a}}_i) Q^{-1}(\bar{A}) (\overline{\dot{x} - \dot{\bar{a}}_i})}, \quad (7)$$

при $i = 1, 2, \dots, m(\bar{A})$.

6. Расстояния, определенные по п. 5, используются для определения близостей

$$\pi(x, a_i) = \exp[-\rho^2(\dot{x}, \dot{a}_i)] \quad (i = 1, \dots, m(A)) \quad (8)$$

и

$$\pi(x, \bar{a}_i) = \exp[-\rho^2(\dot{x}, \dot{\bar{a}}_i)] \quad (i = 1, \dots, m(\bar{A})) \quad (9)$$

опознаваемого объекта x к каждому из известных представителей классов A и \bar{A} соответственно. Эти близости рассматриваются как элементарные меры сходства объекта x с известными частями $\{a_i\}_{i=1}^{m(A)}$ и $\{\bar{a}_i\}_{i=1}^{m(\bar{A})}$ классов.

7. Полная мера сходства объекта x с известными представителями класса A — близость ко всем известным представителям класса A , вычисляется по формуле

$$\pi(x, A) = \left\{ \sum_{i=1}^{m(A)} [P(a_i) \pi(x, a_i)]^{K(A)} \right\}^{1/K(A)}, \quad (10)$$

где $P(a_i)$ — "вес" объекта a_i , $K(A)$ — коэффициент репрезентативности совокупности $\{a_i\}_{i=1}^{m(A)}$ известных представителей класса A . Аналогично, по формуле

$$\pi(x, \bar{A}) = \left\{ \sum_{i=1}^{m(\bar{A})} [P(\bar{a}_i) \pi(x, \bar{a}_i)]^{K(\bar{A})} \right\}^{1/K(\bar{A})} \quad (11)$$

вычисляется полная мера сходства объекта x с известными представителями класса \bar{A} .

В соответствии с теорией описываемого здесь подхода, близость произвольной точки к некоторому множеству других точек можно охарактеризовать с помощью любой неотрицательной функции, которая тем или иным невозрастающим образом зависит от ее элементарных расстояний до отдельных точек этого множества. Это позволяет пользоваться также и иными функциями для описания элементарной близости ($1/\rho^2$, $a^{-b\rho^2}$ и т.п.), или сначала через элементарные расстояния $\rho(\dot{x}, \dot{v}_i)$ определять некоторое среднее расстояние $R(\dot{x}, \dot{V})$, а затем уже через него — полную близость точки x к множеству \dot{V} как некоторую неотрицательную монотонно убывающую функцию этого расстояния. В качестве одной из возможных функций такого рода можно указать, например, на функцию $a - R^2(\dot{x}, \dot{V})$.

8. Относительная мера сходства опознаваемого объекта с известными представителями класса A называется адекватностью этого соответствия и вычисляется по формуле

$$Ad(x, A) = \frac{\pi(x, A)}{\pi(x, A) + \pi(x, \bar{A})}. \quad (12)$$

При большем числе классов для каждого из них $V, W = A, B, C, \dots$,

¹ Здесь и ниже тензор и отвечающая ему матрица обозначаются одним и тем же символом.

адекватность соответствия определяется по формуле

$$Ad(x, V) = \frac{\pi(x, V)}{\sum_W \pi(x, W)} \quad (13)$$

9. По значениям близости и адекватности могут быть получены чебышевские оценки относительной вероятности P принадлежности точек к тому или иному классу.

При уровне близости $\pi(x, A) \leq C$,

$$P_B \leq \min \left\{ 1, \frac{C}{\pi^*(A)} \right\} \quad (14)$$

Здесь $\pi^*(A)$ — средняя гармоническая близость опорных точек класса A к своему классу по результатам самоопознавания, которая вычисляется по формуле

$$\pi^*(A) = \frac{m(A)}{\sum_{i=1}^{m(A)} \frac{1}{\pi(a_i, A)}} \quad (15)$$

Аналогично вычисляются чебышевские оценки по значениям адекватности:

$$P_A \leq \min \left\{ 1, \frac{C}{Ad^*(A)} \right\}, \quad (17)$$

где

$$Ad^*(A) = \frac{m(A)}{\sum_{i=1}^{m(A)} \frac{1}{Ad(a_i, A)}} \quad (18)$$

3. Опознавание при неполном комплексе параметров

В основе описанного выше алгоритма опознавания образов лежит процедура сравнения между собой вектора-описания опознаваемого объекта и векторов-описаний каждого из эталонных объектов, которая начинается с операции вычисления вектора-разности между соответствующими векторами-описаниями. Эта операция выполняется по координатно и вполне определена лишь в том случае, когда у обоих сравниваемых векторов-описаний все их координаты являются вполне определенными. При использовании программ ПОИСК для составления прогнозных карт по какой-либо территории или площади реализации этого условия требует, чтобы вся эта территория (площадь) была покрыта тем или иным постоянным комплексом геолого-геофизических и иных съемок. К сожалению, это условие выполняется только в исключительных случаях и особенно трудно выполнимо при прогнозе сейсмичности на больших площадях. Чтобы обеспечить возможность использования программы ПОИСК и в таких условиях, в ней реализован описываемый ниже алгоритм опознавания образов при неполном комплексе параметров.

При отсутствии полного комплекса параметров некоторые координаты сравниваемых векторов-описаний могут оказаться неопределенными и, если они не определены хотя бы в одном из сравниваемых векторов-описаний, будут неопределенными также и в векторе-разности. В программе ПОИСК предусмотрено автоматическое исключение таких координат, что эквивалентно исключению соответствующих им параметров из комплекса. Однако это делается не для всего массива векторов-описаний, а только для данной конкретной пары сравниваемых между собой векторов.

При составлении массива описаний опознаваемых и эталонных объектов в виде таблиц отсутствующие значения соответствующих параметров отмечаются прочерком или иным условным знаком. При переводе массива описаний на перфокарты для параметров, значения которых неизвестны, на месте отсутствующего числа набивается тот или иной признак отсутствия данных. В дальнейшем в программе осуществляется проверка на наличие этого признака и, если он присутствует хотя бы в одном из сравниваемых между собой чисел, их разности приписывается значение 0. В результате образуются векторы-разности, у которых соответствующие координаты оказываются обнуленными. Кроме того, матрица метрического тензора Q^{-1} заменяется на матрицу

$$(Q^{-1})^* = \frac{n}{n^*} Q^{-1}, \quad (19)$$

где n — общее число параметров, а n^* — число тех из них, которые не имеют признака отсутствия данных в векторе-разности.

Расстояние $\rho^*(\dot{v}_i, \dot{v}_j)$ между неполностью определенными точками \dot{v}_i и \dot{v}_j в пространстве определяющих параметров Ξ вычисляется по формуле

$$\rho^*(\dot{v}_i, \dot{v}_j) = \sqrt{(\dot{v}_i - \dot{v}_j)^* (Q^{-1})^* (\dot{v}_i - \dot{v}_j)^*}, \quad (20)$$

где $(\dot{v}_i - \dot{v}_j)^*$ — "обнуленный" вектор-разность $(\dot{v}_i - \dot{v}_j)$, т.е. такой вектор, который получается из вектора $(\dot{v}_i - \dot{v}_j)$ путем замены нулями тех его компонентов, которые имеют признак отсутствия данных.

Легко видеть, что формула (20) является непосредственным обобщением формулы (4), в случае неполного комплекса определяющих параметров, и переходит в формулу (4), когда этот комплекс является полным.

Покажем для примера, как выполняются эти операции при сопоставлении двух неполностью определенных векторов-описаний, в которых признаком отсутствия данных является 0^* .

$\dot{a}_i = (2, 0^*, 3, 7, 0^*)$	вектор-описание эталона
—	класса A
$\dot{x}_i = (0^*, 4, 2, 5, 0^*)$	вектор-описание опознаваемого
	объекта
<hr/>	
$(\dot{a}_i - \dot{x}_i) = (2^*, -4^*, 1, 2, 0^*)$	вектор-разность

$$(\dot{a}_i - \dot{x}_i)^* = (0, 0, 1, 2, 0)$$

$$n = 5, \quad n^* = 5 - 3 = 2$$

$$(Q^{-1})^* = \frac{n}{n^*} Q^{-1} = \frac{5}{2} Q^{-1}.$$

Совокупность всех этих операций эквивалентна сравнению между собой произвольной пары векторов-описаний в таком n^* -мерном подпространстве n -мерного пространства определяющих параметров Ξ , в котором определены все их координаты и которое является максимальным из всех удовлетворяющих этому условию подпространств пространства Ξ . Переходы в такие подпространства осуществляются с помощью программы ПОИСК автоматически по мере надобности и не требуют от пользователя какого-либо контроля за их выполнением.

Глава III

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, ПОДГОТОВКА И АНАЛИЗ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

1. Выделение района исследований

Границы территории, в пределах которой целесообразно оценивать и прогнозировать сейсмическую опасность по описываемым здесь методикам, определяются, как правило, долговременными народнохозяйственными задачами по освоению этой территории, сложившимся географическим районированием и представлениями о геологическом и тектоническом строении.

Методики могут быть успешно использованы в сейсмоопасных регионах, районах, участках, а также в отдельных эпицентральных (очаговых) зонах и их окрестностях. При этом, чем детальнее должен быть требуемый прогноз, тем соответственно и более детальными должны быть исходные для него геолого-геофизические материалы, а также точности определения эпицентров и других характеристик ранее происходивших землетрясений.

2. Подготовка картографической основы

Картографическая основа для карт долговременного прогноза и оценки сейсмической опасности по комплексу геолого-геофизических и сейсмологических данных должна содержать общегеографическую картографическую сетку, а также основные топографические элементы будущей карты — крупные реки, горные хребты и главные населенные пункты. Кроме этого, на ту же основу наносят рабочую координатную сетку или ее узлы, в которых снимают данные с исходных геологических и геофизических карт и вычисляют различные локальные характеристики для вновь строящихся (прогнозных).

Координатами рабочей координатной сетки являются номера строк,

”обнуленный” вектор-разность

возрастающие сверху вниз и номера столбцов сетки, возрастающие слева направо. Такая условная система координат (строка—столбец) принята в программе ПОИСК и ее необходимо придерживаться при обработке исходных данных. При этом желательно также, чтобы шаг рабочей координатной сетки по строкам и столбцам был одинаковым, хотя и необязательно, чтобы эта сетка была квадратной. В ряде случаев более удобно использовать в качестве рабочей координатной сетки общегеографическую градусную сеть, в которой строки располагаются по ее параллелям, а столбцы — по меридианам. Масштаб картографической основы должен быть таким же, как и будущей прогнозной карты или более крупным.

На рис. 1 приведена рабочая основа в масштабе 1:2 500 000 для прогнозных карт сейсмической опасности Северного Тянь-Шаня, где узлами рабочей координатной сетки служили узлы обычной географической сетки с шагом 15' по широте и долготе.

В общем случае желательно, чтобы шаг рабочей координатной сетки был около 1 см или более, а масштаб результативных прогнозных карт в зависимости от их назначения составлял для карт сейсмоактивных регионов 1:2 500 000 или 1:1 000 000, для карт сейсмоактивных районов — 1:1 000 000 и для отдельных очаговых зон — 1:1 000 000 или 1:500 000.

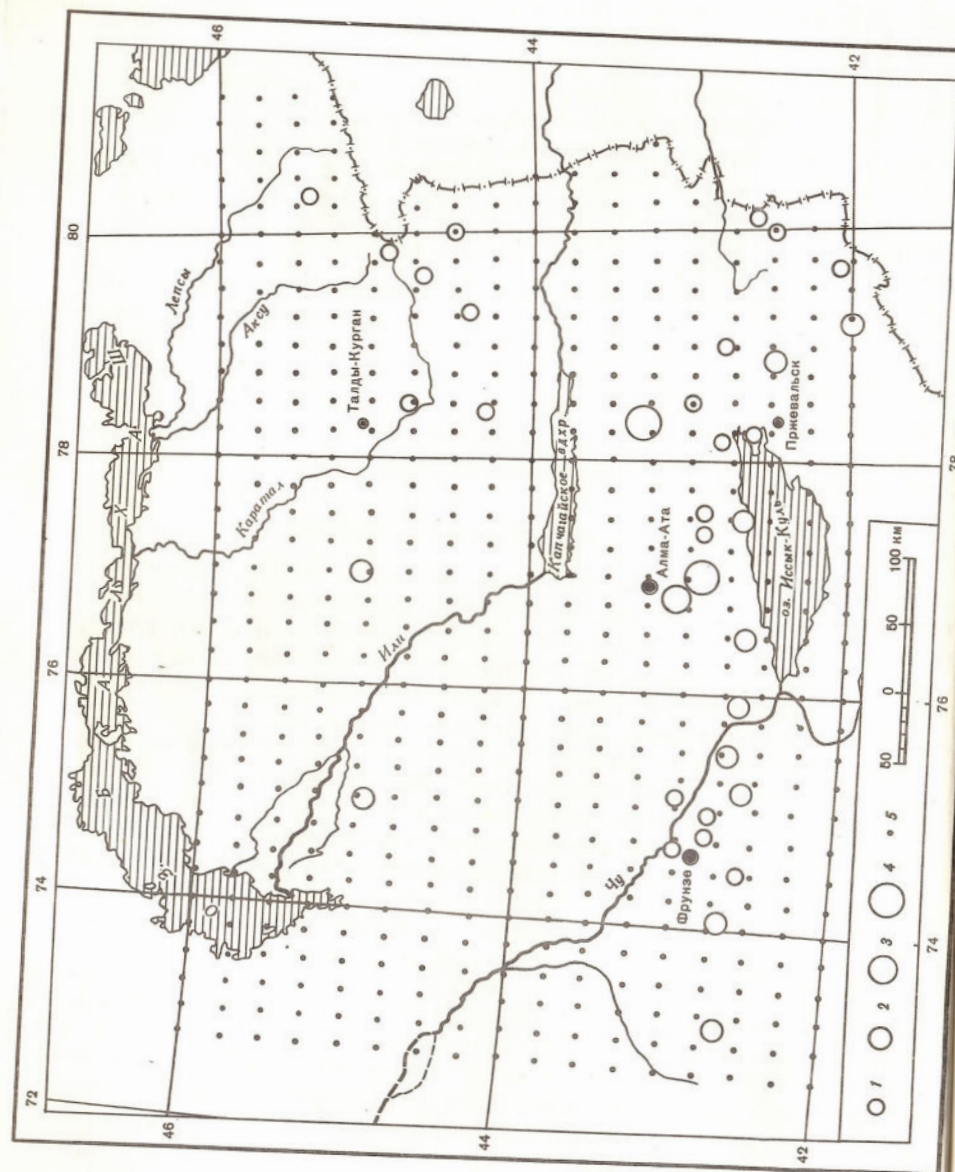
На рабочую картографическую основу наносятся эпицентры землетрясений выбранного интервала интенсивности, обычно с $M \geq 5,0$.

3. Выбор геолого-геофизических параметров

Программой ПОИСК допускается использование одновременно до 24 геолого-геофизических и сейсмологических параметров, которые могут быть как количественными, так и качественными. При этом тем признакам, которые являются лишь качественными, а ими чаще всего бывают признаки геологического характера, также приписываются соответствующие им числовые значения. Например: 0 если признак отсутствует, и 1 если он присутствует; или 0 — признак отсутствует, 1 — признак выражен слабо, 2 — признак выражен сильно и т.п. Такие признаки воспринимаются ЭВМ так же, как и количественные и используются в дальнейших расчетах с теми ”весами”, которые автоматически определяются для них по программе ПОИСК на основании анализа введенного в ЭВМ фактического материала.

Все эти данные как количественные, так и качественные в процессе их обработки по программе ПОИСК подвергаются дисперсионному, корреляционному и информационному анализу с выдачей соответствующих результатов на печать и автоматической оценкой их информационных весов, с которыми в дальнейшем они и используются в задачах прогноза.

Допускается использование и таких параметров, данные по которым есть не на всей площади. Однако комплекс параметров в опорных точках должен быть полным. Для выполнения этого условия необходимо либо исключить из числа опорных те точки, где нет полного комплекса параметров, либо исключить из общего комплекса соответствующие параметры так, чтобы набор параметров во всех опорных точках был одинаковым. Более подробно вопросы использования неполного комплекса параметров и работы с таким комплексом рассмотрены в разделе 2.



В целом в задачах долговременного прогноза сейсмичности следует использовать в первую очередь именно те параметры, которые характеризуют состояние и, в частности, расчлененность и изменчивость среды, заключающей в себе очаги землетрясений, а также различные процессы в земной коре и мантии, релевантные процессам землетрясений прогнозируемого типа.

При этом для создания карт регионального типа рекомендуется использовать следующий основной комплекс прогностических параметров:

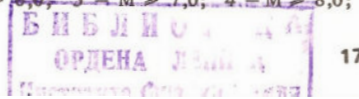
- 1) высоты рельефа дневной поверхности над уровнем моря, 2) аномалии силы тяжести в редукции Буге, 3) аномалии магнитного поля, 4) абсолютные отметки поверхности кристаллического фундамента (относительно уровня моря), 5) абсолютные отметки поверхности Мохоровичича (относительно уровня моря), 6) характеристики тектонической активности и разломной тектоники.

Кроме этого, при наличии кондиционных материалов по соответствующему региону могут быть использованы аномалии силы тяжести в изостатической редукции, глубинные аномалии силы тяжести, средние скорости сейсмических волн в земной коре, глубинные температуры и др. Следует использовать также градиенты перечисленных параметров и характеристики расчлененности рельефа дневной поверхности и других поверхностей раздела, которые могут быть вычислены с помощью входящего в систему программы ПОИСК комплекса программ МОНЖ [Хомеюнок и др., 1978]. Информативность каждого из этих параметров, а также информативности различных их комплексов вычисляются с помощью комплекса программ ПОИСК. Необходимо иметь в виду, что при комплексировании различных параметров их информативности не суммируются, так как всякий новый параметр, добавляемый к уже имеющемуся комплексу, обычно в той или иной степени повторяет информацию, которая в этом комплексе уже содержалась, и информативность любого параметра в комплексе оказывается ниже его собственной информативности.

Информационные характеристики различных параметров и их комплексов могут быть объективно оценены лишь на ограниченных эталонных участках исследуемых регионов и могут быть не вполне точными по отношению к тем участкам региона, для которых будут даваться прогнозы. Поэтому не следует расширять комплекс используемых прогностических параметров сверх необходимого минимума, контролируя этот комплекс, с одной стороны, формальными оценками его информативности по комплексу программ ПОИСК, а с другой — физическими и сейсмологическими соображениями об особенностях землетрясений в той или иной конкретной сейсмоактивной зоне.

При прогнозировании сейсмичности в очаговых зонах, где конкретные особенности очагов и сейсмологические характеристики самой зоны могут быть изучены более детально, следует использовать комплекс прогностических параметров более широкий, чем для региона в целом. В пределах

Рис. 1. Рабочая картографическая основа для Северо-Тяньшаньского региона
 Эпицентры землетрясений: 1 — $M > 5,0$; 2 — $M > 6,0$; 3 — $M > 7,0$; 4 — $M > 8,0$;
 5 — узлы картографической сетки



отдельной очаговой зоны обычно существуют и могут быть выявлены различные локальные связи и зависимости, которые для региона в целом уже не являются закономерными.

Исследователь должен постоянно иметь в виду, что реальная прогностическая ценность тех или иных параметров как самих по себе, так и при их работе в комплексе с другими параметрами, вообще говоря, может не совпадать с его представлениями, но всегда может быть определена с помощью комплекса программ ПОИСК в режиме самоопознавания эталонных (опорных) точек, как это описано ниже в разделах 3–6. При этом, поскольку точки класса X при самоопознавании не используются, значения параметров, которые исследователь собирается лишь опробовать, он может собирать и подготавливать не для всей интересующей его территории, а только для тех ее точек, которые он принимает за эталонные.

4. Выделение эталонных участков и опорных точек

При выборе эталонных участков следует отдавать предпочтение тем участкам, где наблюдались землетрясения с надежно определенной магнитудой (или энергетическим классом) и координатами.

К сожалению, в большинстве сейсмоактивных регионов (Туркмения, Средняя Азия, юг Сибири и др.) землетрясения, зарегистрированные в различные годы и различной по качеству аппаратурой, по точности их характеристик неравноценны и выбор эталонных сейсмоактивных участков может вызвать определенные трудности. Исключение составляют такие регионы, как Крым и Кавказ, где сейсмологические наблюдения ведутся давно и по хорошо организованной сети сеймостанций.

Поэтому в ряде случаев приходится использовать эталоны недостаточно надежные — чаще всего в отношении их местоположения — и уточнять их в процессе решения задачи.

При выборе опорных (эталонных) точек для обучения ЭВМ в каждом из классов A и \bar{A} должно быть выполнено условие $m > n$ (лучше $m \geq 1,5n$), где m — число точек в классе, а n — число используемых прогностических параметров. Поэтому, если в пределах исследуемого сейсмоактивного региона (зоны) число эпицентров невелико, то каждый из них приходится представлять несколькими опорными точками. Эти точки берутся непосредственно в эпицентрах соответствующих землетрясений и их ближайших окрестностях, и могут не совпадать с узлами координатной сетки. Такие точки задаются ЭВМ лишь своими координатами, в общем случае дробными, например: 25,75 — номер строки, 12,25 — номер столбца и т.п.

Значения прогностических параметров для точек с дробными координатами ЭВМ определяются автоматически интерполяцией между их значениями в ближайших узлах. Все опорные точки берутся в пределах максимальных изосейст, а в случае их отсутствия — в пределах эквивалентных им собственных областей эпицентров землетрясений.

Выделенным эталонным участкам даются порядковые номера — 1, 2, 3, ..., которые присваиваются также и входящим в них точкам, так что все точки, принадлежащие к одному и тому же участку, получают один и тот же групповой номер.

Опорные точки класса \bar{A} берутся на участках заведомо асейсмичных или на участках с фоновой для данного района сейсмичностью и, как правило, в узлах координатной сетки. Эталонным участкам класса \bar{A} также следует придавать порядковые номера, отличные от порядковых номеров эталонных участков класса A, или же общий для всех них порядковый номер 0 (ноль), при котором ЭВМ не будет различать между собой различные эталонные участки класса \bar{A} . Если в исследуемом регионе или районе выделить такие участки не удастся, то класс \bar{A} может отсутствовать. В этом случае для обработки геолого-геофизических материалов комплекс программ ПОИСК используется в режиме ПОИСК-МОНО.

Для всех отобранных описанным выше способом опорных точек проводится их "самоопознавание" (см. разд. 5), с помощью которого выявляются атипичные опорные точки.

Причины их атипичности анализируются, и точки, признанные непредставительными, исключаются из числа опорных. Оставшиеся после этого опорные точки составляют соответственно массивы "известных представителей класса A" и "известных представителей класса \bar{A} ".

5. Самоопознавание опорных (эталонных) точек

Самоопознавание опорных (эталонных) точек осуществляется для дополнительного контроля возможных ошибок в значениях исходных параметров этих точек, а также для объективного оценивания их типичности. Опорные точки, которые при отсутствии каких-либо ошибок в их исходных данных оказываются атипичными, прямо указывают на те или иные специфические особенности соответствующих им участков земной коры.

Для проведения самоопознавания опорных точек классов A и \bar{A} в ЭВМ достаточно ввести только массивы этих классов (без массива класса X). При этом в соответствии с алгоритмом программы ПОИСК в классах A и \bar{A} осуществляется сравнение каждой опорной точки поочередно со всеми остальными точками своего класса по всему комплексу работающих параметров. Результатом такого сравнения является величина, называемая атипичностью. При значениях атипичности ≥ 1 точка считается сомнительной, а при атипичности $\geq 1,5$ — заведомо атипичной. Для всех таких точек все значения их параметров должны быть тщательно проверены; если ошибка в этих значениях не обнаружено, что должен быть рассмотрен вопрос о возможности дальнейшего использования атипичных эталонов.

В зависимости от того, как исследователь понимает решаемую им задачу, нетипичные эталоны могут быть объяснены какими-либо особыми сейсмогеологическими условиями и сохранены в качестве эталонов или исключены вовсе, или же (в системе программ ПОИСК-3) перенесены в класс условных эталонов A*. Если после исключения нетипичных эталонов в классе окажется недостаточное количество опорных точек, могут быть автоматически получены искусственные опорные точки с дробными координатами и проинтерполированными значениями параметров.

Другой способ сохранить соотношение $m \geq 1,5n$ между числом опорных точек m и числом используемых параметров n состоит в исключении из используемого комплекса каких-либо параметров на основе их анализа.

6. Анализ комплекса используемых параметров

Оценки и анализ используемых параметров и их комплекса осуществляются с помощью выдаваемых на печать таблиц оценки параметров и оценки моделей, корреляционных матриц классов A и \bar{A} , а также сводной корреляционной матрицы (см. гл. IV).

Таблица 1 содержит следующие характеристики используемых параметров:

1. Порядковый номер параметра.
2. Номер параметра в исходном массиве.
3. Наименование и размерность параметра.
4. Дефект параметра.

Под дефектом параметра понимается отношение отсутствующих значений соответствующего параметра, которые характеризуются признаком отсутствия данных (обычно 999), к общему числу их значений, которое принимается равным сумме числа эталонов в классах A и \bar{A} . Например, если в обоих этих классах будет 40 эталонов и в двух из них не будет значений какого-либо параметра, то дефект этого параметра равен 0,05.

5. Информативность параметра (бит).
6. Среднее значение параметра в классе A .
7. Изменчивость параметра в классе A .
8. Среднее значение параметра в классе \bar{A} .
9. Изменчивость параметра в классе \bar{A} .
10. Корреляция с классифицирующим признаком.

Корреляция параметра с классифицирующим признаком определяется как коэффициент корреляции между его значениями в опорных точках классов A и \bar{A} и значениями в этих же точках классифицирующего признака, который принимает там значения 1 и 0 соответственно.

Корреляция с классифицирующим признаком является основным показателем индивидуальной информативности каждого параметра по отношению к признаку, по которому сформированы классы A и \bar{A} . При сейсмологических прогнозах такими признаками могут быть различные характеристики сейсмичности (в классе A — высокосейсмичные эталоны, в классе \bar{A} — асейсмичные; или в классе A — эталоны одного энергетического уровня, в классе \bar{A} — другого; или в классе A — эталоны землетрясений одного типа, в классе \bar{A} — другого типа и т.п.)¹.

11. Коэффициент детерминации.

Коэффициент детерминации параметра равен квадрату его коэффициента корреляции с классифицирующим признаком (см. п. 10).

12. Остаточная дисперсия.

Остаточная дисперсия параметра характеризует дисперсию относительной погрешности оптимального линейного прогнозирования значений классифицирующего признака только по значениям этого параметра и вычисляется как дополнение коэффициента детерминации до единицы (см. п. 11).

13. Индекс независимости.

Индекс независимости характеризует степень линейной независимости

¹ Большие коэффициенты корреляции во всех случаях указывают на большее различие сравниваемых областей по соответствующим параметрам.

инного параметра от всех остальных, которые входят в используемый комплекс, т.е. ту долю содержащейся в нем информации, которая не дублируется другими параметрами.

14. Информативность в комплексе.

Информативность параметра в комплексе вычисляется как произведение коэффициента детерминации параметра (см. п. 11) на индекс независимости (см. п. 13) и рассматривается как оценка его информативности в данном комплексе.

Наиболее полезными являются те параметры, которые имеют наиболее высокую информативность в комплексе. Однако эта характеристика зависит от самого комплекса и при изменении комплекса меняется. При включении в комплекс какого-либо нового параметра информативность параметров, бывших в этом комплексе с самого начала, не возрастает, а иногда снижается. При исключении из комплекса какого-либо параметра происходит обратный процесс. Функции этого параметра частично берут на себя оставшиеся параметры, и поэтому их информативность в комплексе уменьшается, а иногда увеличивается.

Зная эти общие связи между информативностью отдельных параметров самих по себе, их информативностью в комплексе, а также информативность комплекса в целом, которая монотонно растет по мере увеличения числа и информативности входящих в него параметров, исследователь должен оптимизировать, а фактически минимизировать используемый им комплекс путем исключения из числа возможных параметров в первую очередь тех, которые являются неполноценными или малоинформативными.

Весьма значительным недостатком параметров является отсутствие их значений на той или иной части исследуемой территории и особенно на участках, которые приняты за эталонные. Поэтому, если общее число имеющихся параметров или общее число имеющихся эталонных участков позволяет, следует воздерживаться от использования параметров, у которых отсутствуют значения на эталонных участках, а также выбирать на этих участках опорные (эталонные) точки таким образом, чтобы в них был возможно более полный и возможно более информативный комплекс параметров.

Количественными характеристиками, показывающими, в какой степени удалось выполнить эти требования в используемом комплексе, являются его коэффициент детерминации, а также значения дефектов входящих в него параметров, которые были указаны выше (см. п. 4).

Дополнительную информацию о качестве используемого комплекса параметров и выборе опорных точек может дать анализ корреляционных связей между используемыми параметрами, которые отражены в корреляционных матрицах класса A , класса \bar{A} и сводной корреляционной матрице.

Проведение описанного выше анализа с одновременной, основанной на этом анализе оптимизацией комплекса используемых параметров позволяет:

- существенно упростить используемый комплекс наблюдений, а также все работы, связанные с подготовкой исходных данных к их обработке на ЭВМ; такие оценки следует проводить на предварительном этапе в районе с хорошо изученными эталонными участками высокой сейсмичности и надежными асейсмичными;
- сократить время обработки исходных данных на ЭВМ и, если параметров

более 24 и все их использовать одновременно невозможно, освободить место для параметров, являющихся наиболее информативными; — выделить новые объекты иного типа, нежели те, которые используются для обучения ЭВМ.

Глава IV

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ В СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНАХ

1. Построение результативных карт и их интерпретация

Основным результатом опознавания произвольной точки из класса являются значения близостей этой точки к опорным точкам классов $\bar{A} - \pi(x, A)$ и $\pi(x, \bar{A})$ соответственно (см. гл. II, разд. 2). Через эти значения согласно формулам (12), (15) вычисляются значения адекватности и значения чебышевских оценок относительной вероятности.

Значения близости, адекватности и чебышевских оценок вероятности после необходимого округления, а также пересчета и исправления обнаруженных в них ошибок наносятся на соответствующую картографическую основу и соединяются изолиниями. Сечение изолиний выбирается по усмотрению интерпретатора, и для выделения локальных экстремумов им могут быть введены вспомогательные изолинии.

Наиболее высокие значения близости, вероятности и адекватности сосредоточены прежде всего в окрестностях опорных точек, где они уточняют границы уже известных очаговых зон. Удаленные от них области высоких значений этих величин характеризуют участки, где геолого-геофизические условия близки к условиям в эталонных объектах и где возникновение новых землетрясений того же типа наиболее вероятно. Однако поскольку значения близости и вероятности являются лишь относительными характеристиками сейсмичности, следует обращать внимание не только на их величину, но и на локальные максимумы, которые характеризуют участки со специфическим по отношению к окружающей их площади сочетанием значений параметров. Так, на приводимых ниже картах многие локальные максимумы отвечают очаговым зонам уже наблюдавшимся землетрясениям, которые по тем или иным причинам не участвовали в обучении. Поэтому любой локальный максимум близости, вероятности или адекватности следует рассматривать как указатель соответствующей ему потенциально очаговой зоны. Вопрос о геометрии таких зон, т.е. о более точном определении их конфигурации, а также об оценке интенсивности возможных в этих зонах землетрясений должен решаться на основе дополнительных исследований, включающих построение более детальных карт в соответствующем масштабе (1:1 000 000—1:500 000). В последующих разделах приводятся данные о совместной интерпретации различных результативных карт для оценки долговременной сейсмической опасности ряда сейсмоактивных регионов.

2. Балканский регион (в пределах территории Болгарии)

Ниже будут рассмотрены результаты использования этой методики для характеристики и картирования очагов сильнейших $M \geq 6,8$ землетрясений на территории Болгарии. Нам известны прогнозные оценки сейсмической опасности и соответствующие построения для этой территории [Grigorova, Glavtcheva, 1976; Karagjuleva, Grigorova, 1976]. Балканского региона в целом [Shebalin, 1976]. Предлагаемые нами построения в принципе отличаются от них как по методике, исходной информации, так и по характеру результативных материалов.

Характеристика исходной информации. Для оценки вероятности возникновения в исследуемом регионе новых землетрясений той же силы, что и ранее зарегистрированные, были использованы следующие параметры (табл. 1). Выбор их обусловлен, во-первых, кондиционностью геолого-геофизических и сейсмологических материалов, отвечающих по детальности и точности масштабам карт 1: 2 500 000—1: 1 000 000, рабочий масштаб карт 1: 1 500 000; во-вторых, необходимостью охарактеризовать структурные и динамические неоднородности всего разреза земной коры и верхов верхней мантии, где расположены очаги сильнейших землетрясений, и которые (хотя и в разной степени) влияют на энергетические спектры колебаний верхней части разреза земной коры и дневной поверхности.

Анализ геофизических данных, а также сейсмологических характеристик земной коры и верхней мантии, выполненный нами [Добрев, Щукин, 1967, 1974, 1978], свидетельствует об определенной обособленности тектонических элементов Карпато-Балканского региона не только по признакам мощности консолидированной части земной коры, соотношению мощностей глубинных слоев (осадочного, гранитного, базальтового), но и по диапазону изменения скорости и плотностной характеристик. Это указывает на различия петрографического состава пород земной коры и верхней мантии в пределах разнородных тектонических элементов, а в некоторых случаях (например, в очаговых зонах) также и на специфические условия напряженного состояния литосферы.

Несмотря на сходство структурных характеристик, разделение и типизация блоков возможна по физическим параметрам, и прежде всего, плотности, скорости прохождения упругих волн. Они являются носителями эволюционного признака — истории геологического развития, условий последовательного формирования и перерождения структур. Стало очевидным, что единые с тектонических позиций геоструктурные элементы региона (Карпаты, Балканиды, Родопский массив, Мизийская плита) не могут рассматриваться таковыми, т.е. единым целым, уже на сравнительно небольших глубинах, исчисляемых первыми десятками километров. В равной степени это относится и к глубинным разломам и линейкам, проявляющимся по-разному на разных глубинах. Этим объясняется тот факт, что часто наблюдаемые несоответствия пространственного положения очагов и их совокупностей относительно видимых на дневной поверхности геологических структур (Карпаты, Мизийская плита, Родопский массив) и разрывов есть явление, скорее, закономерное, нежели исключительное. Неучет этого важного обстоятельства приводит к ошибкам при оценке сейсмичес-

Таблица 1
Используемые геолого-геофизические данные

Параметр	Условные обозначения
Интенсивность региональной составляющей магнитного поля, гаммы	ΔZ_P
Глубина до поверхности Мохоровичича, км	H_M
Глубина до поверхности Конрада, км	H_K
Аномалии силы тяжести в редукции Буге, мГал	Δg_B
Глубина до поверхности свободной мантии, км	H_{CM}
Градиент рельефа поверхности свободной мантии	grad H_{CM}
Амплитуда новейших тектонических движений, км	N_a
Скорость современных вертикальных движений земной коры (осредненные значения), мм/год	V_{cd}
Плотность эпицентров землетрясений	$\sigma_{ЭП}$
Плотность потока сейсмической энергии, эрг/км ²	σ_E
Вертикальная расчлененность рельефа	h_B
Горизонтальная расчлененность рельефа	h_T
Плотность глубинных сейсмогенных дислокаций, л · км ⁻²	σ_d
Скорость современных вертикальных движений земной коры, мм/год	V_{cd}

кой опасности региона по геологическим или же сейсмологическим данным [Борисов, Рейснер, Шолпо, 1975; Shebalin et al., 1976], к неоправданному завышению или занижению значений M_{\max} в этом, либо другом сейсмоопасном регионе.

Для всех исследуемых нами сейсмоопасных районов Болгарии характерны: отчетливо выраженная автономность очаговых зон, принадлежащих конкретным, обособленным тектоническим единицам (блокам) со специфическими особенностями глубинного строения; дифференцированность очагов по глубине и принадлежность их к разным структурным срезам земной коры и верхней мантии, часто дискордантно расположенным по отношению друг к другу; динамические особенности и механизм очагов землетрясений подчиняются полю тектонических напряжений соответствующих им структурных срезов литосферы и изменяются в латеральном направлении и по глубине.

Есть все основания полагать, что неравномерное и специфическое распределение по глубине и по латерали структурных и динамических неоднородностей, а также потока сейсмической энергии указывает на различия физических свойств и состава горных пород как в обширной области подготовки очагов (сейсмогенной структуре), так и в пределах собственно очаговой зоны. И как следствие этого вывода возникает предположение о различиях тектодинамических условий и тектонофизической обстановки в очагах, принадлежащих блокам литосферы с разными геодинамическими режимами их развития.

Геофизическая характеристика очаговых зон и вероятность возникновения их на территории

Таблица 2
Параметры сильных землетрясений

Дата	Время	Координаты		Глубина очага, км	Магнитуда	Интенсивность, баллы
		φ	λ			
31. III. 1901	07.10.4	43,3	28,7	14 (9–20)	7,2	X
4. IV. 1904	10.02.34	41,78	22,98	15 (12–18)	7,1	IX–X
4. IV. 1904	10.25.55	41,80	23,10	18 (15–22)	7,8	X
14. VI. 1913	09.33.13	43,1	25,7	15 (12–18)	7,0	IX–X
14. IV. 1928	09.00.01	42,2	25,3	9 (7,5–11)	6,8	IX
18. IV. 1928	19.22.48	42,2	25,05	16 (13–19)	7,0	IX–X

Б о л г а р и и. И так, для обучения ЭВМ были использованы четыре эталонных объекта, отвечающих очагам сильнейших ($M \geq 6,8$) землетрясений XX в. на территории Болгарии: Струмского (Местенского), 1904, Пловдив-Мирпанского, 1928, Горна-Оряховского, 1913, Шабленского (Калиакренского), 1901 г. Параметры сейсмичности этих очагов указаны в табл. 2, по данным каталога землетрясений Балканского региона [Shebalin et al., 1974].

Результат первый. Для выяснения степени сходства выбранных для обучения ЭВМ очагов (рис. 2), в качестве эталонной области попеременно выбиралась одна из четырех очаговых зон землетрясений. При этом три остальных зоны входили в экспериментальный класс опознаваемых объектов.

В результате такого анализа выяснилось, что эталонные точки внутри каждой совокупности, т.е. очаговой зоны, принадлежат строго своей структурной области и не похожи ни на одну из других. Таким образом, по результатам самоопознавания сейсмоопасных объектов обнаружена отчетливая индивидуальность комплексной геолого-геофизической характеристики каждого из очагов, принадлежащих, вероятно, своим типам сейсмогенных сред. Иными словами, обнаружены внутренние различия совокупности очагов примерно одного энергетического уровня, обычно принимаемых в задачах картирования прогнозных зон M_{\max} как единый массив эталонных сейсмоопасных объектов. Этот результат позволяет надеяться на использование индивидуальных характеристик очаговых зон при дифференцированном подходе к прогнозированию сейсмической опасности.

Индивидуальные отличия и корреляция геолого-геофизических и сейсмологических параметров среды в очаговых зонах сильнейших землетрясений показаны в табл. 3–6.

Интересно было оценить не только отличия очагов друг от друга, но также и контрастность каждого из них с эталонным асейсмичным объектом (такая область выбрана в пределах Ломской впадины на северо-западе Болгарии). Степень различия сейсмичных и асейсмичных районов иллюстрируется табл. 7. Здесь наивысшие значения коэффициентов корреляции геолого-геофизических параметров с классифицирующим признаком означают наиболее контрастные отличия типов сейсмогенных сред от асейсмичных. Например, Струмская (Местенская) очаговая зона принци-

Таблица 3
 Результаты корреляционного анализа для очаговой зоны Струмского землетрясения

Параметр	ΔZ_H	ΔZ_P	H_M	H_K	Δg_B	H_{CM}	grad H_{CM}	N_a	\bar{V}_{CD}	$\sigma_{ЭП}$	σ_E	h_B	h_Γ	σ_D	V_{CD}
ΔZ_H	1,00														
ΔZ_P	0,26	1,00													
H_M	-0,01	-0,21	1,00												
H_K	0,00	-0,24	0,96	1,00											
Δg_B	-0,10	-0,21	-0,74	-0,72	1,00										
H_{CM}	0,23	0,05	0,75	0,70	-0,64	1,00									
grad H_{CM}	0,05	0,31	0,25	0,33	-0,51	0,22	1,00								
N_a	0,24	-0,24	0,44	0,38	-0,31	0,35	-0,10	1,00							
\bar{V}_{CD}	0,20	0,60	0,10	0,12	-0,43	0,40	0,25	-0,24	1,00						
$\sigma_{ЭП}$	-0,09	-0,21	0,40	0,48	-0,43	0,41	0,26	-0,02	0,43	1,00					
σ_E	-0,23	0,21	-0,32	-0,24	-0,02	-0,29	0,18	0,38	0,28	0,32	1,00				
h_B	0,21	-0,11	0,10	0,05	-0,20	0,03	0,06	0,54	-0,30	-0,30	-0,16	1,00			
h_Γ	-0,34	-0,33	0,01	0,01	0,30	-0,10	-0,10	0,43	-0,06	0,24	-0,10	-0,56	1,00		
σ_D	-0,16	-0,13	0,58	0,66	-0,61	0,44	-0,43	0,07	0,38	0,83	0,25	-0,23	0,04	1,00	
V_{CD}	0,29	0,14	0,37	0,26	-0,22	0,58	-0,12	0,29	0,21	-0,03	-0,28	0,04	-0,06	-0,05	1,00

Таблица 4
 Результаты корреляционного анализа для очаговой зоны Пловдив-Чирпанского землетрясения

Параметр	ΔZ_H	ΔZ_P	H_M	H_K	Δg_B	H_{CM}	grad H_{CM}	N_a	\bar{V}_{CD}	$\sigma_{ЭП}$	σ_E	h_B	h_Γ	σ_D	V_{CD}
ΔZ_H	1,00														
ΔZ_P	0,22	1,00													
H_M	0,03	0,09	1,00												
H_K	0,08	0,08	0,61	1,00											
Δg_B	-0,11	-0,50	-0,28	-0,29	1,00										
H_{CM}	0,09	0,15	0,59	0,67	-0,17	1,00									
grad H_{CM}	0,01	0,04	-0,14	-0,03	-0,35	-0,28	1,00								
N_a	-0,12	0,04	-0,16	-0,01	-0,48	-0,23	0,43	1,00							
\bar{V}_{CD}	-0,06	-0,06	0,36	0,75	-0,04	0,61	-0,35	-0,07	1,00						
$\sigma_{ЭП}$	0,04	-0,25	-0,05	-0,40	-0,40	-0,06	-0,32	-0,25	-0,21	1,00					
σ_E	-0,05	-0,24	0,23	0,22	0,15	0,27	-0,23	-0,17	0,34	0,42	1,00				
h_B	-0,13	0,02	-0,03	-0,13	-0,49	-0,25	0,55	0,65	-0,37	-0,24	-0,25	1,00			
h_Γ	-0,35	-0,07	-0,32	-0,24	-0,36	-0,33	0,43	0,56	-0,11	-0,29	-0,33	0,60	1,00		
σ_D	0,06	-0,21	0,34	-0,03	0,10	0,22	-0,23	-0,15	-0,06	0,76	0,37	-0,05	-0,29	1,00	
V_{CD}	0,17	0,16	0,01	0,01	-0,02	-0,01	-0,07	0,07	0,14	0,50	0,05	-0,08	0,03	0,49	1,00

Таблица 5
 Результаты корреляционного анализа для очаговой зоны Горна-Оряховского землетрясения

Параметр	ΔZ_H	ΔZ_P	H_M	H_K	Δg_B	H_{CM}	grad H_{CM}	N_a	\bar{V}_{CD}	$\sigma_{ЭП}$	σ_E	h_B	h_Γ	σ_D	V_{CD}
ΔZ_H	1,00														
ΔZ_P	0,98	1,00													
H_M	-0,91	-0,94	1,00												
H_K	-0,96	-0,96	0,88	1,00											
Δg_B	0,95	0,95	-0,89	-0,93	1,00										
H_{CM}	-0,87	-0,87	0,88	0,74	-0,79	1,00									
grad H_{CM}	0,81	0,80	-0,80	-0,73	0,75	-0,81	1,00								
N_a	-0,86	-0,90	0,84	0,89	-0,91	0,67	-0,61	1,00							
\bar{V}_{CD}	0,85	0,82	-0,81	-0,84	0,81	-0,67	0,59	-0,79	1,00						
$\sigma_{ЭП}$	0,07	0,02	0,11	-0,17	0,08	0,35	-0,17	-0,20	0,24	1,00					
σ_E	0,12	0,07	-0,02	-0,21	0,07	0,14	-0,11	-0,15	0,15	0,49	1,00				
h_B	-0,59	-0,58	0,57	0,66	-0,63	0,29	-0,31	0,73	-0,65	-0,54	-0,38	1,00			
h_Γ	-0,26	-0,32	0,36	0,41	-0,32	-0,03	-0,01	0,55	-0,53	-0,52	-0,22	0,77	1,00		
σ_D	0,61	0,53	-0,38	-0,58	0,56	-0,34	0,47	-0,51	0,46	0,55	0,33	-0,42	-0,07	1,00	
V_{CD}	-0,51	-0,57	0,52	0,58	-0,63	0,37	-0,37	0,65	-0,31	0,08	-0,10	0,30	0,26	-0,21	1,00

Таблица 6
 Результаты корреляционного анализа для очаговой зоны Шабленского землетрясения

Параметр	ΔZ_H	ΔZ_P	H_M	H_K	Δg_B	H_{CM}	grad H_{CM}	N_a	\bar{V}_{CD}	$\sigma_{ЭП}$	σ_E	h_B	h_Γ	σ_D	V_{CD}
ΔZ_H	1,00														
ΔZ_P	0,22	1,00													
H_M	0,22	0,21	1,00												
H_K	0	0	0	1,00											
Δg_B	0,47	0,23	0,30	0	1,00										
H_{CM}	0,00	0	0	0	0	1,00									
grad H_{CM}	-0,32	-0,06	0,08	0	-0,43	0	1,00								
N_a	-0,80	-0,50	-0,32	0	-0,45	0	0,27	1,00							
\bar{V}_{CD}	0,06	0,24	0,10	0	-0,54	0	0,44	-0,29	1,00						
$\sigma_{ЭП}$	0,34	0,27	-0,01	0	-0,44	0	0,27	-0,48	0,71	1,00					
σ_E	0,58	0,28	0,18	0	-0,06	0	-0,19	-0,74	0,53	0,68	1,00				
h_B	-0,35	-0,24	-0,25	0	-0,38	0	0,60	0,46	0,02	0,01	-0,24	1,00			
h_Γ	0,22	0,21	-0,05	0	0,03	0	0,08	-0,32	0,18	0,35	0,18	-0,25	1,00		
σ_D	0,02	-0,48	-0,05	0	0,57	0	-0,53	0,24	-0,81	-0,73	-0,44	-0,18	-0,22	1,00	
V_{CD}	0,30	0,61	0,09	0	-0,02	0	0,24	-0,51	0,48	0,72	0,41	0,02	0,34	-0,67	1,00

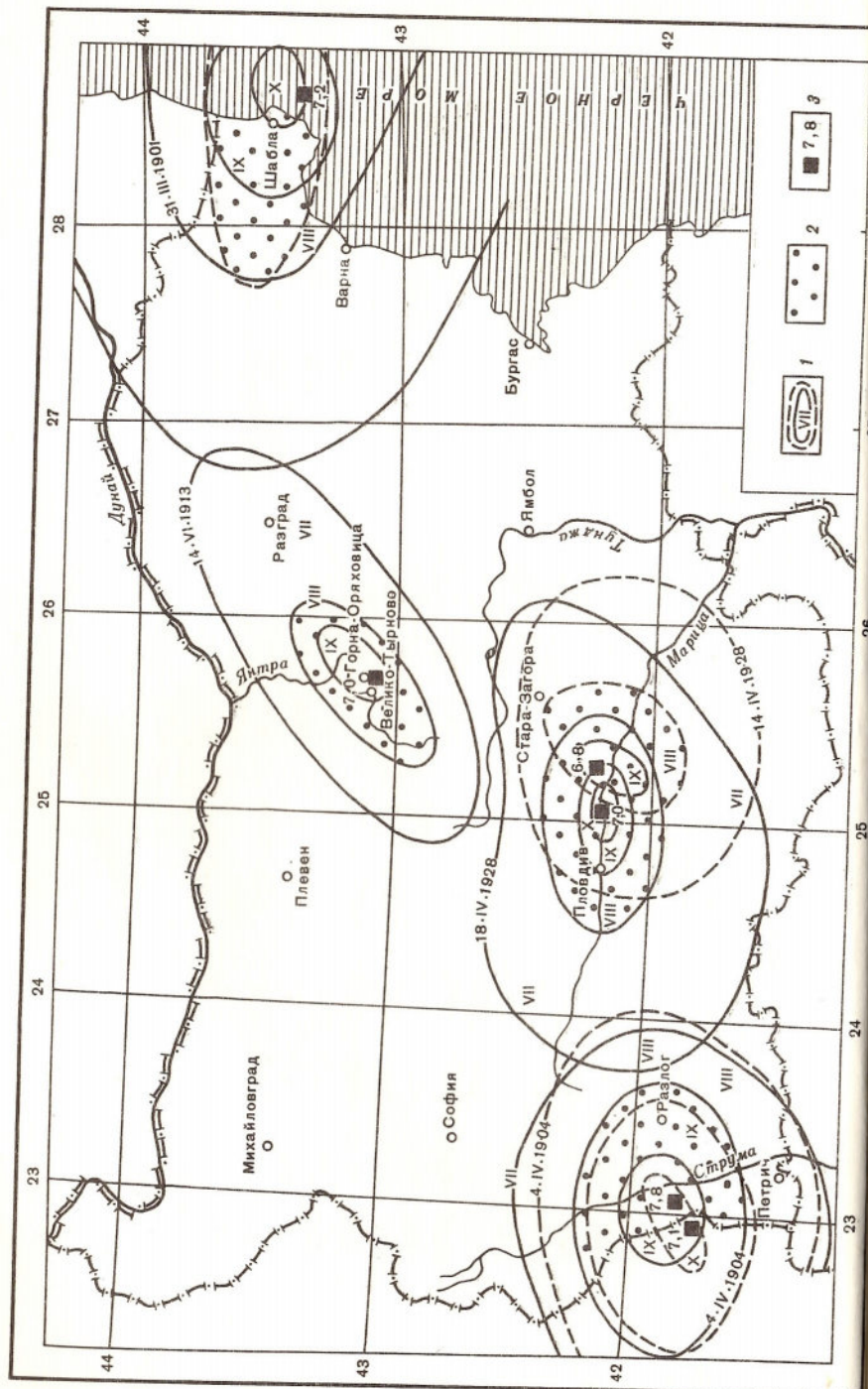


Таблица 7

Коэффициенты корреляции с классифицирующим признаком

Параметр	Струмская зона	Пловдив-Чирпанская зона	Горна-Оряховская зона	Шабленская зона
ΔZ_H	-0,43	-0,01	0,34	0,03
ΔZ_P	-0,57	-0,19	0,39	-0,02
H_M	0,77	0,56	-0,36	-0,80
H_K	0,71	0,22	-0,37	-0,75
Δg_B	-0,90	-0,17	0,49	0,86
H_{CM}	0,66	0,61	0,07	-0,89
grad H_{CM}	0,70	0,27	0,56	0,08
N_a	0,69	0,06	0,60	0,22
\bar{V}_{CD}	0,89	0,51	0,66	-0,81
$\sigma_{ЭП}$	0,87	0,84	0,84	0,79
σ_E	0,41	0,38	0,39	0,57
h_B	0,75	-0,18	0,21	-0,38
h_T	0,79	0,16	0,26	-0,41
σ_D	0,90	0,87	0,97	0,94
V_{CD}	0,33	-0,26	-0,39	-0,19

иально отличается от эталонной асейсмичной области. Ближе к последней по соотношению параметров Пловдив-Чирпанская и Горна-Оряховская очаговая зоны, а Шабленская зона занимает промежуточное положение.

Результат второй. Следующим этапом решения задачи предусматривается оценка распределения вероятностей возникновения очагов сильных ($M \geq 6,8$) землетрясений, используя вывод о значимых различиях между ними.

Карты относительной вероятности (методика их построения изложена в цитированных выше работах) первоначально были построены для каждого из типов очаговых зон — Местенского, Пловдив-Чирпанского, Горна-Оряховского, Шабленского — в двух вариантах. Первый вариант был построен с использованием всех геолого-геофизических и сейсмологических параметров (см. табл. 1), а второй — с использованием только геолого-геофизической информации (рис. 3-4).

Рис. 2. Карта исходного сейсмического материала (по данным атласа изосейст и каталога землетрясений работ Балканского сейсмологического проекта ЮНЕСКО)

1 — изосейсты землетрясений IX-X баллов на территории Болгарии с $M \geq 6,8$, 2 — очаговая зона землетрясений и эталонные точки внутри нее, 3 — эпицентры и магнитуда землетрясений

Рис. 3. Карта чебышевских оценок относительной вероятности землетрясений с $M \geq 6,8$ Струмского типа по геолого-геофизическим данным

Рис. 4. Карта чебышевских оценок относительной вероятности землетрясений с $M \geq 6,8$ Пловдив-Чирпанского типа по геолого-геофизическим данным

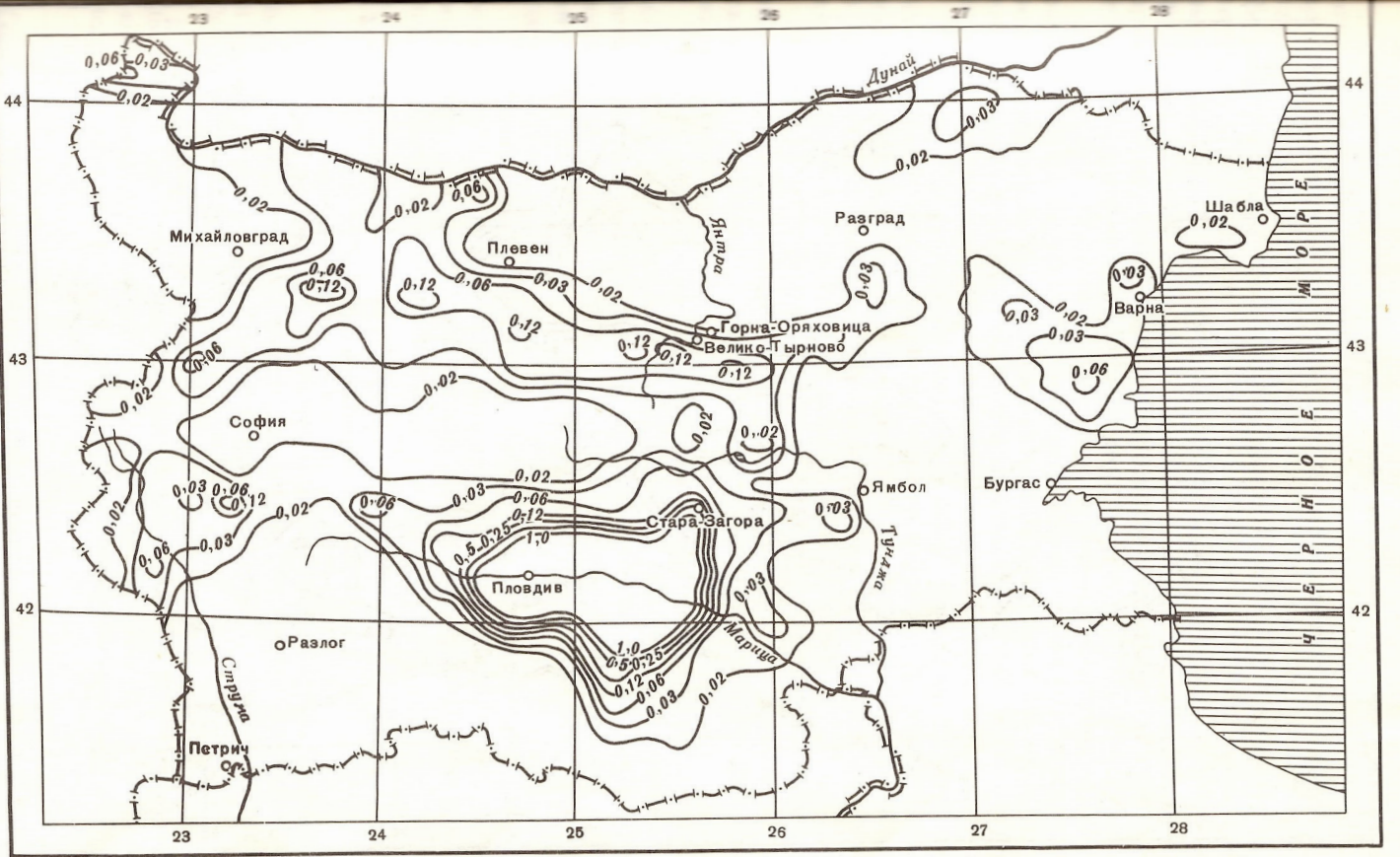
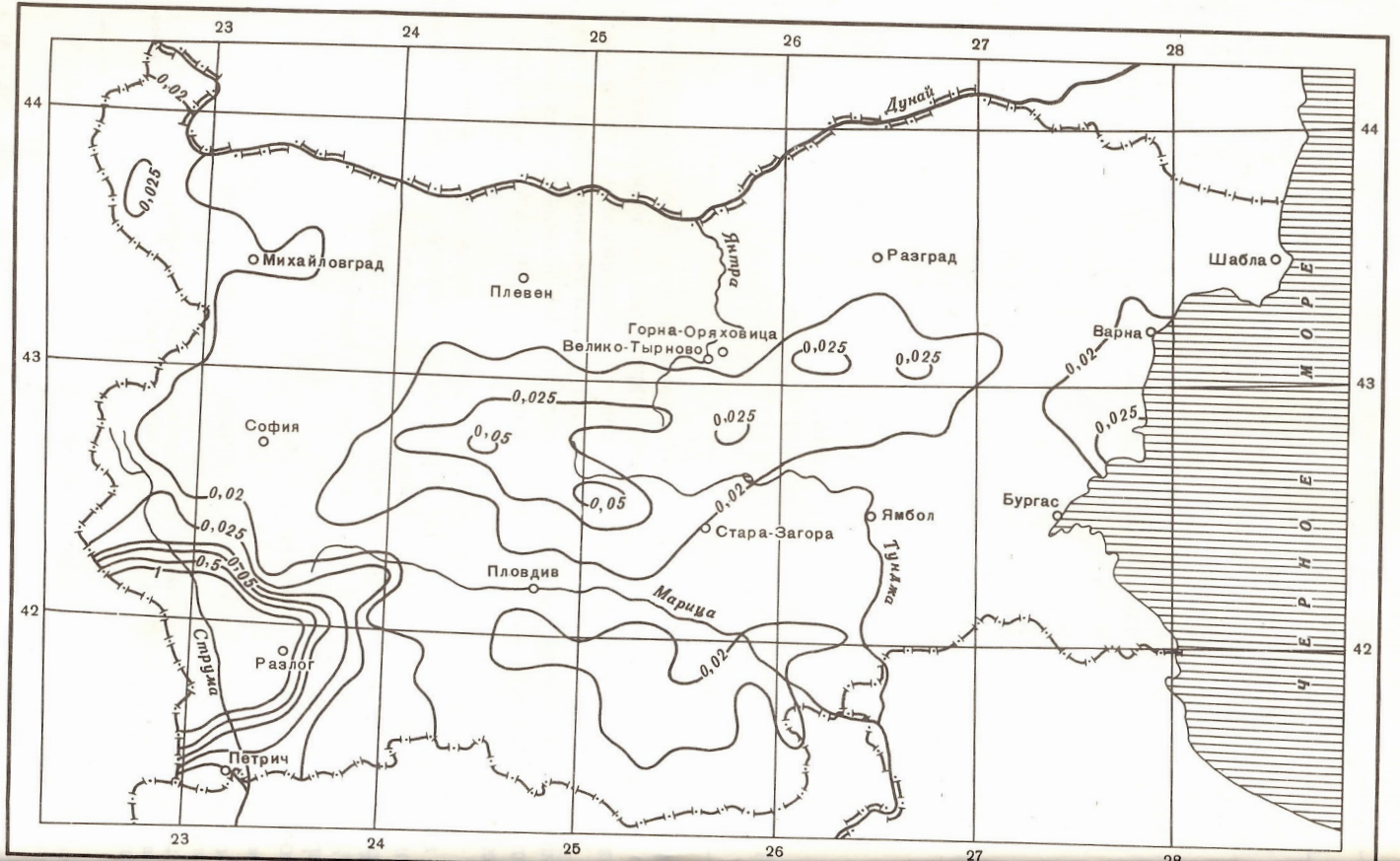
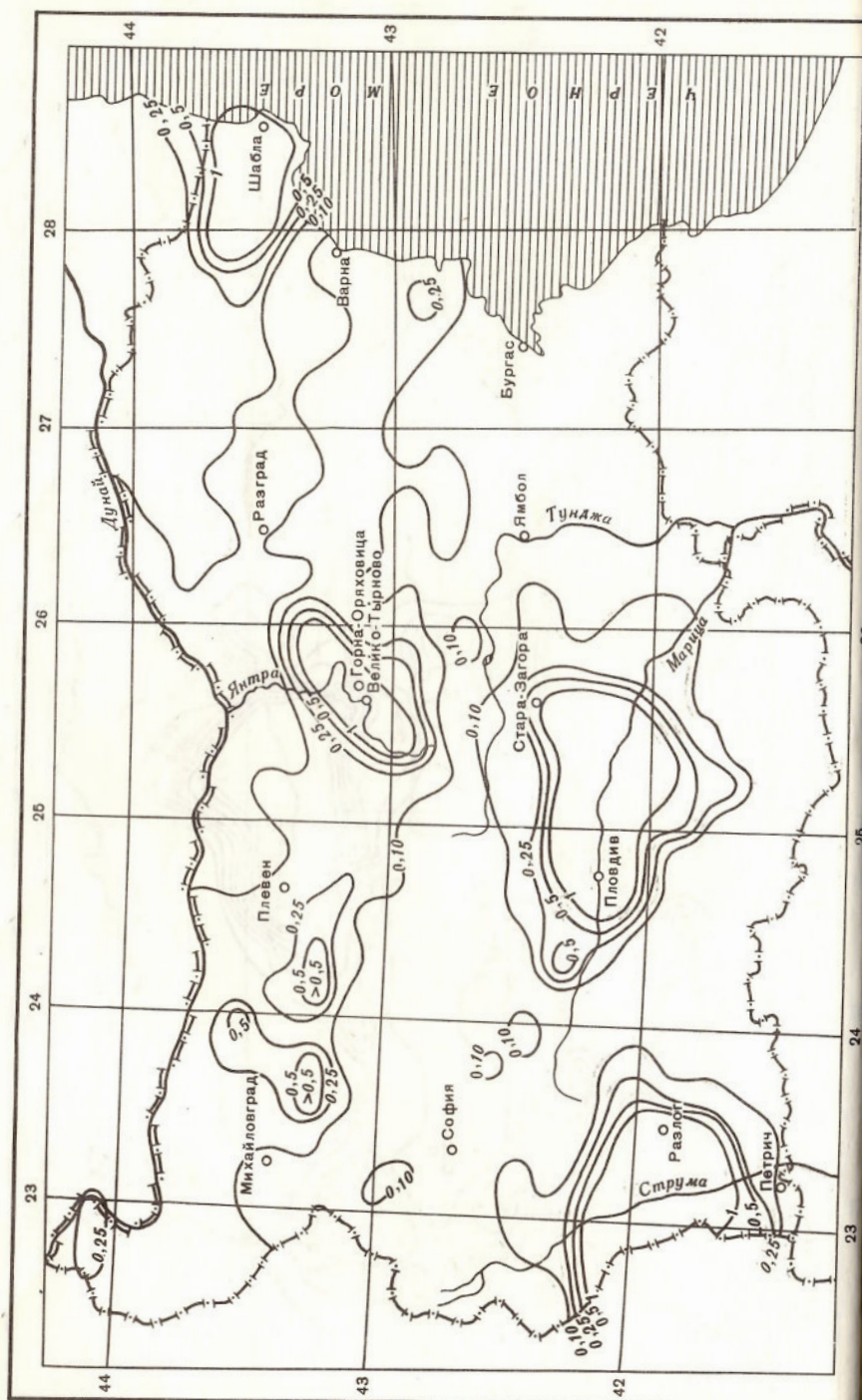


Рис. 4



Легко видеть, что при наличии достоверных сведений о повторяемости сильных землетрясений можно оценить в пределах полученных контуров прогнозных значений относительной вероятности возможность возникновения во времени землетрясений картируемого типа (Струмского, Пловдив-Ирпанского, Горна-Оряховского, Шабленского). Можно полагать, что вероятность возобновления сейсмических событий в разных сейсмогенных средах может быть существенно различной. Исследуя полученные карты относительной вероятности возникновения очагов разных типов, приходим к ряду интересных соображений прогнозного характера и геологического содержания [Ивановская и др., 1983].

Результат третий является окончательным в данном исследовании. Он иллюстрируется суммарной картой относительных вероятностей землетрясений с $M \geq 6,8$ всех типов очагов. На этой карте эталонные очаговые зоны несколько расширили свои границы, хотя по-прежнему сохранили отчетливую структурную обособленность (рис. 5).

Прогнозной на карте оказалась зона (с возможными очагами Пловдив-Ирпанского типа) на северо-западе Болгарии, на границе Мизийской плиты и Предбалкана. Естественно, что возможность возникновения более слабых землетрясений на территории Болгарии не обсуждается, поскольку наше внимание было сосредоточено на экстремальных событиях.

Выводы. 1. Расчеты, выполненные с целью опознавания и картирования сейсмогенных объектов с $M_{\text{макс}}$, подтвердили качественные представления о специфике очаговых зон на территории Болгарии, принадлежащих своим типам сред.

2. Оценка вероятностей возникновения очагов индивидуальных типов и их совокупностей, на наш взгляд, является наиболее оправданной при долговременном прогнозировании сейсмической опасности. Такой путь дифференцированного подхода к анализу сейсмичности позволяет избежать формальных решений и расширить наши представления в области сейсмогенезиса.

3. Выявление и картирование типов глубинных сейсмогенных сред, характеризующихся высокой степенью дробления и проницаемости для газов, флюидов, позволяет использовать полученные результаты для решения других геологических задач.

3. Крымско-Таманский регион

Крымско-Таманский регион включает в себя Южный Крым, Прикубанскую часть Кавказа и прилегающую к ним часть акватории Черного моря. В регионе известно более 30 землетрясений с $M \geq 4,5$, в том числе около 20 с $M \geq 5,1$.

Ранее [Глубинное строение..., 1987] для этого региона решались следующие задачи: уточнение существующих представлений о степени сейсмичности различных участков региона; выяснение степени геолого-геофизической, а также связанной с нею генетической однородности очаговых зон;

Рис. 5. Суммарная карта чебышевских оценок относительной вероятности всех типов землетрясений с $M \geq 6,8$ на территории Болгарии



Рис. 6. Карта в изолиниях близости к разным типам землетрясений Крымского региона. Изолинии близости к землетрясениям: Ялтинского типа (тонкие линии), Анапского типа (пунктир), Севастопольского типа (пунктир с точкой). Заштрихованы области максимальных значений близости

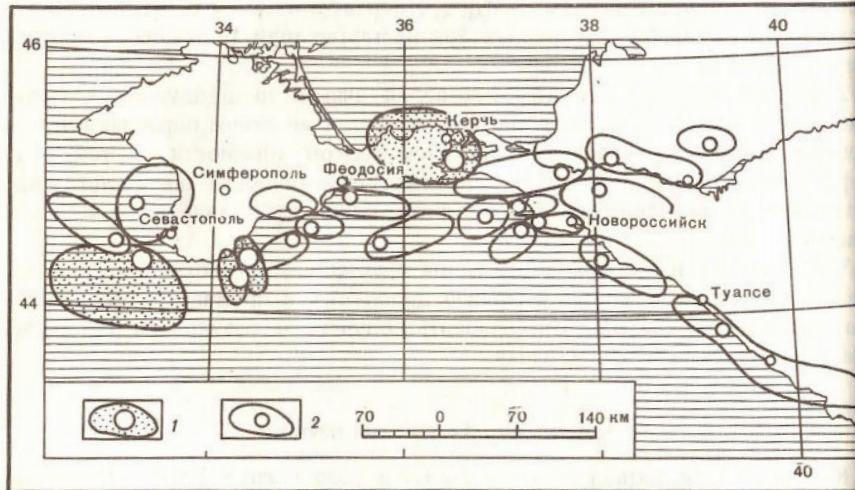


Рис. 7. Схема собственных областей землетрясений с $M \geq 5,0$ Крымского региона
1 – области землетрясений с $M \geq 6,0$; 2 – области землетрясений с $M \geq 5,0$

определение наиболее информативных на сейсмичность параметров. Опыт этого этапа исследований позволил наметить некоторые важные выводы об особенностях геофизических условий в очаговых зонах землетрясений региона.

Результаты самоопознавания эталонных землетрясений позволили в наибольшем сходстве между их опорными точками подразделить эти землетрясения на три группы (рис. 6), которые оказались соответствующим

Таблица 8
Исходные геолого-геофизические данные

Параметр	Условные обозначения
Аномалии силы тяжести в редукции Буге	Δg_B
Изоэстатические аномалии силы тяжести	$\Delta g_{из}$
Градиент изостатических аномалий силы тяжести	$grad \Delta g_{из}$
Глубинные аномалии силы тяжести	$\Delta g_{гд}$
Градиент глубины до поверхности фундамента	$grad H_{ф}$
Градиент высот дневного рельефа	$grad h_p$
Региональная составляющая аномального магнитного поля	ΔT_a
Тепловой поток	Q
Отклонения времен пробега "коровых" сейсмических волн	Δt
Суммарная плотность разновозрастных разломов	$\Sigma \sigma_p$
Сейсмическая активность	$A_{1,0}$
Граничная скорость распространения сейсмических волн по поверхности мантии	$V_{г}^M$
Условный признак присутствия в коре "волновода", слоя с относительным понижением скорости продольных сейсмических волн	"Волн"

Таблица 9
Коэффициенты корреляции параметров с классифицирующим признаком (эталонные зоны)

Признаки	Севастопольская	Ялтинская	Анапская вся	Анапская морская	Анапская прибрежная	Эпицентры, $M \geq 5,1$	Собственные зоны, $M \geq 5,1$	Зоны ответственности, $M \geq 6,0$
Δg_B	0,79	0,66	0,02	0,32	0,33	0,29	0,09	0,14
$\Delta g_{из}$	-0,07	-0,29	-0,28	0,15	0,49	-0,23	-0,23	-0,45
$grad \Delta g_{из}$	0,50	0,64	0,56	0,24	0,28	0,57	0,40	0,65
$\Delta g_{гд}$	-0,33	0,47	0,69	0,15	0,74	0,42	0,17	0,23
$grad H_{ф}$	0,74	0,81	0,87	0,68	0,81	0,77	0,56	0,84
$grad h_p$	0,57	0,72	0,44	0,37	0,10	0,62	0,40	0,62
ΔT_a	-0,32	-0,33	-0,43	0,15	0,07	-0,31	-0,48	-0,31
Q	-0,72	0,56	-0,45	0,54	0,00	0,04	-0,09	0,08
Δt	0,94	0,93	0,97	0,92	0,90	0,97	0,24	0,96
$\Sigma \sigma_p$	0,42	0,11	0,06	0,03	0,00	0,38	0,07	0,23
$A_{1,0}$	0,44	0,47	0,56	0,39	0,25	0,57	0,29	0,47
$V_{г}^M$	-0,15	-0,10	-0,94	0,79	0,90	-0,39	-0,21	-0,31
"Волн"	-0,57	-0,23	0,22	0,09	0,00	-0,24	-0,03	0,19

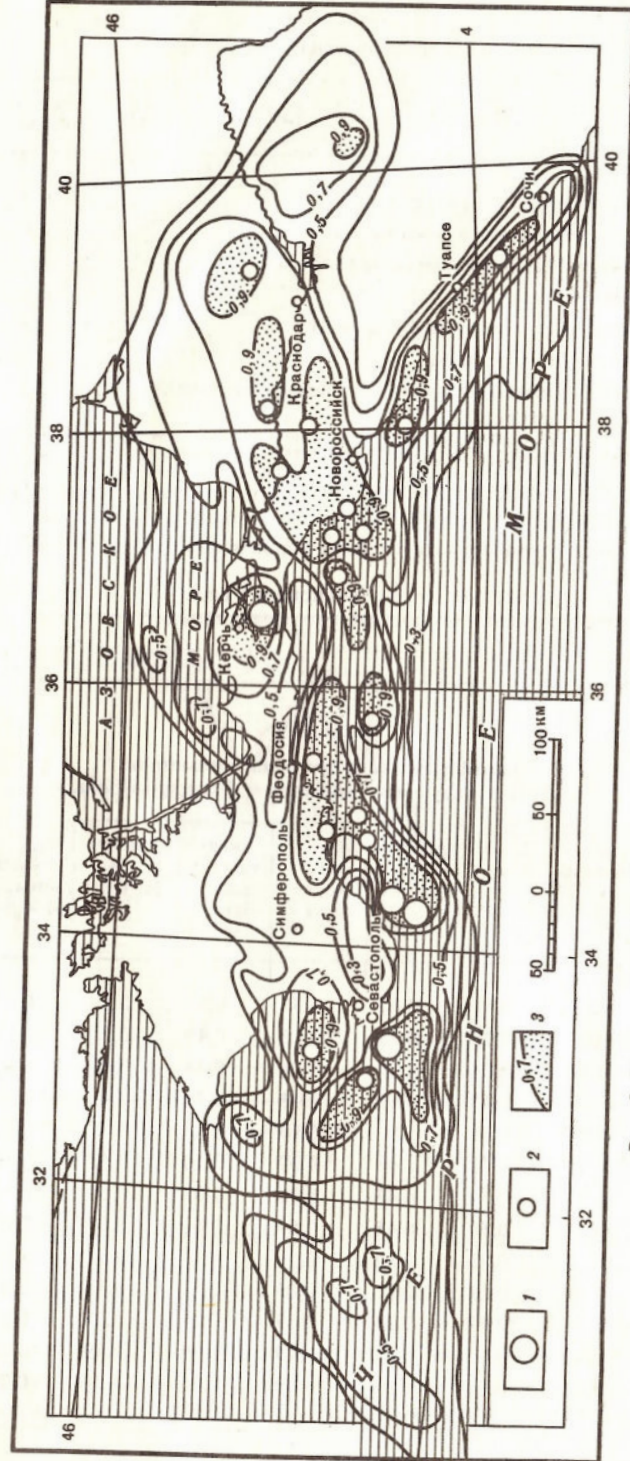


Рис. 8. Карта в изолиниях близости к землетрясениям с $M > 5,0$ Крымского региона
 Эпицентры землетрясений: 1 — $M \geq 6,0$; 2 — $M \geq 5,0$; 3 — изолинии близости

севастопольской, Ялтинской и Анапской. В свою очередь, опорные точки Ялтинской группы разделились на две подгруппы: собственно Ялтинскую, соответствующую землетрясению 1927 г., $M = 6,8$ и Алуштинско-Феодосийскую, а опорные точки землетрясений Анапской группы разделились на две подгруппы — прибрежную и морскую.

По опорным точкам каждой из указанных выше трех основных групп всего региона построены 3 карты в изолиниях близости (см. сводную карту на рис. 6). На этой карте четко видна обособленность Севастопольской, Ялтинской и Анапской групп друг от друга, что указывает на относительную независимость и, возможно, различную природу сейсмичности в этих зонах. Общие черты намечаются лишь между Ялтинской зоной и северным землетрясением Севастопольской зоны; восточнее его эпицентра находится локальный максимум близости $\pi = 0,7$. Имеются также локальные максимумы $\pi = 0,5$ к югу от Ялтинской зоны и к востоку от Анапской.

Подтверждением выделенных генетических типов сейсмогенных сред могут служить значения коэффициентов корреляции, полученные в результате сравнения каждой сейсмической группы с набором точек, находящихся в асейсмичной зоне. Анализируя табл. 9, можно заметить, что каждая группа характеризуется своим набором информативных признаков, но общими для всех вариантов являются: $grad H_{\phi}$ и Δt . Кроме того, одной из задач математической обработки комплекса признаков является выяснение характера связей между геологическими, геофизическими и сейсмологическими параметрами, выраженной в коэффициенте парной корреляции (табл. 10—12). Анализ значений коэффициентов корреляции показывает, что признаки связаны между собой сложными зависимостями, характер которых обусловлен строением очаговых зон землетрясений выделенных групп.

Новая версия использованной нами программы позволила выделить в пределах изучаемого региона собственные области опорных (эталонных) точек для каждого землетрясения с $M \geq 5,1$, полученные с помощью кластерного анализа (рис. 7). Эти области выражены по площади и ориентированы главным образом субширотно. Ряд из них совпадает с простиранием известных тектонических структур, разломов, некоторые, например Ялтинских землетрясений, расположены вкрест простирания структур Корниоугольного Крыма.

Следующим этапом исследования было построение карты в изолиниях близости к землетрясениям Крымско-Таманского региона с $M \geq 5,0$ (рис. 8). На карте отчетливо выражена автономность очаговых зон каждой из выделенных нами групп землетрясений, принадлежащих к конкретным, обособленным тектоническим блокам со специфическим строением земной коры: I — Севастопольская, II — Ялтинско-Феодосийская, III — Анапская, IV — Кубанская, V — Прибрежно-Черноморская. Заслуживают внимания прогнозные области высоких значений близости в центре Крымского полуострова, юго-западнее Крымского полуострова в Черном море, а также в районе г. Майкопа.

Две аномальные области в изолиниях близости ориентированы: одна — вдоль Крымского побережья и далее протягивается на Таманский полуостров, другая — вдоль Черноморского побережья Кавказа. Обе области пересекаются в районе очагов Анапских землетрясений. Результаты корреляции

Таблица 10
 Результаты корреляционного анализа для очаговой зоны Ялтинских землетрясений

Параметр	Δg_B	$\Delta g_{из}$	grad $\Delta g_{из}$	$\Delta g_{гЛ}$	grad H_{Φ}	grad h_p	ΔT_a	Q	Δt	$\Sigma \sigma_p$	A_{10}	V_{Γ}^M	"Волн"
Δg_B	1,00												
$\Delta g_{из}$	0,19	1,00											
grad $\Delta g_{из}$	-0,22	0,06	1,00										
$\Delta g_{гЛ}$	-0,44	0,74	0,30	1,00									
grad H_{Φ}	-0,06	-0,50	0,01	-0,37	1,00								
grad h_p	0,38	0,08	0,34	-0,06	0,32	1,00							
ΔT_a	-0,27	-0,03	0,09	0,22	0,01	0,01	1,00						
Q	-0,07	-0,05	0,29	0,03	0,46	0,45	0,37	1,00					
Δt	-0,15	-0,84	-0,05	-0,66	0,74	-0,01	-0,19	0,17	1,00				
$\Sigma \sigma_p$	-0,01	0,73	0,35	0,77	-0,25	0,40	0,21	0,25	-0,70	1,00			
A_{10}	-0,10	-0,54	0,05	-0,32	0,64	0,21	0,27	0,56	0,50	-0,21	1,00		
V_{Γ}^M	-0,20	-0,44	-0,04	-0,16	0,44	0,06	0,01	0,16	0,39	-0,19	0,35	1,00	
"Волн"	-0,33	-0,43	-0,00	-0,24	-0,10	-0,44	-0,22	-0,12	0,56	-0,63	0,10	-0,02	1,00

Таблица 11
 Результаты корреляционного анализа для очаговой зоны Севастопольских землетрясений

Параметр	Δg_B	$\Delta g_{из}$	grad $\Delta g_{из}$	$\Delta g_{гЛ}$	grad H_{Φ}	grad h_p	ΔT_a	Q	Δt	$\Sigma \sigma_p$	A_{10}	V_{Γ}^M	"Волн"
Δg_B	1,00												
$\Delta g_{из}$	0,18	1,00											
grad $\Delta g_{из}$	0,42	-0,31	1,00										
$\Delta g_{гЛ}$	-0,32	0,59	-0,39	1,00									
grad H_{Φ}	0,28	-0,71	0,50	-0,84	1,00								
grad h_p	0,59	-0,14	0,51	-0,47	0,59	1,00							
ΔT_a	0,48	0,21	-0,18	-0,31	-0,05	0,00	1,00						
Q	-0,53	0,29	-0,37	0,71	-0,66	-0,32	-0,35	1,00					
Δt	0,34	-0,69	0,42	-0,97	0,92	0,49	0,23	-0,70	1,00				
$\Sigma \sigma_p$	0,50	0,19	0,35	-0,01	0,41	0,47	-0,02	-0,63	0,20	1,00			
A_{10}	-0,10	-0,51	0,08	-0,43	0,63	0,17	-0,30	-0,42	0,51	0,24	1,00		
V_{Γ}^M	0,12	-0,15	0,27	-0,41	0,27	0,17	0,53	-0,13	0,36	-0,08	-0,13	1,00	
"Волн"	0,10	-0,62	0,11	-0,72	0,64	0,29	0,23	-0,22	0,74	-0,23	0,26	0,70	1,00

Таблица 12
 Результаты корреляционного анализа для очаговой зоны Анапских землетрясений

Параметр	Δg_B	$\Delta g_{из}$	grad $\Delta g_{из}$	$\Delta g_{гп}$	grad $H_{ф}$	grad h_p	ΔT_a	Q	Δr	$\Sigma \sigma_p$	$A_{1,0}$	$V_{г}^M$	"Волн"
Δg_B	1,00												
$\Delta g_{из}$	0,92	1,00											
grad $\Delta g_{из}$	-0,10	-0,04	1,00										
$\Delta g_{гп}$	-0,52	-0,29	0,52	1,00									
grad $H_{ф}$	-0,04	0,07	0,05	-0,04	1,00								
grad h_p	0,73	0,56	-0,19	-0,66	-0,19	1,00							
ΔT_a	0,27	-0,21	0,69	-0,02	-0,35	-0,41	1,00						
Q	-0,74	-0,81	-0,28	0	0,16	-0,41	-0,02	1,00					
Δr	0,12	-0,09	-0,14	-0,09	-0,49	0,22	-0,01	0,20	1,00				
$\Sigma \sigma_p$	0,40	0,62	0,33	0,44	0,16	-0,12	0,33	-0,53	-0,09	1,00			
$A_{1,0}$	0,51	0,46	0,08	-0,35	-0,23	0,47	0,04	-0,47	-0,20	0,12	1,00		
$V_{г}^M$	0,35	0,26	-0,28	-0,31	0,10	0,27	-0,15	0,09	0,36	0,11	-0,05	1,00	
"Волн"	-0,01	0,15	0,23	0,25	0,50	-0,18	-0,02	-0,12	-0,37	0,28	-0,15	-0,12	1,00

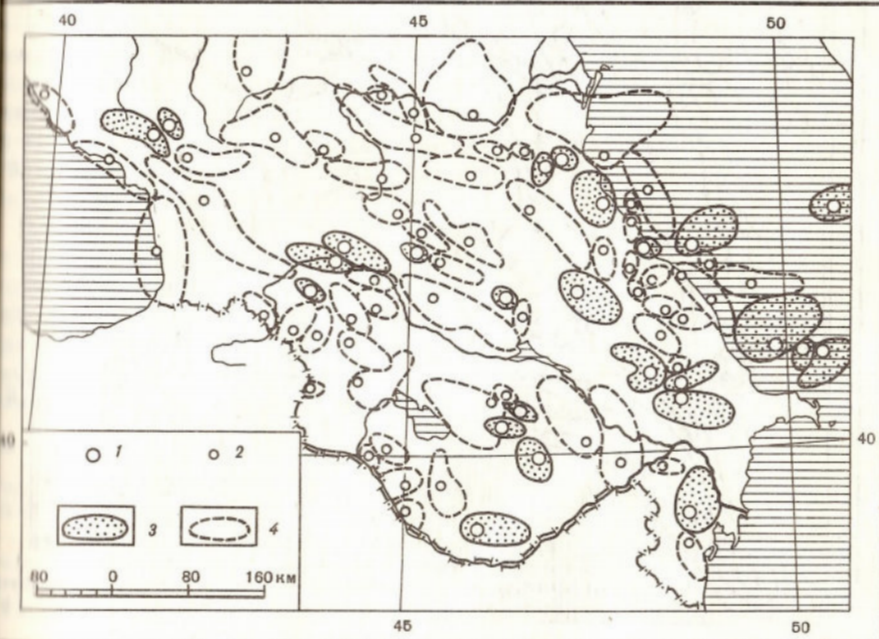


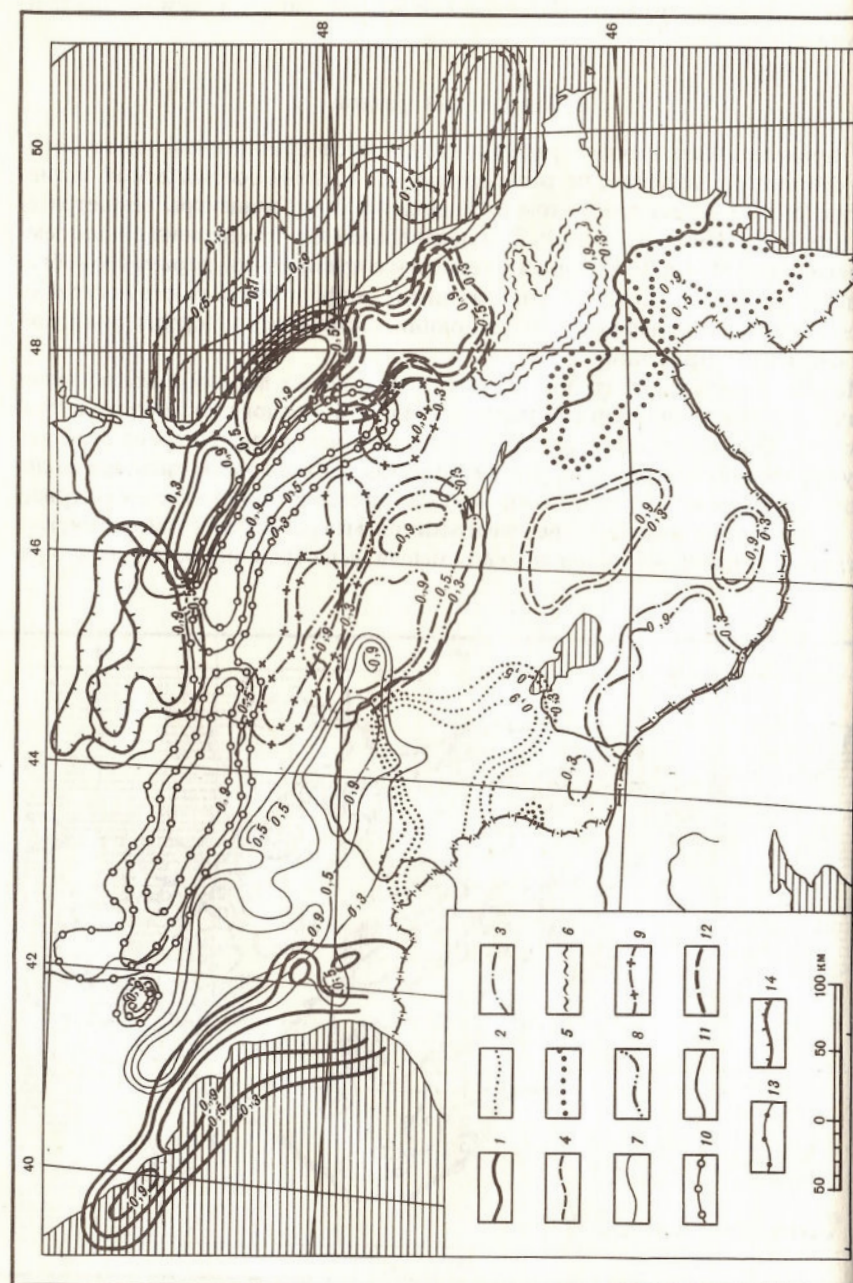
Рис. 9. Схема собственных областей землетрясений с $M \geq 5,0$ Кавказского региона
 эпицентры землетрясений: 1 - $M \geq 6,0$; 2 - $M \geq 5,0$; 3 - области землетрясений с $M \geq 6,0$; 4 - области землетрясений с $M \geq 5,0$

корреляционного анализа параметров, характерных для выделенных типов очаговых зон Крымского региона, содержатся в табл. 10–12. В целом полученные результаты могут быть геологически истолкованы с точки зрения блоковой модели среды.

4. Кавказский регион

В пределах Кавказского региона выделяются сравнительно обособленные сейсмичные области, не равноценные по степени сейсмической активности. Первоначально предметом исследования были эпицентры землетрясений с $M \geq 5,1$ [Новый каталог...], в дальнейшем изучались сильнейшие землетрясения с $M \geq 6,0$. Комплекс геолого-геофизических параметров был представлен 13-ю картами, содержащими информацию о структурном, статическом и динамическом состоянии геологической среды, вмещающей очаги землетрясений.

Использование кластерного анализа позволило на первом этапе решения задачи выделить собственные области эталонов каждого из землетрясений (рис. 9). Они представляют собой пространственно ориентированные выделенные замкнутые области разной площади. Можно высказать предположение о сходстве размеров собственных областей эталонных землетрясений с размерами очагов, определенными по макросейсмическим и инструментальным данным. Оно не лишено смысла, если сравнить размеры площа-



и внутри максимальных изосейст с размерами упомянутых выше собственных областей. По размеру и пространственной приуроченности этих областей косвенно можно судить о простирации и размере неоднородностей, вмещающих очаг землетрясения.

Примером сказанного выше может служить Шемахинская область, где четко выделяются два направления. Первое — совпадает с простираем Главного Кавказского хребта, второе — ориентировано примерно вкост простираения структур Большого Кавказа. В южной части Ахалкалакского горья наблюдается преимущественно северо-западное ориентирование собственных областей.

Ориентировка собственных областей Лениканской группы землетрясений юго-восточная, т.е. вкост простираения Большого Кавказского хребта. В подавляющем большинстве случаев направление простираения собственных областей землетрясений совпадает с простираем структур Большого Кавказа.

Анализируя размеры собственных областей эталонных Кавказских землетрясений, можно предположить, что наибольшая глубина очагов соответствует Восточному Кавказу. Для землетрясений Западного борта Большого Кавказа характерны разные размеры этих областей и, по-видимому, различные глубины очагов. И хотя делать окончательный вывод о прямой связи размеров собственных областей с глубиной очага землетрясений преждевременно, полученные данные не позволяют считать такую связь случайной.

Вторым этапом решаемой задачи было разделение всего сейсмического региона Кавказа на обособленные сейсмически активные области, включающие несколько очаговых зон землетрясений, различных по магнитуде. Задача решалась при помощи самоопознавания эталонов класса А, которыми служили эпицентры землетрясений с $7,0 \geq M \geq 5,1$. В результате самоопознавания были оконтурены несколько районов, в которые входят очаги землетрясений, близкие по типу проявления в геологических и геофизических признаках (рис. 10).

Заслуживает внимания то обстоятельство, что каждая из выделенных нами групп землетрясений пространственно обособлена. Изолинии близости оконтуривают каждую группу и ориентированы в основном в северо-западном направлении. Решение задачи в итоге предусматривает нахождение в исследуемом регионе близких (сходных) с эталонной группой очагов землетрясений. Но в данном случае районов, сходных с эталонными группами районов, за пределами контуров, очерченных изолиниями, нет. Этот

рис. 10. Карта в изолиниях близости к разным группам (типам) землетрясений Кавказского региона

1 — Черноморская, 2 — Лениканская, 3 — Араратская, 4 — Дашкесанская, 5 — Куринская, 6 — Шемахинская, 7 — Южного склона Большого Кавказа, 8 — Алазанская, 9 — центральной части Большого Кавказа, 10 — северного склона Большого Кавказа, 11 — Махачкалинская, 12 — Дербентская, 13 — Каспийская, 14 — Терско-Каспийская

рис. 11. Карта в изолиниях близости к землетрясениям с $M \geq 6,0$ Кавказского региона
1 — эпицентры землетрясений с $M \geq 6,0$; 2 — изолинии близости; 3 — области аномальных значений близости

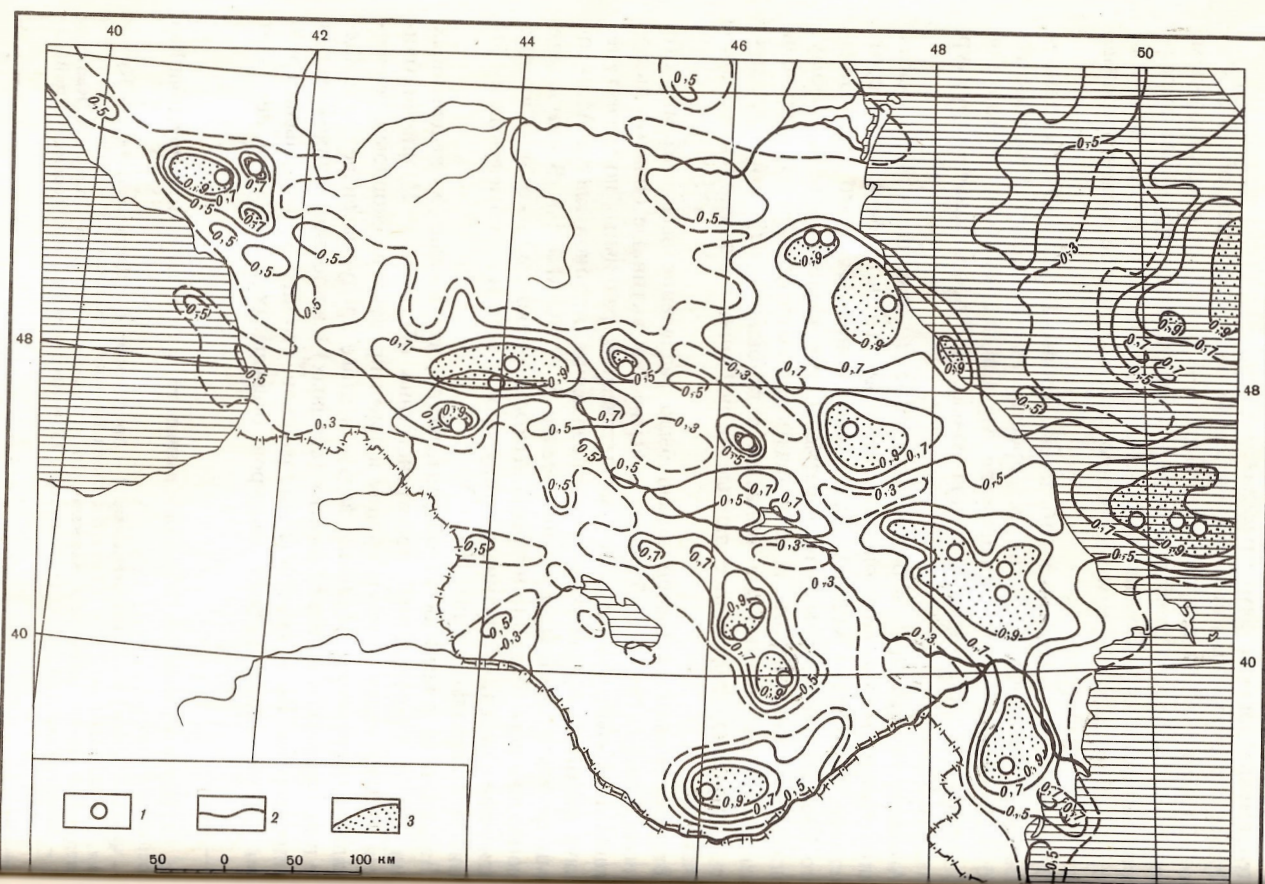


Таблица 13
Коэффициенты корреляции между группами землетрясений Кавказского региона

Параметры	Сопоставляемые группы очаговых зон землетрясений											
	Черноморская и Ленинградская	Ленинградская и Махачкалинская	Араратская и Дашкесанская	Дашкесанская и Терско-Каспийская	Куринская и Шемахинская	Шемахинская и Дашкесанская	Южного борта Большого Кавказа и Северного склона Большого Кавказа	Северного склона Большого Кавказа и Центральной части Большого Кавказа	Алазанская и Центральная часть Большого Кавказа	Махачкалинская и Дербентская	Каспийская и Терско-Каспийская	Терско-Каспийская и Алазанская
Δg_B	0,73	-0,28	-0,73	0,37	0,48	0,03	0,34	-0,15	0,30	0,00	0,02	0,82
$\Delta g_{из}$	0,17	0,78	-0,71	0,96	0,04	-0,41	-0,25	-0,51	0,62	-0,37	0,10	-0,45
grad $\Delta g_{из}$	0,24	-0,30	0,23	0,23	0,11	0,43	-0,15	0,11	0,10	-0,18	0,49	-0,53
$\Delta g_{ГЛ}$	0,50	-0,64	0,92	0,82	-0,92	0,71	0,41	-0,27	0,06	-0,19	0,71	-0,73
grad H_{Φ}	0,12	-0,60	0,28	0,79	0,74	-0,46	0,23	0,18	0,34	0,58	0,65	-0,74
grad h_p	0,26	-0,36	-0,20	0,87	-0,65	-0,18	-0,19	0,20	0,07	-0,39	-0,04	-0,52
ΔT_a	0,36	0,46	-0,27	-0,08	0,53	-0,48	0,34	0,12	0,01	-0,20	-0,05	0,68
Q	0,72	0,80	0,2	0,68	-0,54	-0,48	-0,76	-0,45	0,58	-0,81	0,13	-0,47
Δt	0,33	-0,52	0,90	-0,97	-0,12	0,88	-0,80	0,39	0,28	0,52	-0,53	0,92
$\Sigma \sigma_p$	0,36	0,80	0,42	0,84	-0,84	0,83	0,74	-0,84	0,00	-0,66	0,39	-0,96
A_{10}	0,00	0,11	0,13	-0,35	-0,46	0,35	-0,08	-0,24	0,01	0,45	-0,51	-0,27
V_T^M	0,01	-0,64	-0,81	0,62	-0,41	-0,46	-0,85	-0,41	0,50	-0,29	-0,23	0,35
"Волн"	0,00	0,83	-0,03	0,80	-0,15	-0,80	0,97	0,23	0,61	0,34	-0,12	-0,39

Таблица 14

Результаты корреляционного анализа для очаговой зоны землетрясений
южного склона Большого Кавказа

Параметр	Δg_B	$\Delta g_{из}$	grad $\Delta g_{из}$	$\Delta g_{ГЛ}$	grad $H_{Ф}$	grad h_p	ΔT_a	Q	Δt	$\Sigma \sigma_p$	A_{10}	$V_{Г}^M$	"Волн"
Δg_B	1,00												
$\Delta g_{из}$	0,58	1,00											
grad $\Delta g_{из}$	0,20	-0,09	1,00										
$\Delta g_{ГЛ}$	0,73	0,38	-0,04	1,00									
grad $H_{Ф}$	0,63	0,31	0,18	0,64	1,00								
grad h_p	0,61	0,48	0,32	0,31	0,42	1,00							
ΔT_a	-0,23	-0,51	-0,03	-0,08	0,09	-0,23	1,00						
Q	0,01	0,66	-0,18	0,01	-0,12	0,21	-0,50	1,00					
Δt	-0,25	0,04	0,10	-0,57	-0,61	-0,17	-0,10	0,37	1,00				
$\Sigma \sigma_p$	-0,16	0,24	0,24	-0,36	-0,17	0,04	-0,24	0,33	0,59	1,00			
A_{10}	0,13	0,36	-0,20	0,27	0,25	0,02	-0,08	0,22	0,02	0,01	1,00		
$V_{Г}^M$	-0,31	-0,37	0,11	-0,28	-0,13	0,26	0,20	-0,15	0,42	0,28	0,08	1,00	
"Волн"	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,00

Таблица 15

Результаты корреляционного анализа для очаговой зоны землетрясений
центральной части Большого Кавказа

Параметр	Δg_B	$\Delta g_{из}$	grad $\Delta g_{из}$	$\Delta g_{ГЛ}$	grad $H_{Ф}$	grad h_p	ΔT_a	Q	Δt	$\Sigma \sigma_p$	A_{10}	$V_{Г}^M$	"Волн"
Δg_B	1,00												
$\Delta g_{из}$	0,84	1,00											
grad $\Delta g_{из}$	-0,05	0,22	1,00										
$\Delta g_{ГЛ}$	-0,77	-0,91	-0,22	1,00									
grad $H_{Ф}$	-0,10	-0,22	-0,01	0,12	1,00								
grad h_p	0,16	0,30	0,48	-0,29	-0,09	1,00							
ΔT_a	0,35	0,59	0,31	-0,72	0,13	0,41	1,00						
Q	0,68	0,76	-0,20	-0,76	-0,43	0,04	0,40	1,00					
Δt	0,01	0,11	0,09	0,06	0,43	0,03	0,20	-0,39	1,00				
$\Sigma \sigma_p$	0,57	0,68	0,52	-0,55	-0,33	0,36	0,12	0,32	0,01	1,00			
A_{10}	0,38	0,62	0,68	-0,63	-0,27	0,57	0,41	0,33	-0,05	0,67	1,00		
$V_{Г}^M$	-0,31	-0,26	0,07	0,46	-0,64	-0,04	-0,57	-0,17	-0,14	0,10	0,10	1,00	
"Волн"	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,00

Таблица 16

Результаты корреляционного анализа для очаговой зоны Шемахинских землетрясений

Параметр	Δg_B	$\Delta g_{из}$	grad $\Delta g_{из}$	$\Delta g_{ГЛ}$	grad H_{Φ}	grad h_p	ΔT_a	Q	Δt	$\Sigma \sigma_p$	A_{10}	V_{Γ}^M	"Волн"
Δg_B	1,00												
$\Delta g_{из}$	0,86	1,00											
grad $\Delta g_{из}$	-0,15	-0,07	1,00										
$\Delta g_{ГЛ}$	0,41	0,74	-0,06	1,00									
grad H_{Φ}	-0,54	-0,56	0,49	-0,30	1,00								
grad h_p	0,56	0,68	-0,16	0,72	-0,17	1,00							
ΔT_a	-0,19	-0,42	0,03	-0,48	0,02	0,63	1,00						
Q	0,10	0,49	0,21	0,75	-0,04	0,42	-0,50	1,00					
Δt	-0,86	-0,93	-0,01	-0,68	0,52	-0,56	0,26	-0,48	1,00				
$\Sigma \sigma_p$	0,67	0,78	0,10	0,83	-0,35	0,63	-0,56	0,85	-0,75	1,00			
A_{10}	0,71	0,60	-0,05	0,17	-0,59	0,25	-0,12	-0,14	-0,48	0,27	1,00		
V_{Γ}^M	-0,51	-0,39	0,06	0,18	0,58	-0,10	0,00	0,26	0,28	-0,07	0,68	1,00	
"Волн"	-0,39	-0,62	0,05	-0,73	0,01	-0,72	0,35	-0,50	0,55	-0,52	0,09	-0,20	1,00

Таблица 17

Результаты корреляционного анализа для очаговой зоны Махачкалинских землетрясений

Параметр	Δg_B	$\Delta g_{из}$	grad $\Delta g_{из}$	$\Delta g_{ГЛ}$	grad H_{Φ}	grad h_p	ΔT_a	Q	Δt	$\Sigma \sigma_p$	A_{10}	V_{Γ}^M	"Волн"
Δg_B	1,00												
$\Delta g_{из}$	0,53	1,00											
grad $\Delta g_{из}$	0,33	0,02	1,00										
$\Delta g_{ГЛ}$	-0,04	0,04	-0,24	1,00									
grad H_{Φ}	-0,08	0,18	-0,30	0,75	1,00								
grad h_p	-0,01	0,23	-0,20	0,12	0,05	1,00							
ΔT_a	-0,07	-0,22	0,19	-0,66	-0,51	-0,54	1,00						
Q	0,23	0,52	-0,15	0,07	0,28	0,60	-0,56	1,00					
Δt	0,02	-0,21	0,51	-0,87	-0,71	-0,07	0,60	-0,16	1,00				
$\Sigma \sigma_p$	-0,13	-0,36	-0,11	-0,09	0,07	-0,10	-0,11	0,24	0,10	1,00			
A_{10}	0,20	0,52	0,17	0,09	-0,02	0,11	-0,19	0,33	-0,06	-0,25	1,00		
V_{Γ}^M	0,12	0,24	-0,46	0,85	0,73	0,22	-0,78	0,41	0,92	0,08	0,21	1,00	
"Волн"	-0,12	-0,24	0,46	0,85	0,73	0,22	0,78	-0,41	0,92	-0,08	-0,21	-1,00	1,00

Таблица 18
 Результаты корреляционного анализа для очаговой зоны
 Терско-Каспийских землетрясений

Параметр	Δg_B	$\Delta g_{из}$	град $\Delta g_{из}$	$\Delta g_{гг}$	град H_{Φ}	град h_p	ΔT_a	Q	Δt	$\Sigma \sigma_p$	$A_{1,0}$	$V_{г}^M$	"Волн"
Δg_B	1,00												
$\Delta g_{из}$	0,21	1,00											
град $\Delta g_{из}$	-0,09	0,86	1,00										
$\Delta g_{гг}$	-0,41	-0,60	-0,37	1,00									
град H_{Φ}	-0,23	0,11	0,35	0,42	1,00								
град h_p	0,19	0,67	0,81	-0,34	0,25	1,00							
ΔT_a	-0,12	-0,07	-0,18	-0,28	-0,56	0,23	1,00						
Q	-0,01	0,81	0,84	-0,36	0,47	0,70	0,22	1,00					
Δt	0,54	-0,43	-0,63	-0,27	-0,56	-0,42	0,28	-0,63	1,00				
$\Sigma \sigma_p$	-0,65	-0,02	0,07	0,45	0,09	0,23	0,30	0,06	-0,57	1,00			
$A_{1,0}$	-0,18	0,72	0,90	-0,10	0,45	0,83	0,16	0,77	-0,71	0,27	1,00		
$V_{г}^M$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,00	
"Волн"	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,00

ультат может свидетельствовать: 1) либо о различии очаговых зон внутри перечисленных групп землетрясений и об индивидуальности геолого-геофизических признаков, описывающих структурно-динамические свойства среды; при этом каждая эталонная группа не находит близких себе в данной территории; 2) либо о том, что земная кора в пределах Кавказа настолько дифференцирована, что любой очаг или группа очагов землетрясений есть событие уникальное, не поддающееся никакому математическому моделированию.

Нам кажется первый вывод более вероятным. По-видимому, очаги землетрясений объединяются в группы, характеризующиеся своим набором геолого-геофизических признаков, присущих только данной сейсмической среде, вмещающей очаг. Это подтверждают также коэффициенты парной корреляции r , дающие представление о тесноте связи между геолого-геофизическими и сейсмологическими признаками.

Сравнение выделенных нами типов землетрясений Кавказского региона представлено в табл. 13. При подобной обработке параметров наибольший коэффициент корреляции указывает на параметр, определяющий наибольшее различие между типами очаговых зон, т.е. показывает по какому признаку разделились и обособились группы землетрясений. Основными (см. табл. 13) являются параметры, условно описывающие динамическое состояние, затем структуру и вещественный состав среды. Каждый из типов очаговых зон характеризуется своим типом связей между параметрами (табл. 14–18).

Карта в изолиниях меры сходства (близости) и сильнейшим землетрясением Кавказского региона (рис. 11) была построена по результатам количественной обработки собственных областей эталонных землетрясений с $M \geq 6,0$. Эта задача решалась на третьем этапе исследования. Выделенные типы сильных землетрясений распределены неравномерно, что в значительной степени определяется особенностями строения среды региона.

5. Копетдагский регион

Изучение сейсмичности Копетдагского региона проводилось в несколько этапов. Единая в тектоническом плане зона Копетдага разделилась на три геоморфологические области, отвечающие за возникновение сильнейших землетрясений: Краснодарского (1895, $M = 8,2$); Казанджикского (1946, $M = 7,0$); Ашхабадского (1948, $M = 7,3$). Качественный анализ был проведен по результатам самоопознавания эталонов класса А, входящих в пределы первых изосейст VIII–X баллов. В этом случае на карте в изолиниях близости вырисовывается единая зона субширотного простирания, причем все землетрясения оказываются связанными друг с другом системой изолиний (рис. 12). Обособленность каждой из выделенных сейсмических областей – Краснодарской, Казанджикской и Ашхабадской, – вероятно, связана с наличием разных по величине и глубине залегания неоднородностей, с которыми связано возникновение землетрясений.

Количественный анализ параметров проводился на основании полученных парных коэффициентов корреляции, определяющих тесноту связи между геологическими, геофизическими и сейсмологическими признаками, для каждой выделенной области и всего региона в целом

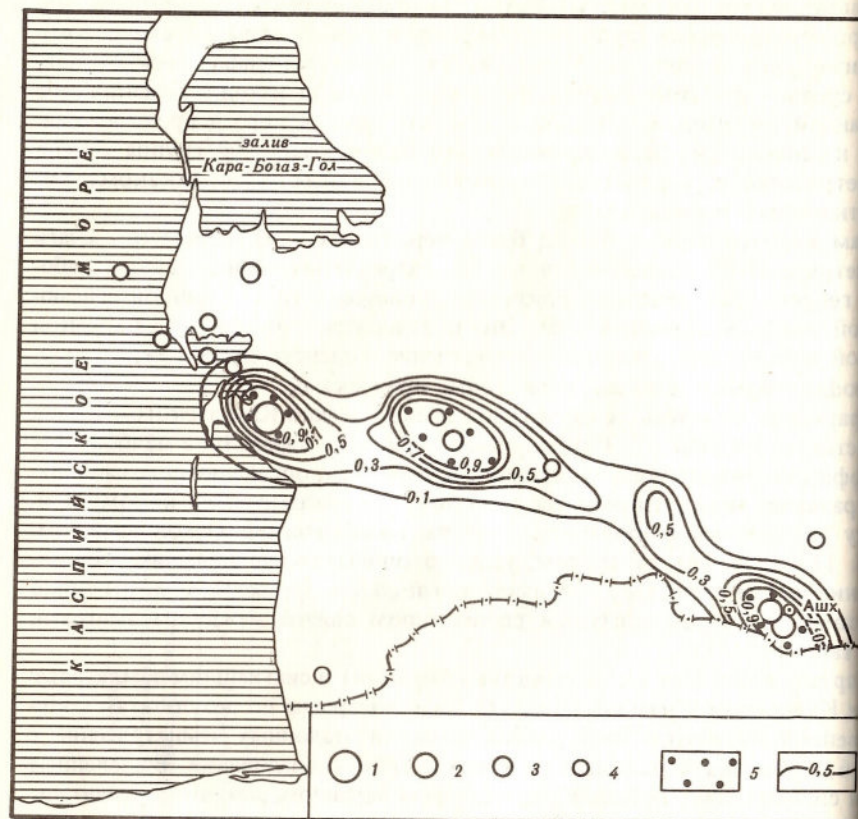


Рис. 12

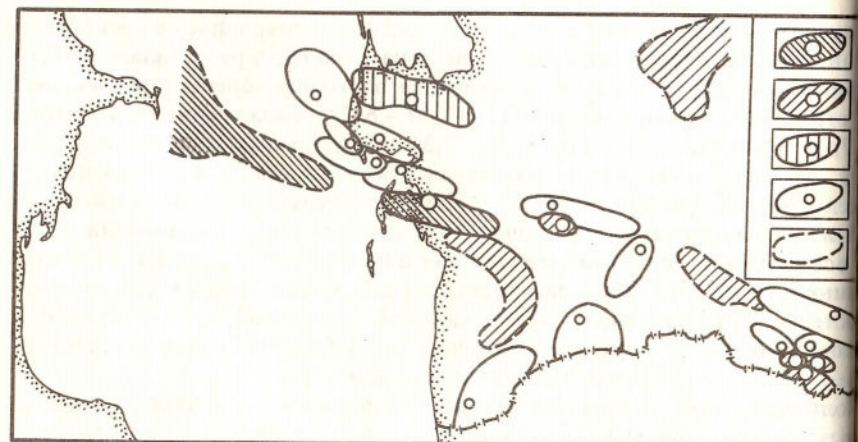


Рис. 13

Таблица 19
Коэффициенты корреляции параметров с классифицирующим признаком — степенью сейсмичности

Признаки	Эталонные зоны					
	М ≥ 5,1 Эпицентр	М ≥ 5,1 Собствен- ные об- ласти	М ≥ 7,0 Изосейсты VIII—X	Красно- водское М = 8,2	Казан- джик- ское М = 7,0	Ашхабад- ское М = 7,3
Δg_B	-0,55	-0,39	-0,81	-0,78	-0,66	-0,93
$\Delta g_{из}$	-0,35	-0,29	-0,67	-0,77	-0,56	-0,78
grad $\Delta g_{из}$	0,44	0,14	0,33	0,60	0,44	-0,29
$\Delta g_{гл}$	0,61	0,45	0,79	0,73	0,97	0,99
grad H_Φ	0,51	0,38	0,59	0,68	0,61	0,64
grad h_p	0,15	0,18	0,36	0,08	0,39	0,44
ΔT_a	0,84	0,55	0,83	0,70	0,80	0,92
Q	-0,55	-0,45	-0,91	-0,68	-0,93	-0,84
Δt	0,34	-0,05	0,72	0,73	0,73	0,45
$\Sigma \sigma_p$	0,65	0,03	0,66	0,41	0,75	0,70
A_{10}	0,63	0,44	0,61	0,54	0,54	0,59
$\gamma_{г}^M$	0,85	0,41	0,92	0,94	0,05	0,94
"Волн"	0,37	-0,02	-0,09	-0,17	-0,54	0,92

табл. 19–22). Для определения наиболее информативных параметров приводится таблица коэффициентов корреляции с классифицирующим признаком — степенью сейсмичности (см. табл. 19).

Собственные области эталонов Копетдагского региона получены для землетрясений с $M \geq 6,0$. Пространственно эти области ориентированы в двух противоположных направлениях. Обращает на себя внимание квази-собственная зона Красноводского землетрясения, являющаяся связующим звеном между Кавказским и Копетдагским регионами (рис. 13).

Наконец, последним этапом было построение карты в изолиниях близости к землетрясениям с $M \geq 5,0$ региона. В качестве эталонных объектов были взяты собственные области землетрясений с $M \geq 5,0$ (рис. 14).

Рис. 12. Карта в изолиниях близости к сильнейшим землетрясениям Копетдагского региона

1 — Красноводское с $M = 8,2$, 2 — Ашхабадское с $M = 7,3$, 3 — Казанджикское с $M = 7,0$, 4 — землетрясения с $M \geq 5,1$; 5 — эталонные точки класса А; 6 — изолинии близости

Рис. 13. Схема собственных областей землетрясений с $M \geq 5,0$ Копетдагского региона: 1 — область землетрясения с $M = 8,2$; 2 — области землетрясений с $M \geq 7,0$; 3 — области землетрясений с $M \geq 6,0$; 4 — области землетрясений с $M \geq 5,0$; 5 — квази-собственные области

Рис. 14. Карта в изолиниях близости к землетрясениям с $M \geq 5,0$ Копетдагского региона

1 — эпицентры землетрясений: 1 — $M = 8,2$; 2 — $M \geq 7,0$; 3 — $M \geq 6,0$; 4 — $M \geq 5,0$; 5 — изолинии близости

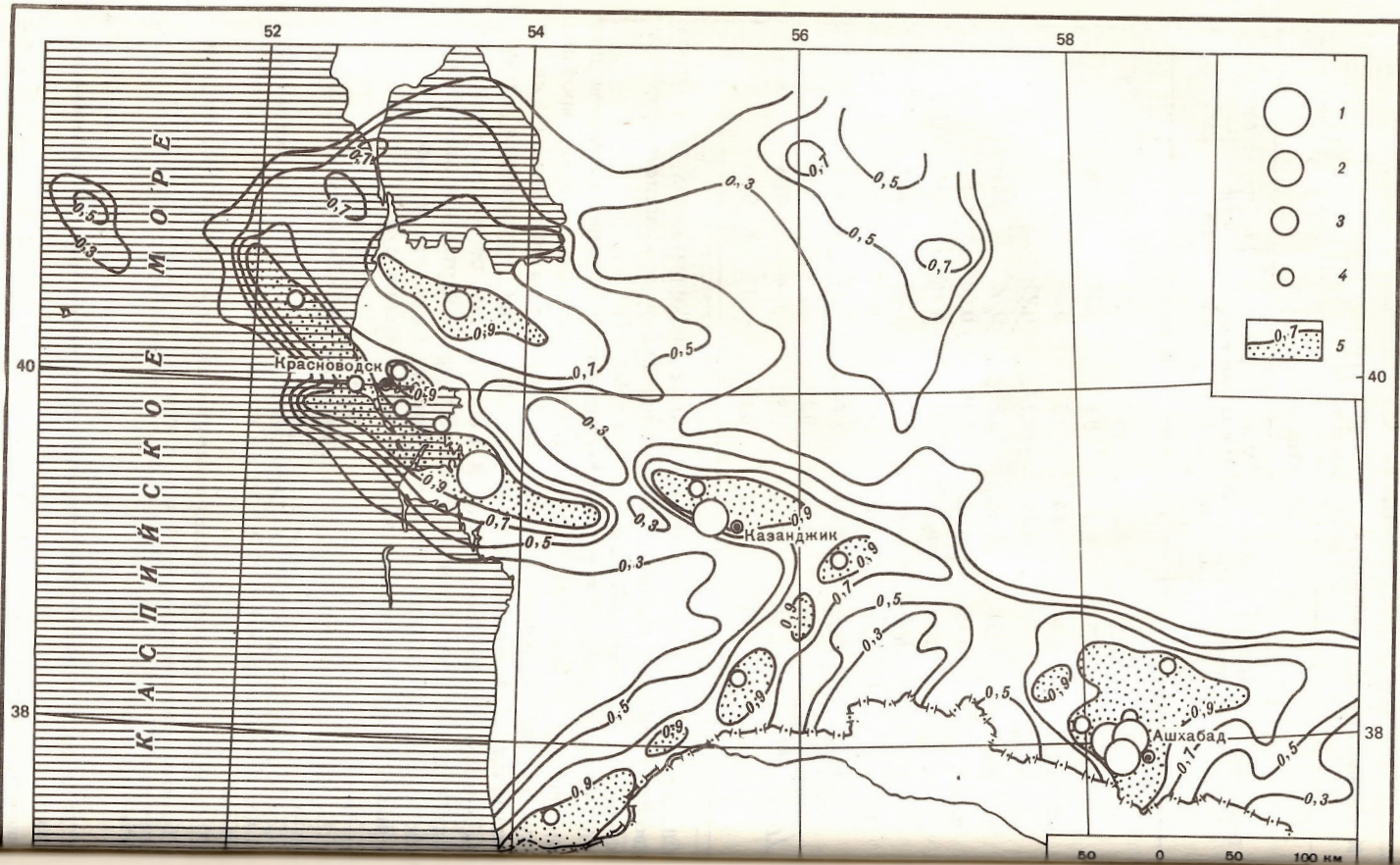


Таблица 20
 Результаты корреляционного анализа для очаговой зоны Краснодарского землетрясения

Параметр	Δg_B	$\Delta g_{из}$	grad $\Delta g_{из}$	$\Delta g_{гл}$	grad H_Φ	grad h_p	ΔT_a	Q	Δt	$\Sigma \sigma_p$	A_{10}	V_Γ^M	"Волн"
Δg_B	1,00												
$\Delta g_{из}$	0,98	1,00											
grad $\Delta g_{из}$	0,60	0,60	1,00										
$\Delta g_{гл}$	0,35	0,29	0,40	1,00									
grad H_Φ	0,41	0,37	0,77	0,53	1,00								
grad h_p	0,51	0,39	0,31	0,50	0,33	1,00							
ΔT_a	0,74	0,74	0,85	0,37	0,77	0,29	1,00						
Q	0,21	0,18	0,15	-0,38	0,28	-0,07	0,31	1,00					
Δt	-0,78	-0,83	-0,60	-0,29	-0,50	-0,06	0,86	-0,23	1,00				
$\Sigma \sigma_p$	0,26	0,29	0,43	0,38	0,47	0,26	0,45	-0,04	-0,34	1,00			
A_{10}	0,06	0,60	0,54	0,53	0,50	0,83	0,45	-0,02	-0,27	0,37	1,00		
V_Γ^M	-0,07	-0,76	0,25	-0,12	-0,19	0,05	0,53	0,08	0,83	-0,24	-0,21	1,00	
"Волн"	-0,25	-0,19	0,14	-0,27	0,05	-0,16	0	-0,11	0,06	0,26	-0,13	-0,04	1,00

6. Туранская плита

Первый опыт обработки комплекса геолого-геофизических данных для целей долговременного прогноза сейсмичности на территории Туранской плиты связан с Бухаро-Газлийским регионом [Борисов и др., 1976].

За истекшие годы произошло еще одно сильное землетрясение в районе Газли (1984 г.), был подготовлен новый комплекс геолого-геофизических данных, единый для территории Туркменской ССР и западной части Узбекской ССР, усовершенствована программа ПОИСК.

С учетом этих фактов были построены новые карты оценки долговременной сейсмической опасности территории Туранской плиты. Используются параметры перечислены в табл. 23 (данные Э.С. Воронцовой).

Среди них наиболее кондиционными являются гравитационные и магнитные аномалии, значения которых снимались с карт масштаба 1:200 000 и 1:100 000 с шагом $0,2^\circ$ и затем осреднялись по трапециям $0,2^\circ \times 0,2^\circ$, а также вычисленные по исходным значениям горизонтальные градиенты этих полей. Остальные данные имеют различную степень генерализации в соответствии с масштабом карт от 1:2 500 000 до 1:10 000 000. Поэтому рассматриваемые ниже результативные карты имеют сугубо региональный характер, не являются окончательными и могут быть уточнены после привлечения более детальных исходных данных.

Первая карта построена в изолиниях адекватности (рис. 15) и наглядно демонстрирует возможности методики. Обучение ЭВМ проводилось на опорных точках из эпицентральных зон девяти землетрясений с $M \geq 5$ Приамударьинской зоны: Ташаузского ($M = 6,1$), трех Газлийских ($M = 7,1-7,3$), двух Бухарских ($M = 6,1, 6,7$), Керкинского ($M = 7,1$), Кизил-

Таблица 23

Исходные геолого-геофизические данные

Параметры	Условные обозначения
Градиент аномалий силы тяжести в редукции Буге	$\text{grad } \Delta g_B$
Аномалии силы тяжести в редукции Буге осредненные	$\Delta \bar{g}_B$
Градиент аномалий силы тяжести в изостатической редукции	$\text{grad } \Delta g_{из}$
Аномалии магнитного поля осредненные	ΔT_a
Градиент аномалий магнитного поля	$\text{grad } \Delta T_a$
Градиент скорости новейших движений	$\text{grad } N_a$
Глубинные аномалии силы тяжести	$\Delta g_{гл}$
Напряженность геомагнитного поля	H_T
Суммарное гравитационное влияние земной коры	$\Delta g_{зк}$
Глубина поверхности Мохоровичича	H_M
Суммарная плотность разломов	$\Sigma \sigma_p$
Градиент скорости современных движений	$\text{grad } V_{сд}$
Плотность кайнозойских разломов	σ_{KZ}
Градиент глубинных аномалий силы тяжести	$\text{grad } \Delta g_{гл}$

Авского ($M = 6,1$) и Дарганатинского ($M = 5,2$), образовавших класс А, и оборных точек класса \bar{A} , расположенных в зоне, которая до настоящего времени известна как асейсмичная и по результатам предыдущих работ с программой ПОИСК получила низкие значения близости и чебышевских оценок относительной вероятности.

На этой карте внутри изолиний адекватности 0,9 расположены эпицентры эталонных землетрясений и по смыслу этой меры сходства более всего вероятны новые землетрясения. Внутри изолиний 0,5 располагаются области, которые по комплексной геолого-геофизической характеристике ближе к эталонным высокосейсмичным зонам, чем к асейсмичной, а за пределами изолинии 0,01 сильные землетрясения маловероятны.

Примечательным на этой карте является то, что по эталонам одной высокосейсмичной зоны фактически прогнозируется сейсмичность других и этим демонстрируются возможности методики: изолиния 0,01 оконтуривает Копетдагский сейсмоактивный регион в целом, а восточнее Приамударьинской зоны в пределах изолинии 0,01 оказываются эпицентры землетрясений Прикызылкумской зоны.

В табл. 24 приведены оценки параметров отдельно для Приамударьинского и Копетдагского регионов. Из таблицы видно, что одинаковые по знаку и достаточно близкие по значению коэффициенты корреляции с определяющим признаком для обоих регионов имеют следующие параметры: $\text{grad } \Delta g_B$, $\Delta \bar{g}_B$, $\text{grad } N_a$, $\Delta g_{гл}$, $\Sigma \Delta g_{зк}$, H_M . Их средние значения хотя и неодинаковы в эталонных областях Приамударьинского и Копетдагского регионов, но больше по абсолютной величине, чем в асейсмичной зоне, большинство параметров близки и по величине.

Как видно из перечня наиболее информативных параметров, общими факторами сейсмичности обоих регионов являются повышенная мощность земной коры, плотностная дифференцированность литосферы и сильная изменчивость скорости новейших тектонических движений в пределах каждого региона.

Учитывая сходство многих геолого-геофизических характеристик Приамударьинского и Копетдагского регионов, оценка долговременной сейсмической опасности рассматриваемой части Туранской плиты была получена как результат обучения ЭВМ на опорных точках сильных землетрясений ($M \geq 5,0$) обоих регионов одновременно. На рис. 16 и 17 приведены карта в изолиниях близости и карта результатов кластерного анализа.

Для построения карты в изолиниях близости решались три самостоятельные задачи. В первой — опорными (эталонными) точками служили эпи-

рис. 15. Карта в изолиниях адекватности землетрясениям с $M \geq 5,0$ Приамударьинской зоны

эпицентры землетрясений: 1 — $M \geq 8,0$; 2 — $M \geq 7,0$; 3 — $M \geq 6,0$; 4 — $M \geq 5,0$; 5 — изолинии адекватности (Ad); 6 — области $Ad > 0,5$; 7 — области $Ad > 0,9$; 8 — эпицентры эталонных землетрясений

рис. 16. Карта оценки долговременной сейсмической опасности Туранской плиты в изолиниях близости

эпицентры: 1-4 — усл. обозначения см. рис. 15; изолинии близости к землетрясениям: 5 — $M \geq 7,0$; 6 — $M \geq 6,0$; 7 — $M \geq 5,0$; 8 — области $P > 0,9$

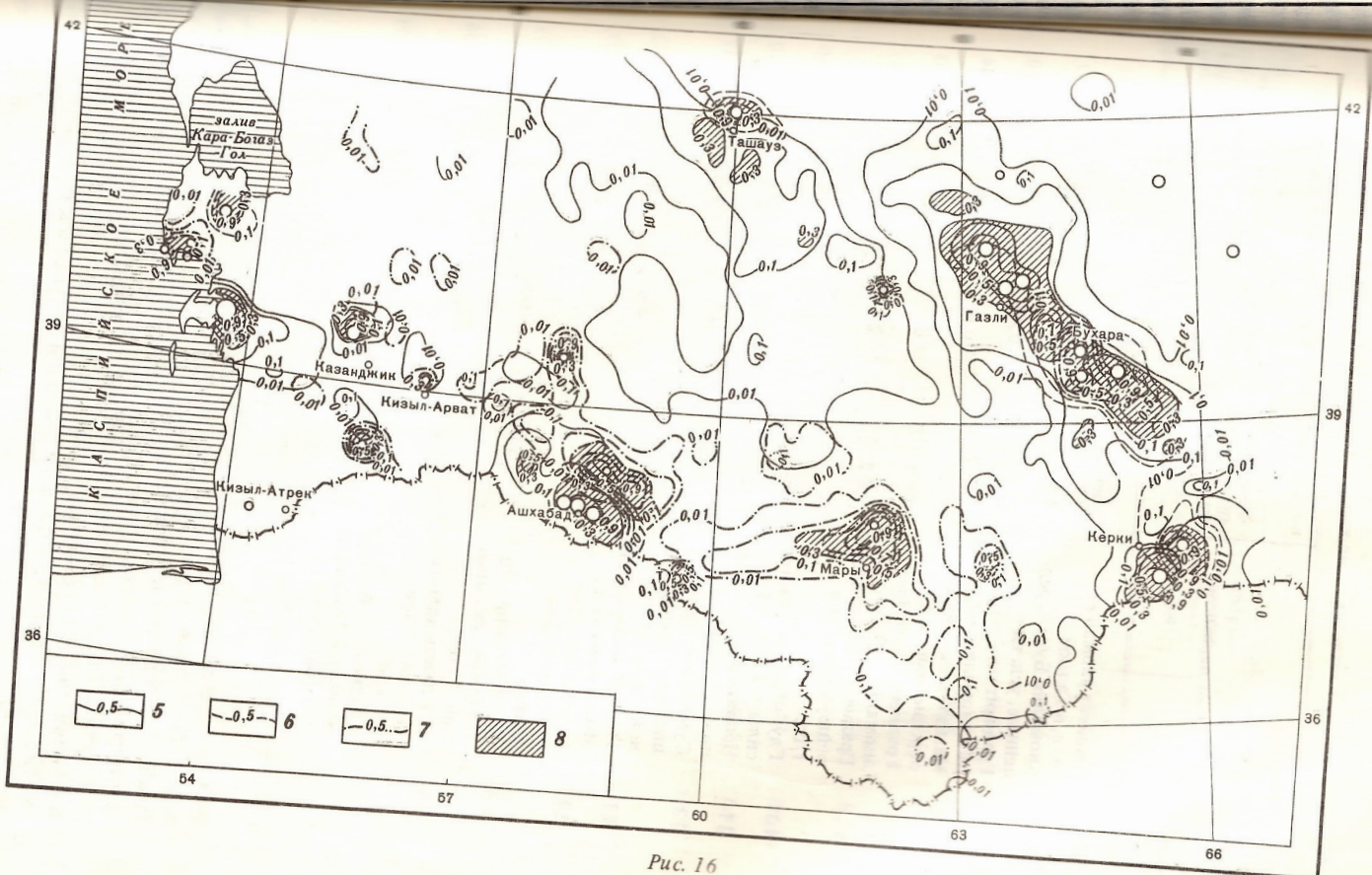
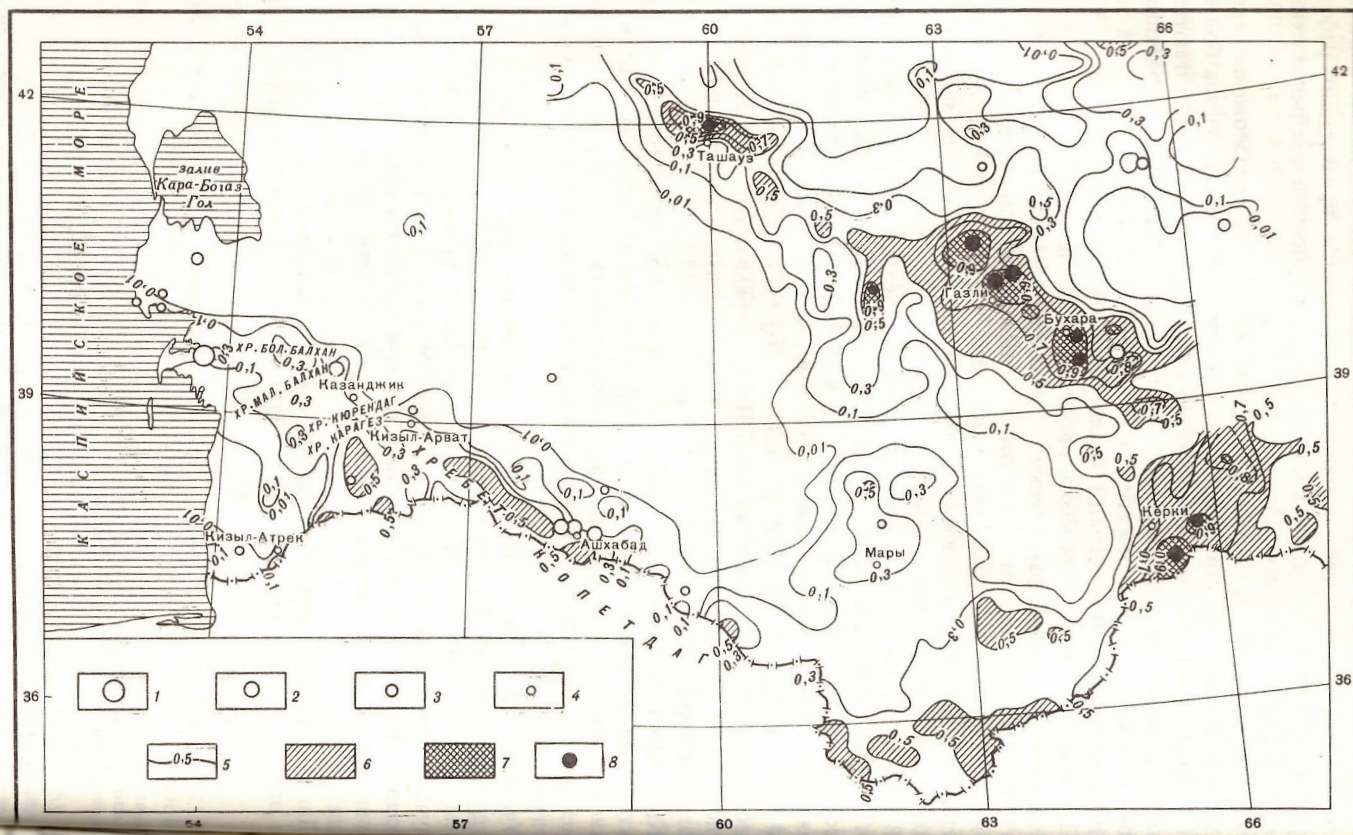


Рис. 16

Таблица 24
Статистические характеристики параметров

Номер параметра в счете	Название параметра	Условное обозначение параметра	Приамударьинский регион			Копетдагский регион				Асейсмичная область		
			среднее	изменчивость	корреляция с определяющим признаком	информативность в комплексе	среднее	изменчивость	корреляция с определяющим признаком	информативность в комплексе	среднее	изменчивость
4	Градиент аномалий Буге, мГал/км	$\text{grad } \Delta g_B$	1,19	0,67	0,51	0,08	1,50	1,26	0,53	0,03	0,71	0,47
5	Аномалии Буге осредненные, усл. ед.	$\Delta \bar{g}_B$	-2,47	2,88	-0,57	0,05	-4,14	6,65	-0,57	0,01	0,76	3,65
6	Градиент изостатических аномалий, мГал/км	$\text{grad } \Delta g_{\text{из}}$	0,49	0,55	0,10	0	0,93	1,08	0,43	0,02	0,42	0,32
7	Магнитные аномалии осредненные, мЭ	$\Delta \bar{T}$	-0,07	0,98	-0,44	0,07	2,47	1,91	0,70	0,09	0,54	0,83
8	Градиент магнитных аномалий, мЭ/км	$\text{grad } \Delta T$	0,14	0,17	0,03	0	0,15	0,12	0,10	0	0,13	0,10
9	Градиент скорости новейших движений, 1/год	$\text{grad } N_a$	27,30	16,42	0,57	0,13	109,59	192,66	0,48	0,06	14,31	8,83
10	Глубинные аномалии силы тяжести, мГал	$\Delta g_{\text{гл}}$	86,38	33,32	0,63	0,08	75,91	107,37	0,43	0	16,52	80,34
11	Напряженность геомагнитного поля	H_T	509,66	4,75	0,70	0,08	496,63	2,23	-0,46	0,02	500,61	7,92
12	Суммарное гравитационное влияние земной коры, мГал	$\Sigma \Delta g_{\text{зк}}$	-98,90	96,83	-0,57	0,03	-80,77	137,40	-0,42	0	-12,27	83,22
13	Глубина поверхности Мохоровичича, км	H_M	43,34	4,91	0,62	0,05	42,90	7,33	0,61	0,02	37,96	4,98
14	Суммарная плотность разломов, км/км ²	$\Sigma \sigma$	5,05	2,29	-0,17	0,02	5,64	2,93	0,09	0	5,78	3,49
15	Градиент скорости современных движений, 1/год	$\text{grad } V_{\text{сд}}$	0,06	0,05	-0,05	0	0,06	0,07	-0,12	0,01	0,06	0,08
16	Плотность кайнозойских разломов, км/км ²	$\sigma_{\text{КЗ}}$	0,33	0,91	-0,54	0,12	4,40	2,65	0,72	0,06	1,40	1,39
17	Градиент глубинных аномалий силы тяжести, мГал/км	$\text{grad } \Delta g_{\text{гл}}$	0,49	0,18	-0,73	0,06	1,68	1,01	0,30	0,02	1,23	0,66

центры землетрясений с $M \geq 7,0$ и ближайшие к ним узлы координатной сетки. Во второй задаче эталонами были эпицентры землетрясений магнитудой от 6,0 до 6,9 и ближайшие к ним узлы сетки, в третьей — то же землетрясение с магнитудой от 5,0 до 5,9. По результатам решения второй задачи были построены три карты в изолиниях близости. Затем изолинии были перенесены на одну общую основу и показаны соответствующими знаками, а области значений чебышевских оценок больше заштрихованы.

Наибольшей по площади зоной $P > 0,9$ землетрясений с $M \geq 7,0$ является

протяженная Бухаро-Газлийская зона северо-западного простирания, контуры которой попадают эпицентры двух более слабых Бухарских землетрясений. В область $P > 0,9$ для землетрясений той же силы попадает и центр Кизыл-Аякского землетрясения на юго-востоке Туркмении. Входятся прогнозные локальные максимумы P в Ташаузской зоне северо-западной зоны Газлийских землетрясений. На Копетдагском участке изолинии $P = 0,9$ оконтуривают в основном известные очаговые зоны и лишь северо-западу от группы Ашхабадских землетрясений выделяется локальный максимум $P > 0,9$.



Рис. 17. Карта районирования Туранской плиты по результатам кластерного анализа 1-4 – усл. обозначения см. на рис. 15; собственные и квазисобственные области эпицентров землетрясений: 5 – $M \geq 8,0$; 6 – $M \geq 7,0$; 7 – $M \geq 6,0$; 8 – $M \geq 5,0$

Высокие значения чебышевских оценок по землетрясениям двух других групп интенсивности также приурочены к очаговым зонам эталонных землетрясений, т.е. к Копетдагскому и Бухаро-Газлийскому регионам. В центральной части Туркмении выделяются отдельные локальные аномалии близости, которые, несмотря на малые значения этой меры сходства, заслуживают внимания как возможные новые очаговые зоны. Для построения карты кластеров (см. рис. 17) обучение ЭВМ было выполнено на опорных точках всех землетрясений с $M \geq 5,0$, кроме Кизыл-Атрекского, так как в его эпицентральной области отсутствуют данные по многим параметрам (в предыдущей задаче оно также не участвовало в обучении).

По результатам вычислений были выделены кластеры – собственные и квазисобственные области каждого землетрясения, а затем названные области, относящиеся к одному и тому же интервалу магнитуд, были на карте показаны общим условным знаком. Особо была выделена собственная область Красноводского землетрясения (1895 г.) – единственного известного на исследуемой территории с $M > 8,0$. Карта кластеров хорошо согласуется с предыдущей (см. рис. 16), при этом обращает на себя внимание тот факт, что центральные части Туркмении по совокупности геолого-геофизических признаков больше тяготеют к областям известных сильных землетрясений, нежели слабых.

7. Северо-Тяньшаньский регион

На обширной площади этого региона впервые была опробована программа ПОИСК для целей сейсмического районирования в значениях балла I [Агапова, Хоменюк, Щукин, 1973]. Для этого же региона позднее были выполнены работы по оценке долговременной сейсмической опасности в значениях близости к землетрясениям 16–18 энергетических классов с использованием в качестве эталонных областей круговых зон ответственности по Ю.В. Ризниченко [Хоменюк и др., 1978; Ризниченко, 1974].

В настоящем разделе в табл. 25 приводятся результаты комплексной обработки тех же исходных геолого-геофизических параметров, что и в названных выше работах, но с учетом новых сейсмологических данных (уточненное положение эпицентров, сведения о новых землетрясениях) и использованием усовершенствованной методики отбора опорных (эталонных) точек и обработки исходной информации.

На территории Северо-Тяньшаньского региона была впервые успешно применена методика построения результативной карты непосредственно в значениях исходного классифицирующего признака – магнитуды.

Для решений этой задачи в качестве эталонных были взяты сильнейшие землетрясения Северного Тянь-Шаня: Беловодское ($M = 6,9$), Верненское ($M = 7,3$), Чиликское ($M = 8,4$), Кеминское ($M = 8,2$), Кемино-Чуйское ($M = 6,9$) и Сарыкамышское ($M = 6,8$), а также сильнейшее в Прибалхашской части региона, условно названное нами Илийским, землетрясение (1888 г.) с $M = 6,1$.

Таблица 25

метров для Северо-Тяньшаньского региона

Номер в исходном массиве	Условное обозначение	Оценки	Название и единица измерения параметра	Дефект параметра	Информативность в битах	Класс А	
						Средние	Изменчивость
3	h_p	0,99	Высота рельефа над поверхностью, км	0	0,78	2,74	0,99
4	H_f	2,79	Глубина поверхности фундамента, км	0	0,22	1,97	2,79
5	H_M	2,71	Глубина поверхности Мохоровичича, км	0	0,66	-50,88	2,71
6	Δg_B	13,60	Аномалии силы тяжести в редукторе, мГал	0	0,36	-	13,60
7	$\Delta g_{из}$	20,51	Аномалии силы тяжести в изостатической редукции, мГал	0	0,67	-4,10	20,51
8	$\Delta g_{гл}$	187,74	Магнитные аномалии, мГал	0	0,12	15,59	187,74
9	ΔT_a	44,29	Аномалии магнитного поля, мЭ	0	0,82	-194,56	44,29
10	N_a	2,42	Амплитуды годовых движений, км	0	0,30	2,11	2,42
11	δT	3,91	Изменение от него вековараций геомагнитного поля, гаусс	0	0,48	-39,63	3,91
12	$\sigma(\delta T)$	48,00	Дисперсия δT , гаусс	0	0,53	93,89	48,00
	Коэффициент корреляции	0,997	Корреляция комплекса параметров				

Класс А был образован из точек, совпадающих с эпицентрами и ближайшими к ним центрами сетки Северо-Тяньшаньских землетрясений, в том числе точки Илийского землетрясения как атипичные, а также узлы координатной сетки из практически всех областей Балхашской впадины.

На перфокарной ленте каждой опорной точки, кроме номера эпицентра (номеров строки и столбца), были также набраны номера землетрясения. Это позволило получить в результате машинной обработки данные для построения карты в изолиниях магнитуд (рис. 18). На карте видно, что вся юго-восточная часть рассматриваемого региона попадает в области вероятных значений M от 5 и выше. Область

Средние	Изменчивость	Корреляция с классифицирующим признаком	Коэффициент детерминации	Остаточная дисперсия	Индекс независимости	Информативность в комплексе
0	0,32	0,93	0,86	0,14	0	0
0	0,03	0,54	0,29	0,71	0,03	0,01
-45,00	1,59	-0,87	0,76	0,24	0,02	0,01
-	7,06	0,67	0,46	0,54	0,06	0,03
53,00	23,44	-0,88	0,78	0,22	0,06	0,05
136,00	204,08	-0,40	0,16	0,84	0,27	0,04
-50,05	5,14	-0,95	0,90	0,10	0	0
0,01	0,19	0,62	0,38	0,62	0	0
-34,10	2,20	-0,77	0,59	0,41	0,04	0,02
22,50	7,43	0,80	0,64	0,36	0,03	0,02

ная ошибка определения координат эпицентров этих землетрясений велика, поэтому положение областей с $M \geq 8$ может существенно измениться в случае уточнения координат. Две области с $M \geq 7,0$ включают области максимальных значений магнитуды, еще три включают эпицентры Беловодского, Кемино-Чуйского и Сарыкамышского землетрясений. Беловодская зона вытянута в сторону г. Фрунзе, Кемино-Чуйская — в сторону оз. Иссык-Куль, Сарыкамышская, гораздо меньшая по площади, имеет овальную форму с эпицентром в середине.

Рис. 18. Карта в изолиниях возможных магнитуд землетрясений Северо-Тяньшаньского региона

Эпицентры землетрясений: 1 — $M \geq 8,0$; 2 — $M \geq 7,0$; 3 — $M \geq 6,0$; 4 — $M \geq 5,0$; 5 — изолинии магнитуд; 6 — эпицентры эталонных землетрясений

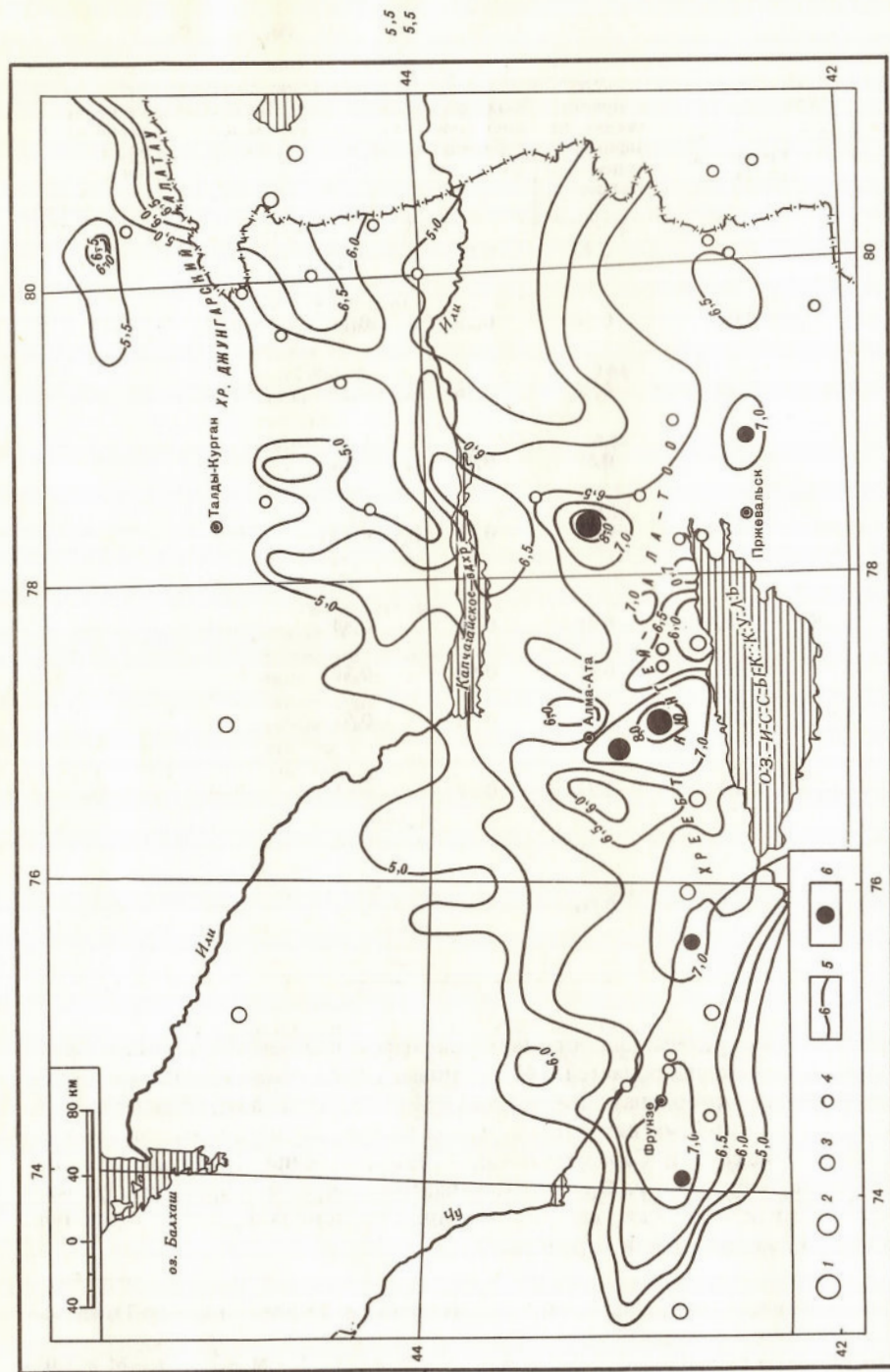


Рис. 18

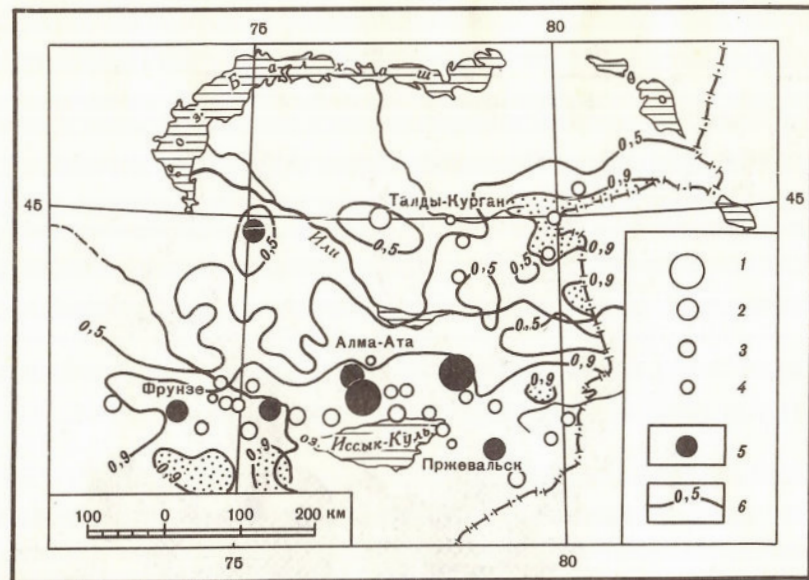


Рис. 19. Карта оценки долговременной сейсмической опасности Северо-Тяньшаньского региона в изолиниях адекватности

1-4 — усл. обозначения см. на рис. 18; 5 — эпицентры эталонных землетрясений; 6 — изолинии адекватности землетрясениям с $M \geq 5,0$

Расположение областей с меньшими значениями магнитуд хорошо видно на карте. Обращают на себя внимание области с $M > 6$ (до 6,5) к юго-востоку от Талды-Кургана, в районе Джунгарского Алатау, на крайнем юго-востоке региона. В то же время в окрестностях эпицентра Илийского землетрясения вообще отсутствуют повышенные значения магнитуд. Обусловлено это тем, что, как уже говорилось, его опорные точки не входили в класс А как атипичные и по логике программы ПОИСК не дали повышенных значений магнитуды в той части исследуемой территории, которую они представляют.

В подобной ситуации, когда тектоническая обстановка в зонах эталонных землетрясений существенно неоднородна и в одной из таких зон сильные землетрясения редки, дополнительную информацию могут дать карта в изолиниях адекватности (рис. 19) и карта кластеров (рис. 20). На обеих картах, кроме высокосейсмичной юго-восточной части, четко выделяются две области на севере: одна соответствует эталонному Илийскому землетрясению, другая является прогнозной — в этой зоне находится эпицентр Баканасского землетрясения с $M = 6,1$, произошедшего в 1979 г. после

Рис. 20. Карта районирования Северо-Тяньшаньского региона по результатам кластерного анализа

1-4 — усл. обозначения см. на рис. 18; 5 — эталонные эпицентры; собственные и квазисобственные области землетрясений: 6 — Беловодского, 7 — Кемино-Чуйского, 8 — Верненского, 9 — Чиликского, 10 — Кеминского, 11 — Илийского

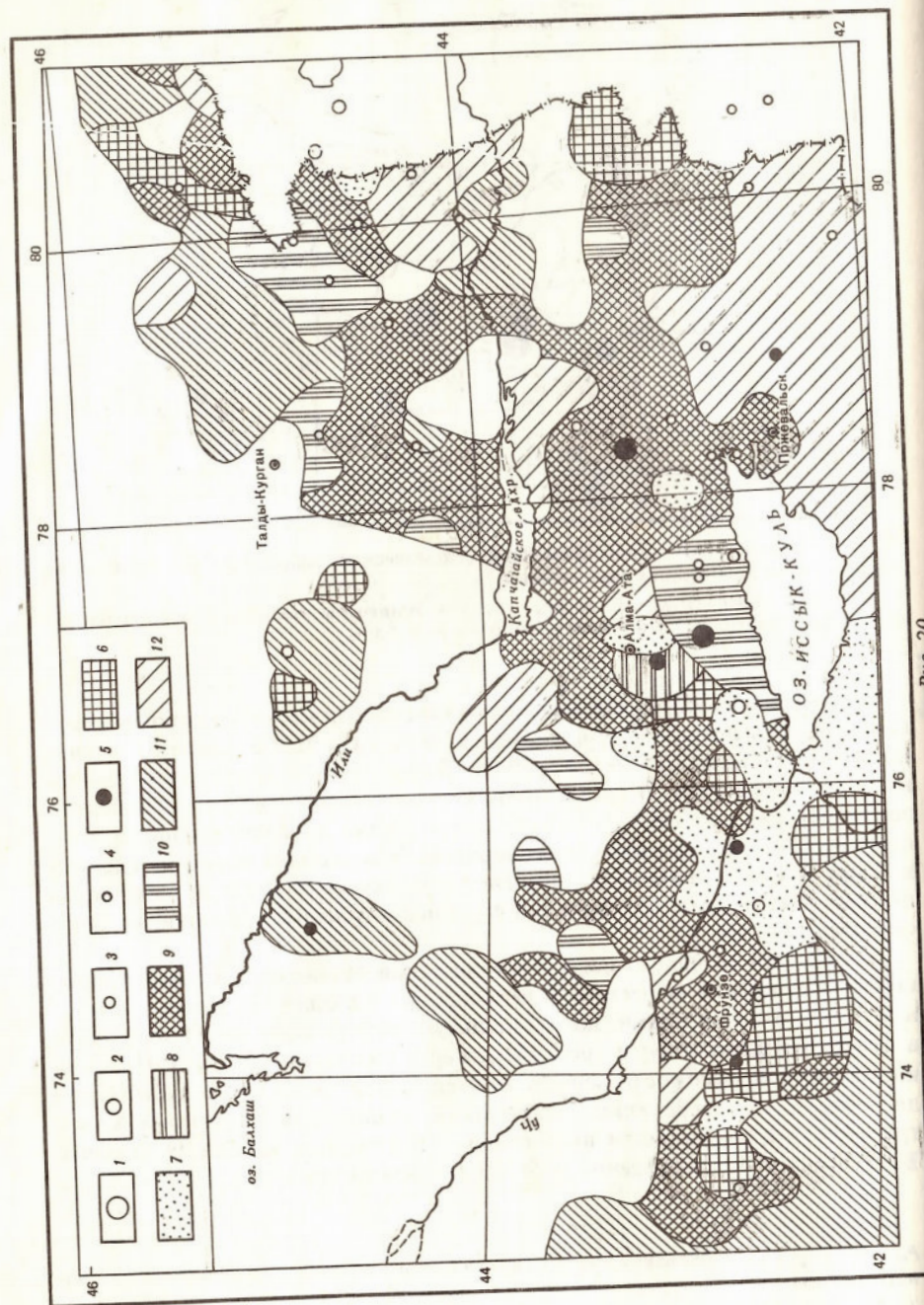


Рис. 20

Таблица 26

Результаты корреляционного анализа для эталонных сейсмических объектов Северо-Тяньшаньского региона
Корреляционная матрица класса А

Параметр	h_p	H_Φ	H_M	Δg_B	$\Delta g_{из}$	$\Delta g_{гл}$	ΔT_a	N_a	δT	$\sigma(\delta T)$
h_p	1,00									
H_Φ	0,68	1,00								
H_M	-0,44	-0,19	1,00							
Δg_B	0,56	0,70	-0,51	1,00						
$\Delta g_{из}$	-0,43	-0,44	0,90	-0,78	1,00					
$\Delta g_{гл}$	-0,07	-0,45	0,62	-0,69	0,85	1,00				
ΔT_a	-0,23	-0,22	0,90	-0,44	0,88	0,80	1,00			
N_a	0,83	0,88	-0,51	0,67	-0,62	-0,50	-0,52	1,00		
δT	-0,60	-0,54	0,85	-0,49	0,82	0,64	0,87	-0,81	1,00	
$\sigma(\delta T)$	0,31	0,05	-0,65	0,58	-0,65	-0,31	-0,36	0,10	-0,30	1,00

Таблица 27

Результаты корреляционного анализа для асейсмических объектов Северо-Тяньшаньского региона
Корреляционная матрица класса \bar{A}

Параметр	h_p	H_Φ	H_M	Δg_B	$\Delta g_{из}$	$\Delta g_{гл}$	ΔT_a	N_a	δT	$\sigma(\delta T)$
h_p	1,00									
H_Φ	0	1,00								
H_M	0	-0,21	1,00							
Δg_B	0	0,13	0,28	1,00						
$\Delta g_{из}$	0	0,04	0,68	0,37	1,00					
$\Delta g_{гл}$	0	-0,04	-0,55	-0,03	-0,46	1,00				
ΔT_a	0	-0,07	0,23	0,49	0,23	-0,19	1,00			
N_a	0	0,34	0,40	0,65	0,66	-0,15	0,27	1,00		
δT	0	0,15	-0,18	0,68	-0,08	0,08	0,20	0,28	1,00	
$\sigma(\delta T)$	0	0,11	-0,62	0,03	-0,51	0,12	0,09	-0,44	0,45	1,00

построения первых вариантов этих карт. Карта кластеров, кроме того, дает представление о делении всей исследуемой территории на более или менее обширные участки по их предпочтительному сходству с той или иной очаговой зоной. Например, собственная область Чиликского землетрясения очень велика. Это следует понимать так, что сходство этой области с очаговой зоной Чиликского землетрясения больше, чем с аналогичными областями других эталонных землетрясений. К прогнозной зоне Бакаевского

Таблица 28

Результаты корреляционного анализа для сейсмичных и асейсмичных объектов Северо-Тяньшаньского региона
Сводная корреляционная матрица

Параметр	h_p	H_Φ	H_M	Δg_B	$\Delta g_{из}$	$\Delta g_{гл}$	ΔT_a	N_a	δT	$\sigma(\delta T)$
h_p	1,00									
H_Φ	0,71	1,00								
H_M	-0,88	-0,55	1,00							
Δg_B	0,77	0,76	-0,73	1,00						
$\Delta g_{из}$	-0,87	-0,61	0,95	-0,75	1,00					
$\Delta g_{гл}$	-0,39	-0,48	0,47	-0,60	0,47	1,00				
ΔT_a	-0,91	-0,57	0,96	-0,73	0,93	0,55	1,00			
N_a	0,81	0,92	-0,71	0,78	-0,70	-0,52	-0,71	1,00		
δT	-0,84	-0,68	0,88	-0,66	0,83	0,58	0,89	-0,84	1,00	
$\sigma(\delta T)$	0,81	0,46	-0,88	0,78	-0,85	-0,44	-0,83	0,54	-0,71	1,00

землетрясения примыкают небольшие по площади квазисобственные области Беловодского землетрясения, а на карте кластеров, построенной без участия в обучении Илийского землетрясения (она не приводится), на его месте вырисовывается квазисобственная область также Беловодского землетрясения. Это говорит о наличии общих элементов в структуре очаговых зон трех землетрясений: Беловодского, Илийского и Баканасского.

В заключение этого раздела еще раз отметим полезность и необходимость совместного рассмотрения различных результативных карт для получения более полной картины изучаемого явления.

Статистические характеристики комплекса использованных параметров приведены в табл. 25–28. Большинство параметров имеют высокую информативность, среди них особо выделяются рельеф дневной поверхности, изостатические и магнитные аномалии, а также глубина поверхности Моховича.

8. Регион Байкало-Амурской железнодорожной магистрали (БАМ)

Оценка сейсмической опасности региона БАМа относится к числу таких задач, когда территория в качестве объекта исследования выделяется не на основании единства ее геологического строения или сейсмического режима, а лишь на основании единой народнохозяйственной задачи, решаемой на данной территории. Это определяет специфику решения подобных задач, состоящую в том, что в пределах всей исследуемой территории оказываются сейсмоактивные районы или участки совершенно различного генетического типа, а набор параметров, по которым осуществляется прогнозирование сейсмичности, не остается постоянным в пределах исследуемой территории.

В таких случаях для построения общей карты прогноза сейсмичности

исследуемую территорию следует разбить на отдельные участки, более или менее сейсмически и геологически однородные, и, построив для них отдельные карты с помощью описанных выше методик, составить затем сводную карту для всей территории.

Такой подход и был использован для получения оценки долговременной сейсмической опасности трассы БАМа и прилегающих территорий на заключительной стадии исследований с использованием исходных данных масштаба 1:1 000 000 и 1:2 500 000. Результаты обработки единого для СССР комплекса исходных данных масштаба 1:10 000 000 по региону БАМа приводятся в гл. V настоящей работы.

С самого начала обработка исходного материала проводилась отдельно для Западного и Восточного участков БАМа в силу их принадлежности к двум крупным принципиально различным тектоническим зонам: Байкальской рифтовой зоне на западном участке и Амуро-Зейской — на восточном. Для обоих участков была построена серия карт [Геофизические условия..., 1983; Исследования..., 1984].

На этапе составления сводной карты была выполнена повторная обработка материала западного участка БАМа с использованием усовершенствованной версии программы ПОИСК для приведения в соответствие качества обработки обоих участков трассы и смежных площадей.

Результаты самоопознавания опорных точек эталонных землетрясений Западного БАМа показали целесообразность построения отдельных карт по каждой из семи очаговых зон: землетрясений Муйского и Чина-Вакатского ($K = 18$), Средне-Байкальского, Чуруканского и Муяканского ($K = 16$) и Олекминской группы ($K = 16-17$). В силу чрезвычайно неравномерной изученности региона в целом, разной точности определения эпицентров, отсутствия в большинстве случаев данных об изосейстах землетрясений опорные точки для обучения ЭВМ брались по-прежнему в пределах круговых зон ответственности, учитывающих энергетический класс землетрясений [Ризниченко, 1979].

В целях лучшего согласования прогнозных карт, полученных для отдельных эталонных землетрясений и участков, при составлении сводной карты их предпочтительно строить не в изолиниях близости, а в изолиниях чебышевских оценок относительной вероятности. Это дает возможность выносить на сводную карту прогнозные области единого максимального вероятностного уровня, не перегружая ее деталями, которые при явно региональном характере сводной карты являются малообоснованными.

Карты в изолиниях чебышевских оценок для Западного участка БАМа приведены на рис. 21–25.

На восточном участке БАМа землетрясения с $K > 14$ по результатам самоопознавания опорных точек разделились на следующие группы: Олекминскую, Ларбинскую, Зеинскую, Баджалскую и Приморскую. Для каждой из этих групп также были построены карты оценки сейсмической опасности в изолиниях чебышевских оценок, которые приводятся на рис. 26–30. Подробное описание этих карт дано в [Исследование..., 1984].

Сводная карта оценки сейсмической опасности всей трассы БАМа и прилегающих территорий была построена следующим образом: области $P > 0,9$ со всех карт были перенесены на одну основу, относящиеся к землетрясениям одного энергетического диапазона объединены и показаны своим условным знаком (рис. 31)

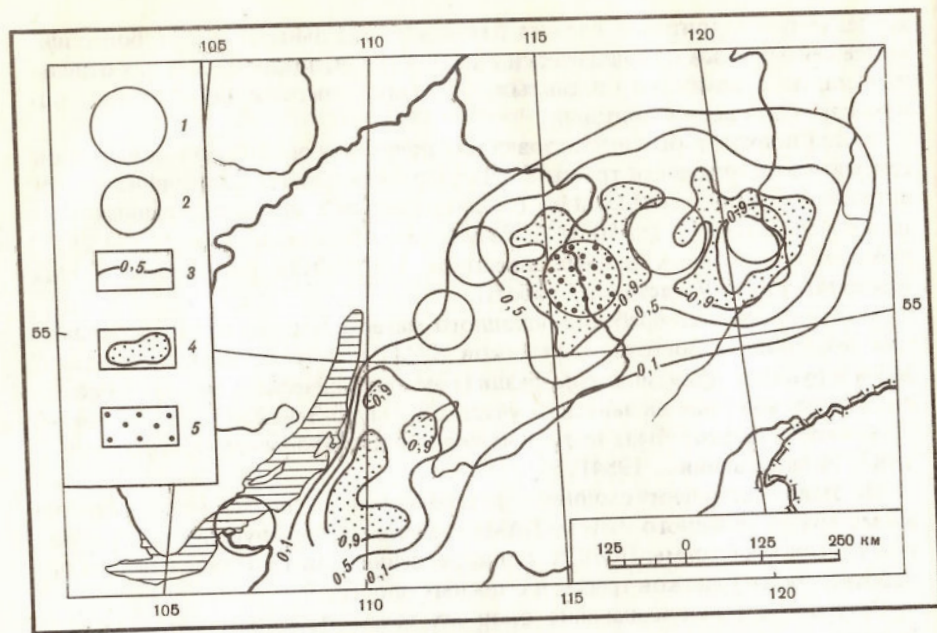


Рис. 21

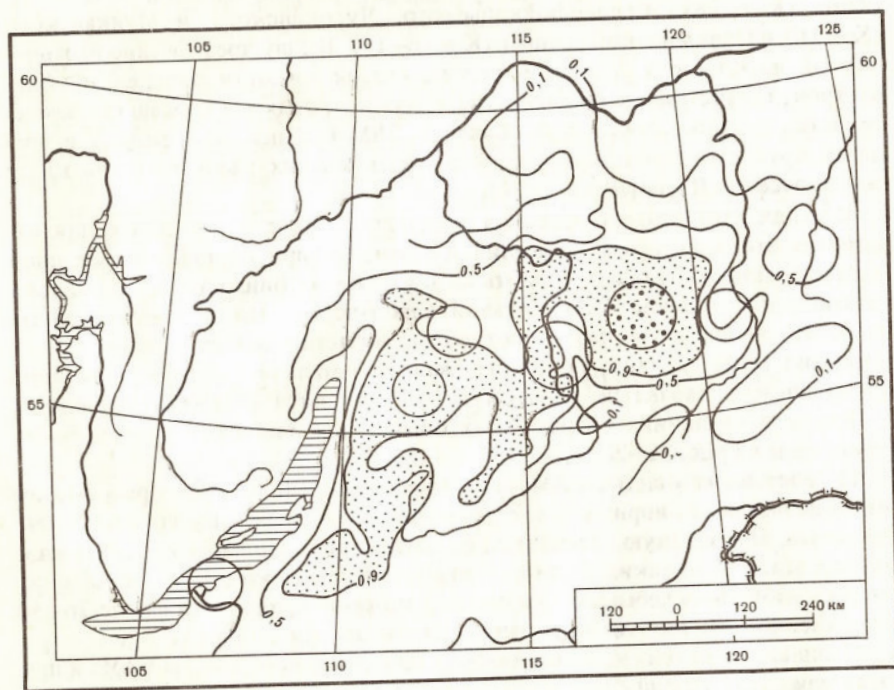


Рис. 22

Рис. 21. Карта чебышевских оценок относительной вероятности P землетрясений Муйского типа

Эпицентры землетрясений: 1 – $K = 18$, 2 – $K = 16-17$, 3 – изолинии чебышевских оценок, 4 – области $P > 0,9$, 5 – опорные точки

Рис. 22. Карта чебышевских оценок относительной вероятности землетрясений Чина-Вакатского типа. Усл. обозначения см. на рис. 21

Полученная на основе обработки комплекса геолого-геофизических данных карта оценки долговременной сейсмичности вполне удовлетворительно согласуется в общих чертах с картой сейсмического районирования, судя по нанесенным на сводную карту областям различной балльности.

Ввиду явно недостаточной изученности сейсмического режима региона трассы БАМа и прилегающих к нему территорий мы не сочли возможным выделить в пределах изучаемой площади асейсмичные участки, в связи с чем полный комплекс оценок параметров, предусмотренный программой ПОИСК, не был получен. В табл. 29 приводятся лишь средние значения используемых параметров в эталонных областях разных землетрясений и матрицы парных коэффициентов корреляции параметров в тех же областях.

С запада на восток, т.е. с убыванием интенсивности землетрясений, отчетливо наблюдается уменьшение высот древнего рельефа и отрицательных аномалий Буге. Среднеквадратичные отклонения σ этих же пара-

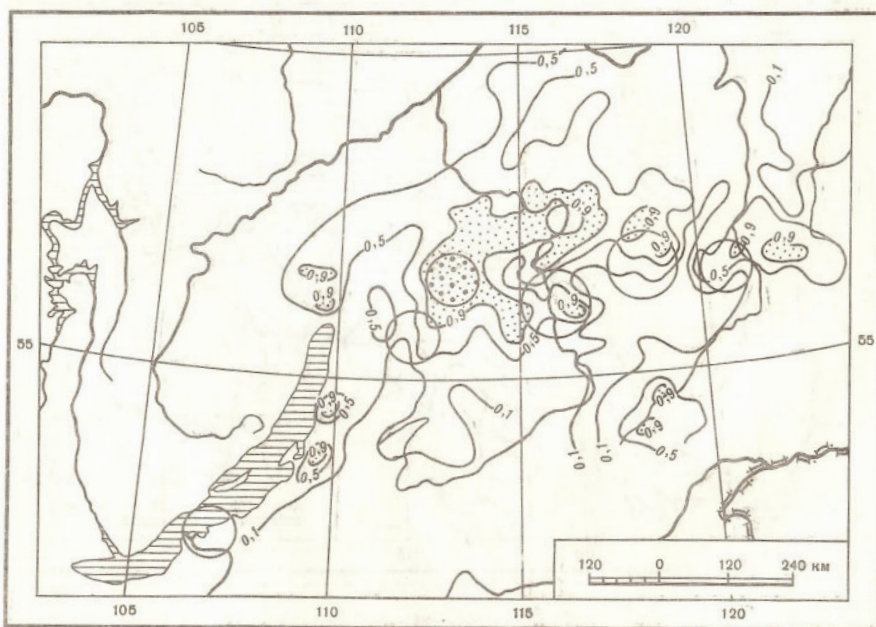


Рис. 23. Карта чебышевских оценок относительной вероятности землетрясений Олекминского типа (западный участок БАМа). Усл. обозначения см. на рис. 21

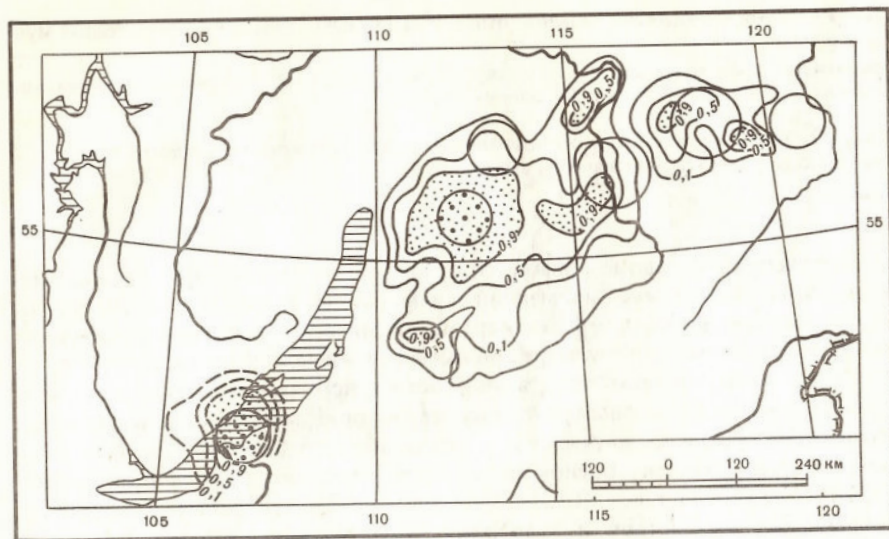


Рис. 24

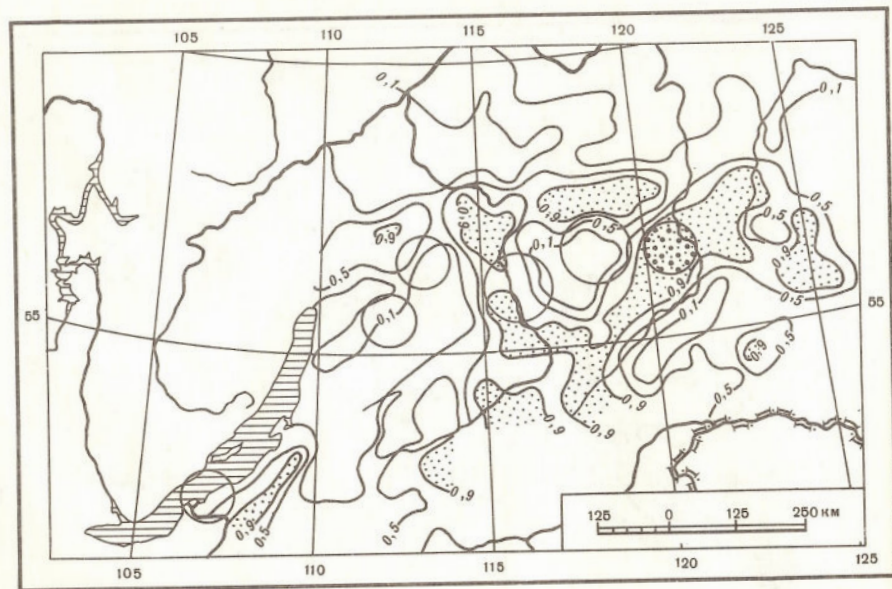


Рис. 25

Рис. 24. Карта чебышевских оценок относительной вероятности землетрясений Муяканского и Среднебайкальского типов. Усл. обозначения см. на рис. 21; пунктиром обозначены изолинии чебышевских оценок Среднебайкальского землетрясения

Рис. 25. Карта чебышевских оценок относительной вероятности землетрясений Чуроканского типа. Усл. обозначения см. на рис. 21

метров, фактически отражающие их изменчивость в пределах площади исходного осреднения, остаются на этом пространстве практически постоянными. В значениях магнитного поля и его изменчивости отчетливые тенденции не просматриваются.

Вычисленные коэффициенты парной корреляции дают некоторое представление о взаимосвязи и возможной взаимообусловленности различных (в данном случае немногочисленных) характеристик среды и изменении этих связей от района к району.

Немногочисленные достаточно тесные связи (0,5–0,8) между некоторыми параметрами наблюдаются в западной части трассы БАМа вплоть до Олёкминской зоны и практически исчезают в Ларбинской области.

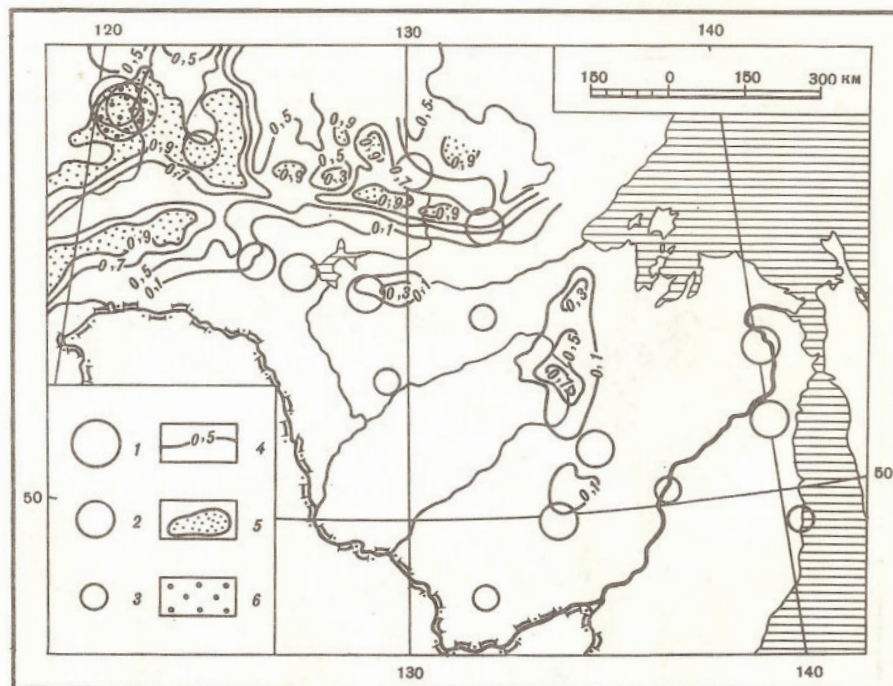


Рис. 26. Карта чебышевских оценок относительной вероятности землетрясений Олекминского типа (восточный участок БАМа)

Эпицентры землетрясений: 1 – $K = 16-17$; 2 – $K = 14-15$; 3 – $K = 13$; 4 – изолинии чебышевских оценок P ; 5 – области $P > 0,9$; 6 – опорные точки

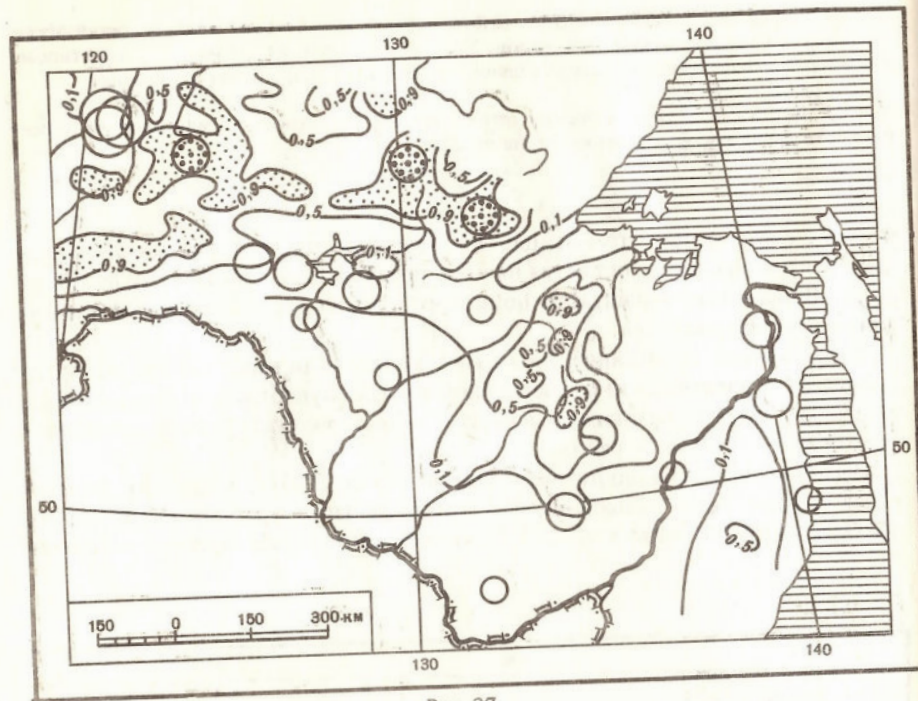


Рис. 27

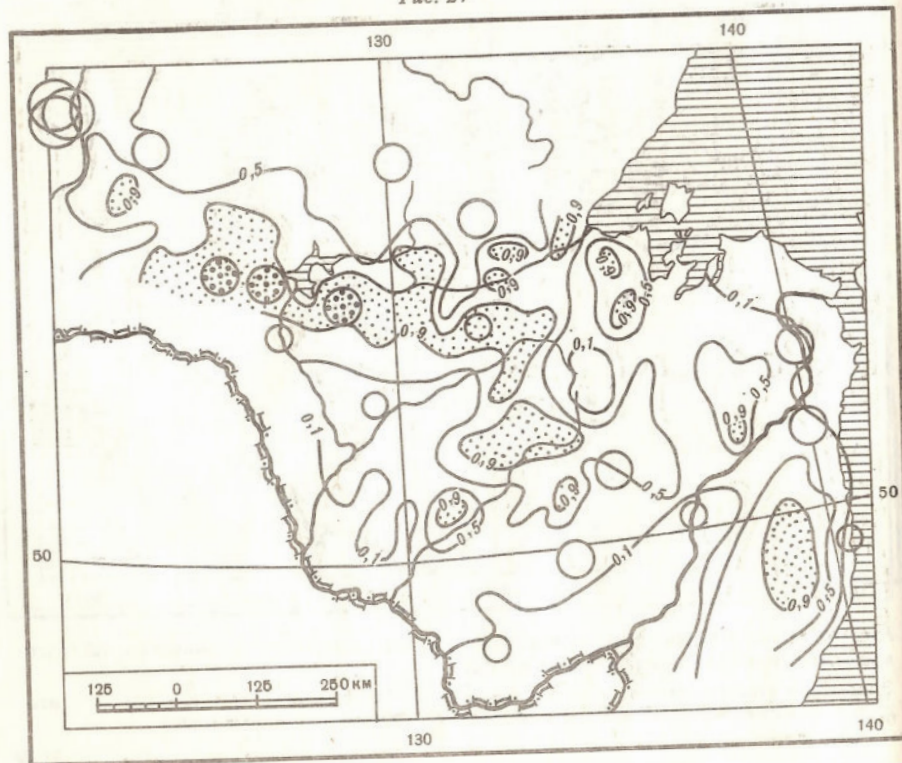


Рис. 27. Карта чебышевских оценок относительной вероятности землетрясений Ларбинского типа. Усл. обозначения см. на рис. 26

Рис. 28. Карта чебышевских оценок относительной вероятности Зеинского типа. Усл. обозначения см. на рис. 26

Наиболее тесные корреляционные связи между геофизическими параметрами наблюдаются в Баджалском и Приморском районах.

Детальные исследования были выполнены на Олекминском участке трассы БАМа. Детализация осуществлялась за счет привлечения дополнительных характеристик параметров, использовавшихся при региональном районировании. Изменчивость исходных значений параметров и их осредненные значения были подвергнуты обработке по Программе морфологического анализа двумерных полей методами дифференциальной геометрии (МОНЖ) [Хоменюк, Исаев, Максимов, 1980].

Эта программа позволяет определить в каждой точке двумерного поля шесть его основных морфологических характеристик: крутизну, кривизну, замкнутость, выпуклость, локальный сглаженный рельеф и его экспозицию. Программа МОНЖ используется как один из способов кодирования информации о структуре поля для дальнейших операций с программой ПОИСК.

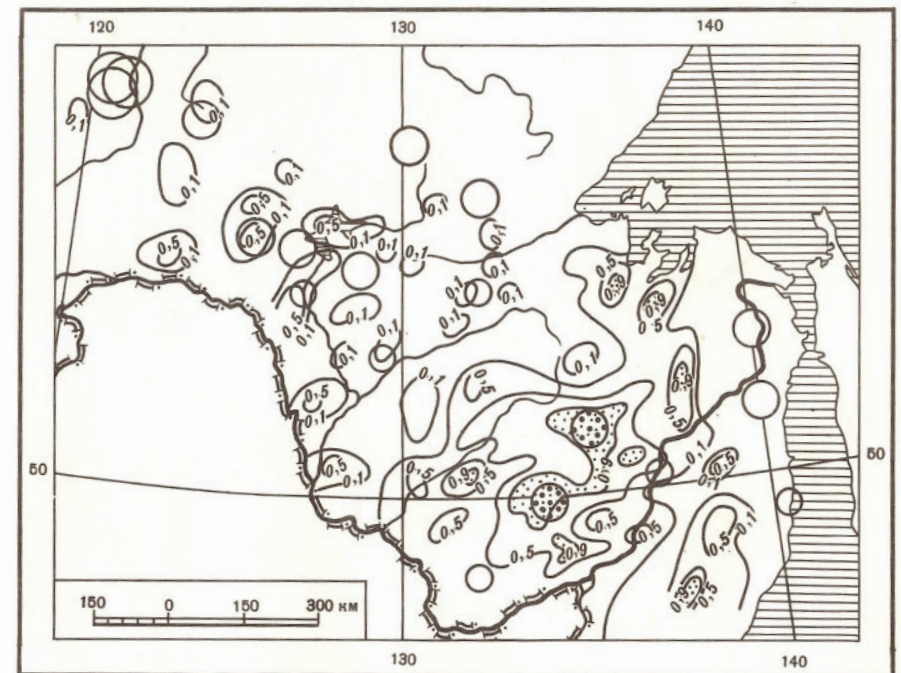


Рис. 29. Карта чебышевских оценок относительной вероятности землетрясений Баджалского типа. Усл. обозначения см. на рис. 26

Таблица 29

Средние значения параметров в сейсмоактивных эталонных областях трассы БАМа

Сейсмоактивные области	Параметры					
	h , км	σh , км	Δg_B , усл. ед.	$\sigma \Delta g_B$, мГал	ΔT_a , мЭ	$\sigma \Delta T_a$, мЭ
Муйская	1,05	0,35	-9,5	10,5	0,31	2,00
Чина-Вакатская	1,41	0,37	-10,9	11,0	0,87	2,86
Чуруканская	1,11	0,32	-11,2	15,2	0,88	1,15
Муяканская	1,31	0,39	-11,8	11,8	-0,29	1,06
Олекминская	1,07	0,34	-7,9	11,7	0,09	1,96
Ларбинская	1,12	0,28	-5,9	8,2	-0,39	2,76
Зеинская	0,60	0,16	-3,1	9,5	0,30	1,42
Баджальская	0,79	0,33	-2,9	9,3	1,24	0,71
Приморская	0,28	0,19	1,6	8,0	0,56	2,53

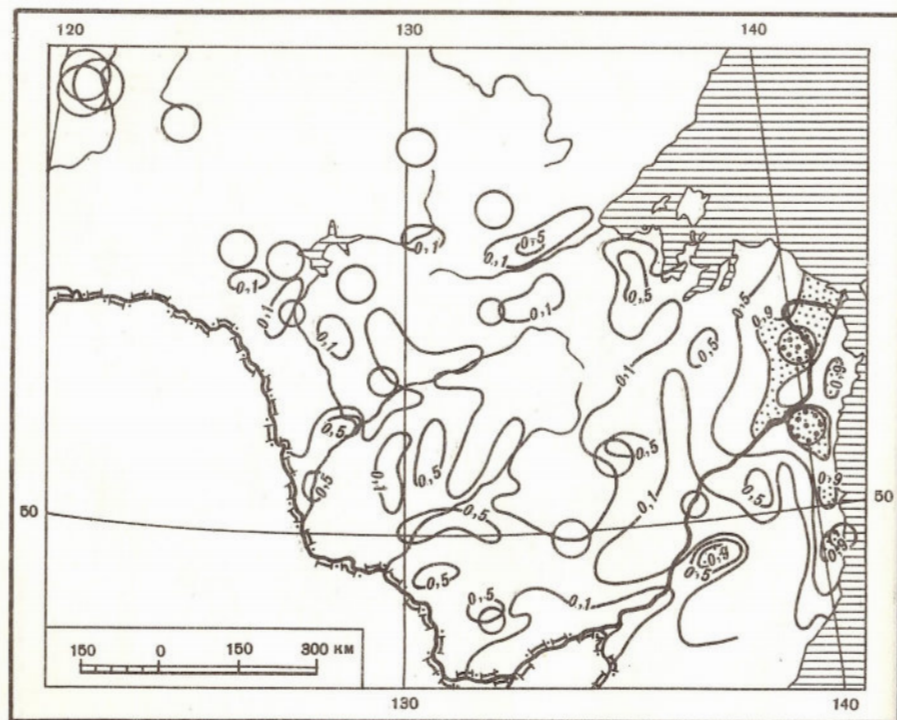


Рис. 30. Карта чебышевских оценок относительной вероятности землетрясений Приморского типа. Усл. обозначения см. на рис. 26

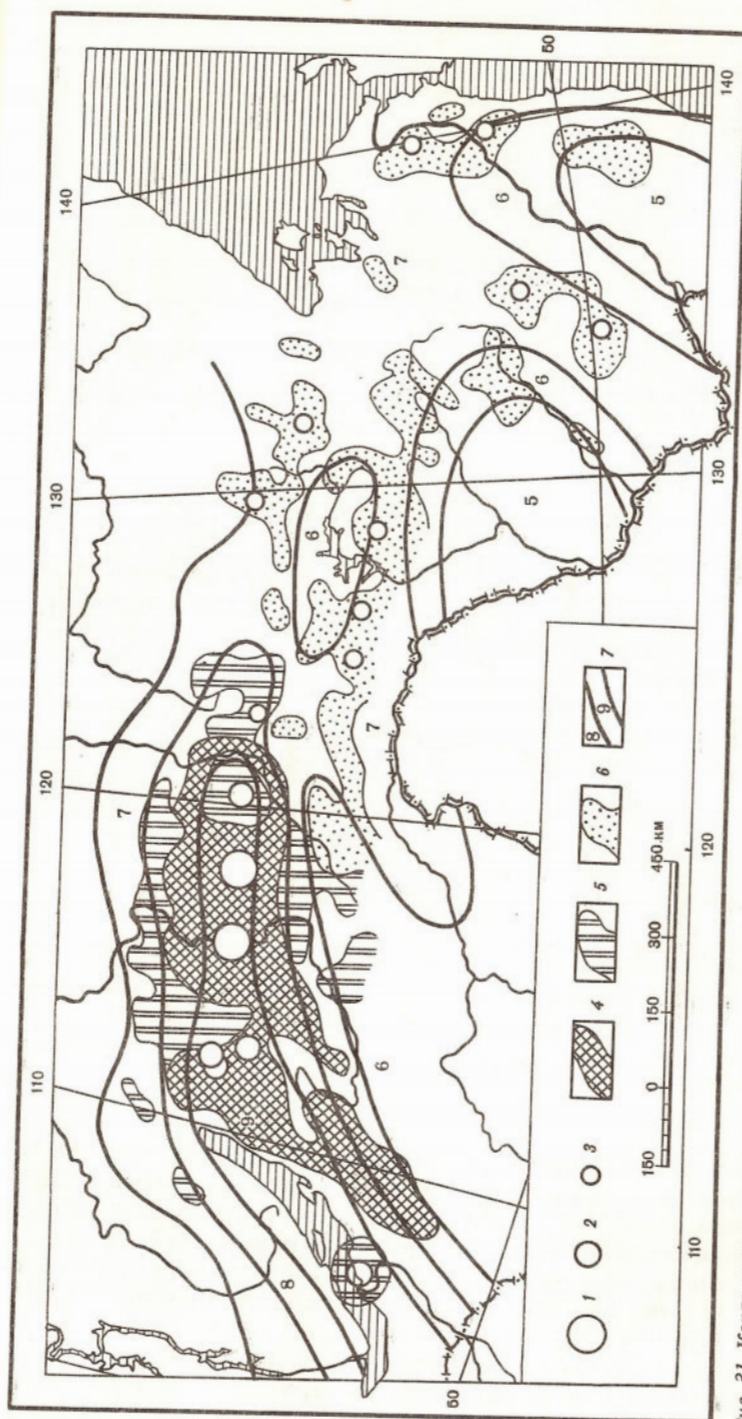


Рис. 31. Карта оценки долговременной сейсмической опасности региона Байкало-Амурской железной магистрали. Эпизотры землетрясений: 1 - К = 18; 2 - К = 16-17; 3 - К = 14-15; области $P > 0,9$: 4 - К = 18; 5 - К = 16-17; 6 - К = 14-15; 7 - границы областей разного сейсмического балла

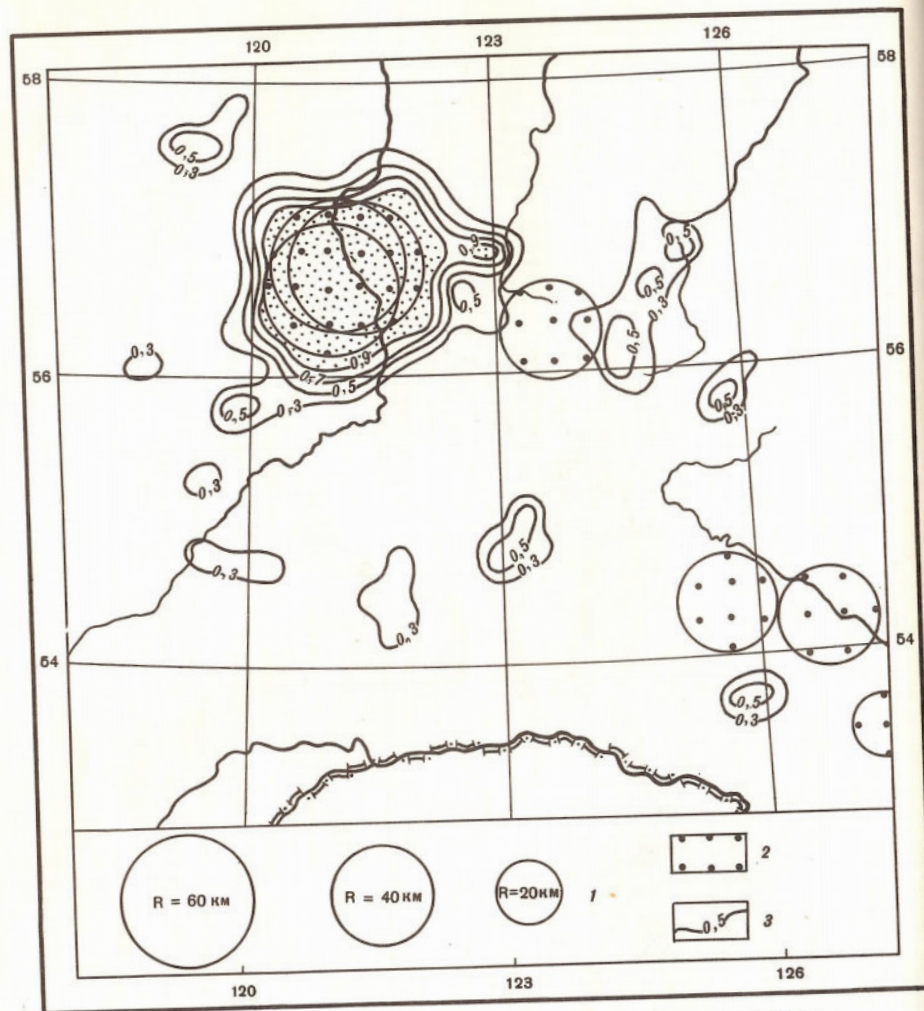


Рис. 32. Детальное районирование окрестностей Олекминской очаговой зоны
1 — круговые зоны ответственности; 2 — опорные (эталонные) точки; 3 — изолинии чебышевских оценок относительной вероятности

В качестве дополнительных характеристик, выдаваемых программой МОНЖ, для детальных исследований были использованы кривизна и крутизна осредненных значений полей и их изменчивости. Для каждого объекта исследования детального участка был сформирован набор из 21 параметра.

Опорные точки брались внутри круговых зон ответственности трех землетрясений Олекминской группы: Нюкжинского, Олекминского и Тас-Юрхского.

Результаты опознавания представлены на рис. 32 в виде карты в изолиниях чебышевских оценок относительной вероятности. Высокие значения вероятности (0,7–0,9) концентрируются вокруг опорных точек, лока-

лизуя и уточняя очертания очаговой зоны, что подтверждается совпадением изолиний вероятности с контурами изосейст. Изолинии 0,5–0,9 примерно повторяют рисунок изосейст 6-го балла Тас-Юрхского толчка.

За пределами очаговой зоны расположено несколько локальных максимумов со значениями $P = 0,3–0,5$: восточнее хребта Зверева (вблизи эпицентра Ларбинского землетрясения), в районе хребта Чернышева, в нижнем течении р. Чары и др.

Полученная картина распределения чебышевских оценок не противоречит результатам региональных построений и уточняет их, локализуя прогнозные участки.

9. Курило-Камчатский регион

На территории высокосейсмичного Курило-Камчатского региона известны 43 землетрясения с $M \geq 7,5$. Для оценки долговременной сейсмической опасности в этом регионе был использован комплекс из 10 параметров, которые перечислены в табл. 30. Значения этих параметров снимались с карт масштаба 1:2 500 000 в узлах сетки с ячейками $12' \times 12'$. В качестве опорных брались точки в узлах сетки, ближайших к эпицентрам упоминавшихся 43 землетрясений.

Наглядную картину прогноза сейсмичности для этого региона дает карта кластеров. Выявленные в результате кластерного анализа области преимущественного влияния очагов различных землетрясений были разбиты на три группы: собственные и квазисобственные области крупнейших мелкофокусных землетрясений с глубиной очага $h \leq 30$ км, собственные и квазисобственные области с глубиной очага $30 \text{ км} < h \leq 80$ км, а также аналогичные области глубокофокусных землетрясений с глубиной очага $h > 80$ км.

Полученная таким образом карта поочагового районирования Курило-

Таблица 30

Исходные геолого-геофизические данные Курило-Камчатского региона

Параметры	Условное обозначение
Аномалии магнитного поля	ΔT_a
Аномалии силы тяжести в редукции Буге	Δg_B
Размах аномалий силы тяжести в редукции Буге	$R(\Delta g_B)$
Абсолютная отметка поверхности Мохоровичича	H_M
Абсолютная отметка поверхности фундамента	H_Φ
Сглаженная высота рельефа твердой Земли	H_{cp}
Высота рельефа твердой Земли	h_p
Расчлененность рельефа	σh_p
Размах рельефа	$R(H)$
Сейсмическая активность	A_{10}

Таблица 31

Оценки параметров по Курило-Камчатскому региону

Параметр и его размерность	Информативность, бит	Класс А		Класс \bar{A}	
		среднее	изменчивость	среднее	изменчивость
ΔT_a , гамм	0,02	10,76	2,64	0,26	1,17
Δg_B , мГал	0,04	11,77	9,10	11,95	7,82
$R(\Delta g_B)$, мГал	0,13	21,62	27,95	7,95	7,88
H_M , км	0,09	-23,00	7,48	21,10	8,09
H_F , км	0,07	-5,37	3,39	4,19	2,48
H_{cp} , км	0	2,36	2,26	-1,63	1,30
h_p , км	0,05	-1,64	2,29	-1,49	1,45
$\sigma(h_p)$, км	0,33	1,64	1,52	0,23	0,47
$R(H)$, км	0,30	0,80	0,49	0,37	0,22
A_{10}	0,39	1,73	1,39	0	0

Камчатского региона (рис. 33) естественным образом и на основе обширной геолого-геофизической информации дополняет существующие представления о пространственном распределении его сейсмичности. Надежность такого районирования весьма велика и оценивается коэффициентом детерминации 0,955. Этот результат хорошо согласуется также с представлениями о том, что пространственное распределение сейсмичности и глубин очагов зарегистрированных землетрясений Курило-Камчатского региона прямо связано с геометрией Тихоокеанской и Евразийской литосферной плит в зоне их сочленения.

Из табл. 31 оценок параметров видно, что наиболее информативными являются различные характеристики рельефа твердой поверхности Земли, в меньшей степени — размах аномалий Буге.

10. Восточно-Европейская платформа

Регион исследований включает также районы Урала и Предуралья. Предпринимается впервые попытка дифференцировать слабоактивную территорию древней платформы по степени ее современной геодинамической активности, имея в виду картируемое свойство среды — сейсмичность. Кроме того, дать сравнительную характеристику (по комплексу геолого-геофизических признаков) регионов, связанных, на наш взгляд, в единую геодинамическую систему: Восточно-Европейской платформы и Альпийской зоны Юга СССР (Крым, Кавказ, Копетдаг).

Методы количественного анализа и численных преобразований те же, что были описаны выше для регионов Крыма и Туранской плиты. Комплекс используемых геолого-геофизических параметров описан в табл. 32. Объектами для обучения (эталоны), естественно для нашей задачи, слу-

Корреляция с сейсмичностью	С коэффициентом детерминации	Остаточная дисперсия	Индекс независимости	Информативность в комплексе
0,16	0,03	0,97	0,61	0,02
-0,01	0	0,95	0,32	0,02
0,43	0,18	0,82	0,48	0,08
0,17	0,03	0,88	0,03	0,01
0,27	0,07	0,91	0,10	0,01
-0,27	0,07	1,00	0,27	0
-0,05	0	0,94	0,26	0,03
0,67	0,04	0,58	0,20	0,07
0,63	0,40	0,69	0,26	0,08
0,78	0,61	0,51	0,27	0,16

жили очаги слабых землетрясений с $M > 3,0$ Восточно-Европейской платформы по И.В. Ананьину, а также [Новый каталог..., 1977]. -

Решение проводилось соответственно в двух вариантах с указанными выше эталонами разной выборки сейсмологических данных об очагах слабых землетрясений. Итоги решения задачи на ЭВМ показаны на схематических картах в изолиниях близости (меры сходства) к землетрясениям Восточно-Европейской платформы (рис. 35, $A = 63$, по И.В. Ананьину; рис. 34, $A = 83$, [Новый каталог..., 1977]).

Самоопознавание эталонов, предусмотренное программой, позволило выделить обособленные группы землетрясений Кольского полуострова, Среднего Урала и Предуралья. Степень сходства между землетрясениями в пределах остальной части Восточно-Европейской платформы выражена слабее и не позволяет выявить индивидуальные группы.

Кратко касаясь возможной интерпретации полученных карт (что, как правило, затруднительно не только в таких слабоконтрастных в современной тектонике областях, как платформа, но и орогенах), можно сказать, что узнаются различные, географически независимо подтверждаемые структурные направления СВ и СЗ-простираций. Последние создают региональную делимость среды Восточно-Европейской платформы. Предполагается, что эти структурные зоны, укладывающиеся в систему ортогональных и диагональных направлений, свидетельствуют об общей целостности, единстве платформы в течение всей геологической истории и неизменности регионального поля напряжений по крайней от раннего архея до современной эпохи включительно [Кратц и др., 1979]. Слабая сейсмичность, пространственно принадлежащая этим направлениям, подтверждает предположения об их современной активности. Как было показано в предыдущих разделах, причины ее могут иметь глубинный характер.

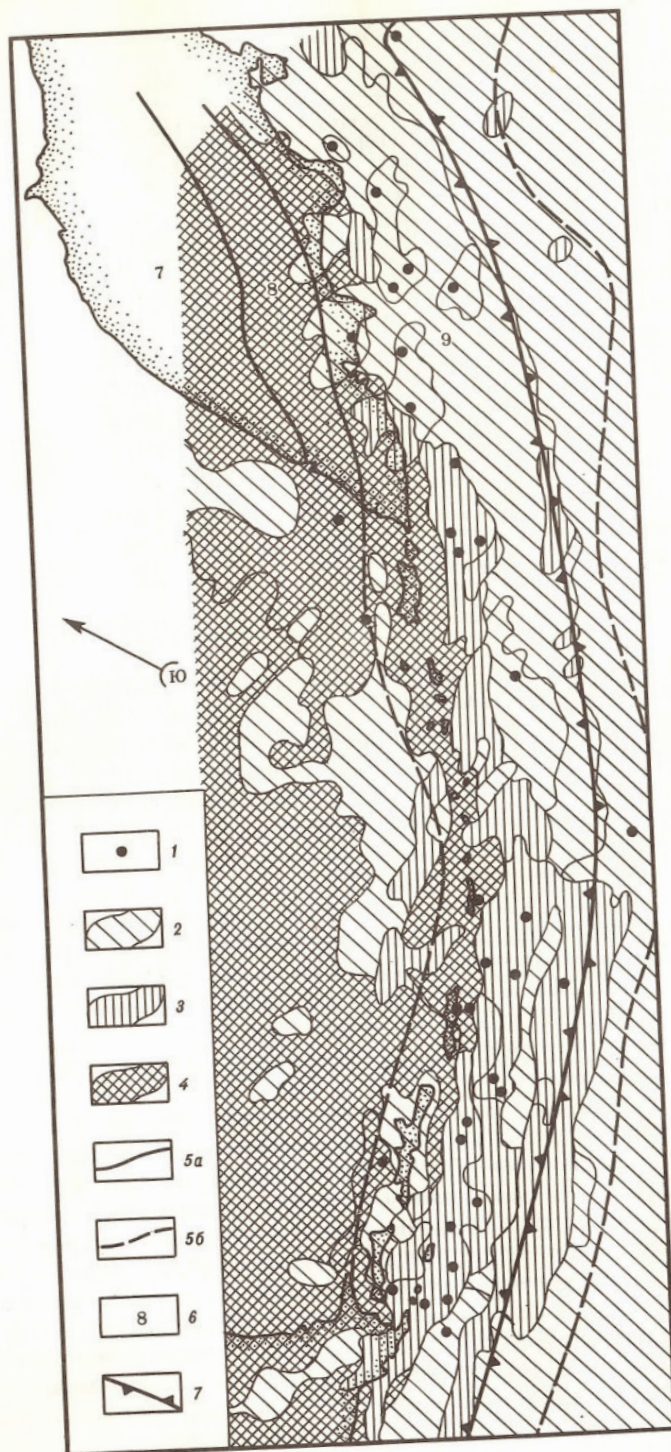


Таблица 32

Исходные геолого-геофизические данные

Наименование параметра	Условное обозначение
Аномалии магнитного поля	ΔT_a
Высота рельефа дневной поверхности	h_p
Глубина поверхности Мохоровичича (средняя мощность земной коры)	H_M
Блоковая делимость консолидированной коры (расчлененность земной коры)	$H_{M.f.}$
Плотностная дифференциация мантийно-коровых блоков	пл. диф.
Глубинные аномалии силы тяжести	$\Delta g_{гп}$
Петроплотностная характеристика геологических формаций	петропл.
Смешанная производная геопотенциала (широтный градиент от производной геопотенциала по долготе)	$T_{\varphi\lambda}$
Аномалии вертикального градиента силы притяжения	T_{RR}
Аномалии теплового потока	Q
Геотермический градиент	$\text{grad } Q$
Градиент скорости вертикальных новейших движений	$\text{grad } N_a$
Граничная скорость продольных сейсмических волн на поверхности Мохоровичича	V_{Γ}^M
Сейсмическая активность	A_{10}

Авторы рассматривают полученные результаты как комплексную геолого-геофизическую основу для задач сейсмического районирования слабо-активных регионов [Шукин, 1987]. Этапом выполненных исследований был статистический анализ связи высокосейсмичных регионов Юга СССР (Крым-Кавказ-Копетдаг) и Восточно-Европейской платформы. При этом эталонами класса А служили землетрясения с $M \geq 6,0$ активных регионов Юга СССР, альтернативным классом А — очаги слабых землетрясений Восточно-Европейской платформы с $M > 3,0$.

На карте в изолиниях близости к землетрясениям с $M \geq 6,0$ (рис. 43) в пределах платформы отчетливо проявилась узкая зона субмеридионального простираия. Этой зоне также принадлежит многие очаги слабых землетрясений этого региона. Не попав в эту зону, очаги землетрясений Кольского полуострова и Среднего Урала подтвердили тем самым свою индивидуальность. По всей вероятности, соответственно могут и различаться среды, их порождающие, в связи с чем используемый класс решаемых задач

Рис. 33. Поочаговое районирование Курило-Камчатского региона (по данным Г.П. Филипповой)

1 — эпицентры землетрясений; собственные и квазисобственные области; 2 — $h < 30$ км, 3 — $30 < h < 80$ км, 4 — $h > 80$ км; границы зон разной балльности: 5a — уверенные, 5b — неуверенные; 6 — величина балла; 7 — ось Курило-Камчатского жолоба

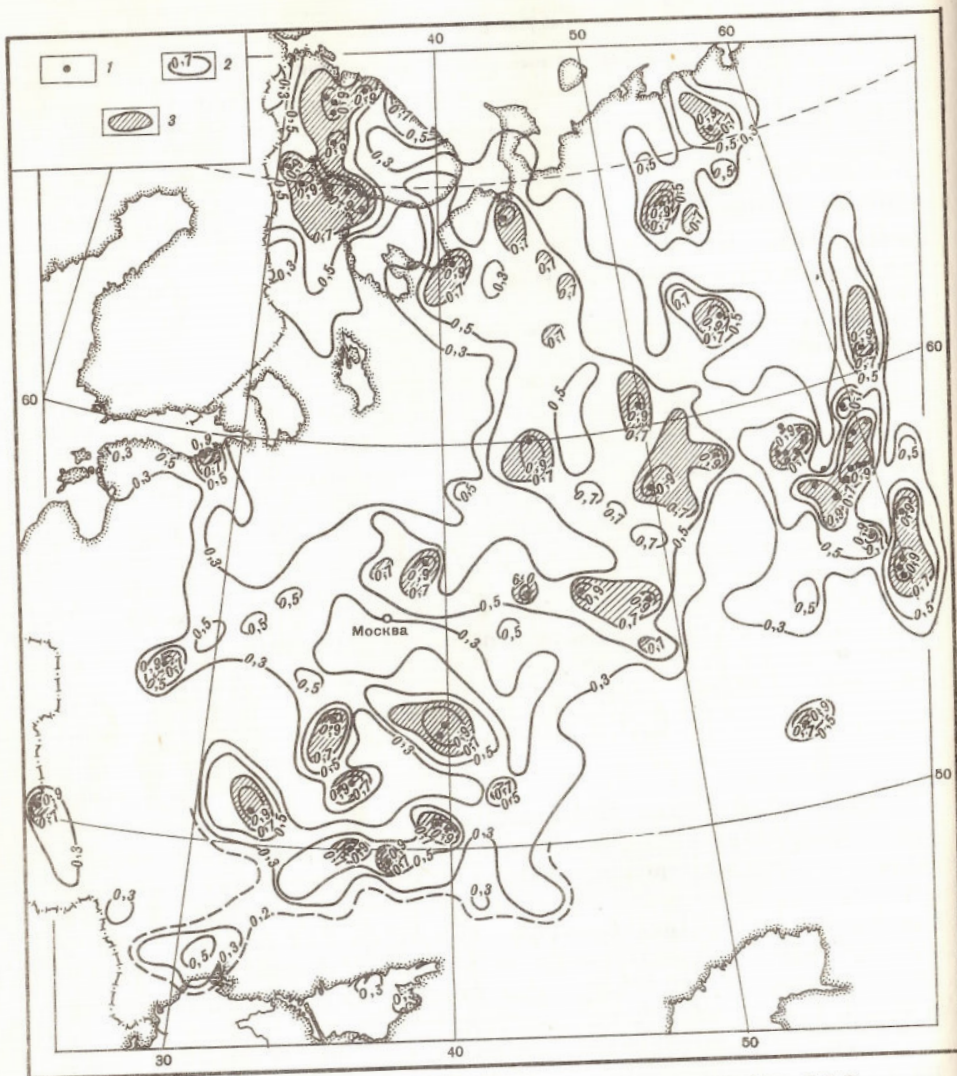


Рис. 34. Карта в изолиниях близости к слабым землетрясениям с $M > 3,0$ Восточно-Европейской платформы

1 — эпицентры землетрясений с $M > 3,0$; 2 — изолинии близости; 3 — области аномальных значений близости

может быть использован для дифференцирования регионов по совокупности структурных, вещественных и динамических признаков.

Таблица 33 показывает принципиальные отличия классов А и \bar{A} по геолого-геофизическим признакам. Кроме того, можно указать, какими отличительными (диагностическими) признаками характеризуются эпицентры (эталоны класса А) Восточно-Европейской платформы (смысл коэффициентов корреляции — см. пояснение к табл. 13).

Таковыми являются: тепловой поток, геотермический градиент, дели-

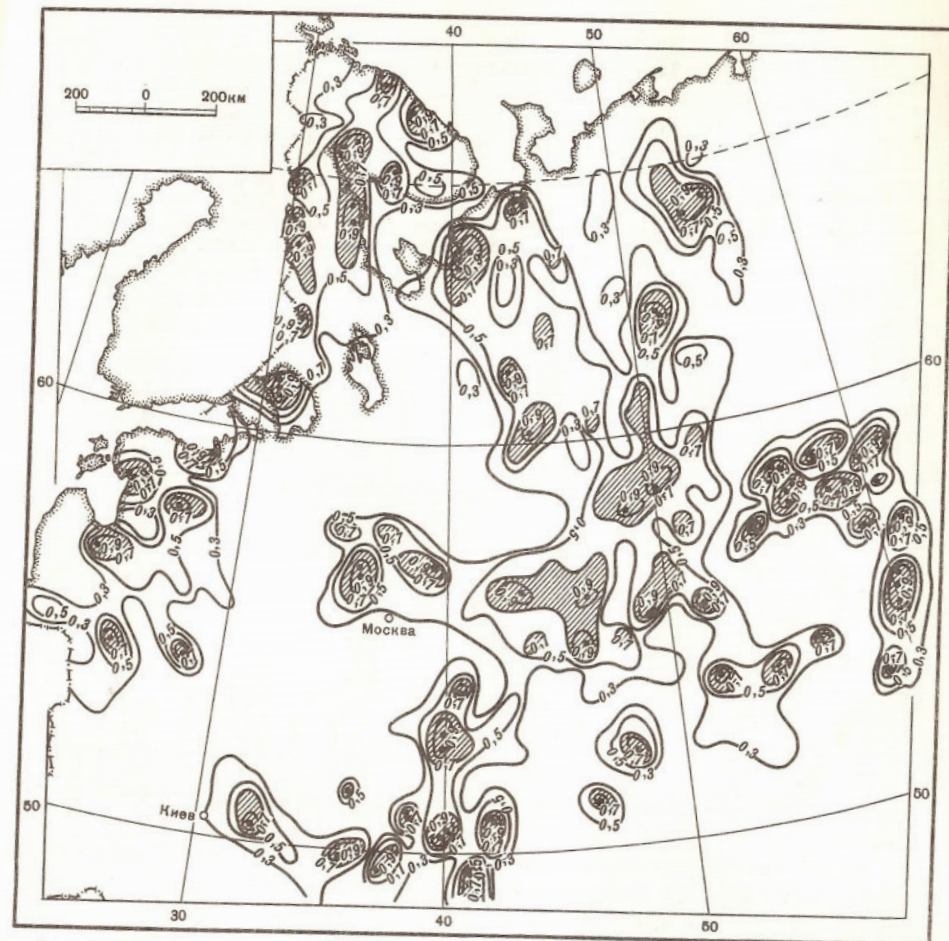


Рис. 35. Карта в изолиниях близости к слабым землетрясениям Восточно-Европейской платформы. Усл. обозначения см. на рис. 34

мость (раздробленность) консолидированной коры, петроплотностные неоднородности среды, вертикальный градиент поля силы тяжести (по спутниковым данным).

Рассматривая часть таблицы, иллюстрирующую сопоставление признаков сейсмичности высокоактивных регионов Юга СССР (землетрясения с $M \geq 6,0$, класс А) и слабоактивных регионов Восточно-Европейской платформы (землетрясения с $M > 3,0$, класс \bar{A}), можно видеть, что высокую информативность имеют параметры: тепловой поток, геотермический градиент, градиент вертикальных новейших движений, сейсмическая активность.

Слабосейсмичная среда Восточно-Европейской платформы отличается от высокосейсмичной среды западной части Средней Азии по следующим параметрам: плотностной дифференциации мантийно-коровых блоков; вертикальному градиенту поля силы тяжести (по спутниковым данным).

Таблица 33

Таблица коэффициентов корреляции

Параметры	Класс А – эпицентры Восточно-Европейской платформы; класс А – асейсмичная область в северном углу планшета	Класс А – эпицентры с $M \geq 6,0$ Крым-Кавказ-Копетдагского региона, класс А – эпицентры с $M \geq 3,0$ Восточно-Европейской платформы	Класс А – эпицентры с $M \geq 6,0$ Среднеазиатского региона; класс А – эпицентры с $M \geq 3,0$ Восточно-Европейской платформы
ΔT_a	-0,07	-0,11	-0,06
grad Q	-0,86	0,52	0,68
Q	-0,80	0,52	0,85
H_M	0,43	0,19	0,53
$H_{Mр}$	-0,73	0,22	0,32
пл. дифф.	0,51	0,28	-0,89
$\Delta g_{гл}$	-0,48	0,46	0,33
петроплотн.	0,73	-0,30	0,01
$T_{\varphi\lambda}$	-0,12	0,23	-0,08
T_{RR}	0,77	-0,08	-0,79
h_p	0,42	0,22	0,66
grad N_a	0,22	0,72	0,58
A_{10}	0,11	0,62	0,47
V_r^M	-0,28	-0,21	-0,44

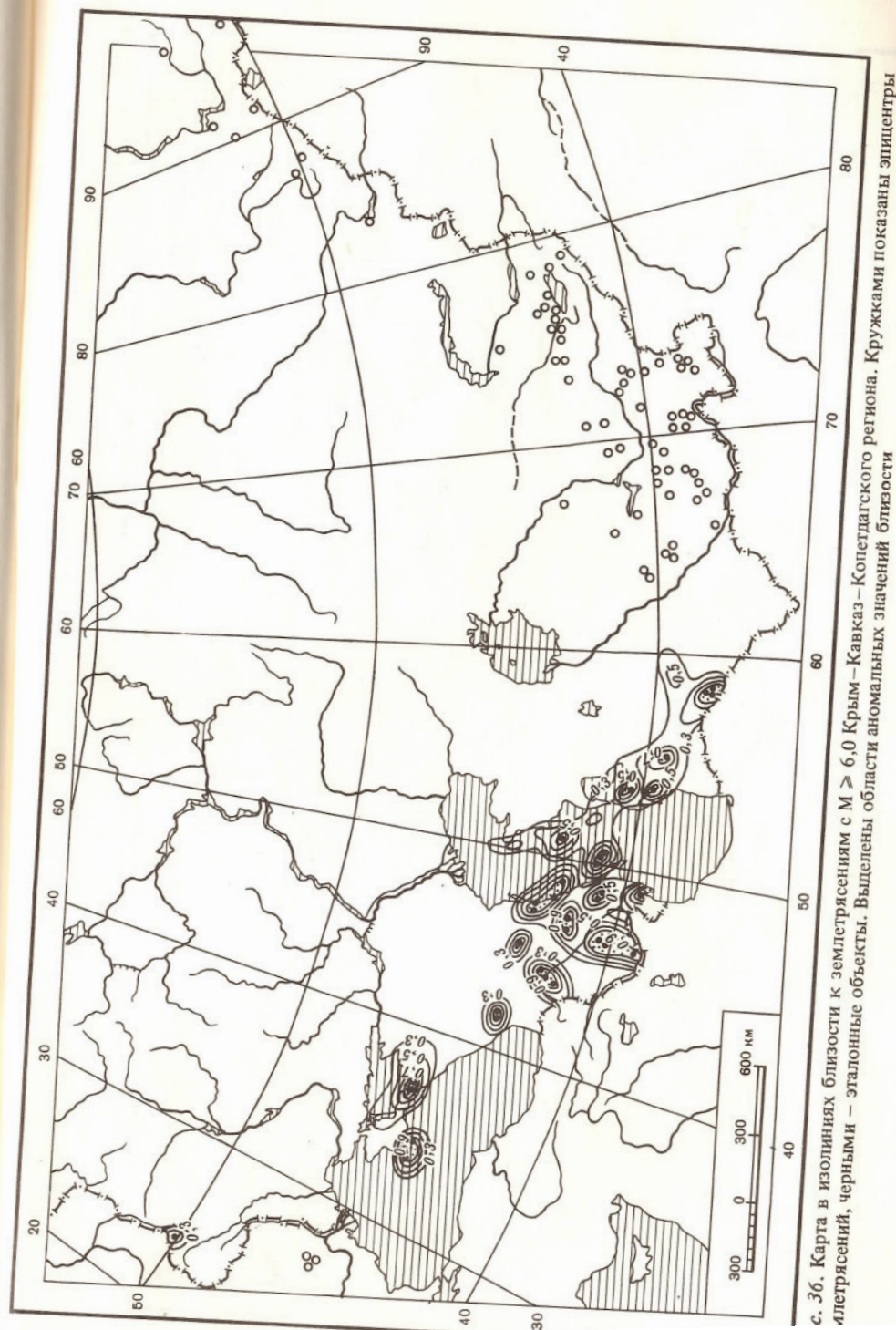
рельефа дневной поверхности; градиенту вертикальных новейших движений.

Ниже будут показаны возможности использования сравнительного анализа статистических моделей сейсмоактивных сред крупных регионов и территории СССР в целом.

Глава V

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ СЕЙСМИЧНЫХ РЕГИОНОВ С РАЗНЫМИ ГЕОДИНАМИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ

Возможность использования геолого-геофизической информации для долговременного прогнозирования сейсмической опасности в пределах различных регионов была показана выше, а также в работах [Результаты комплексных..., 1978; Геофизические условия..., 1983; Исследования земной коры..., 1984]. Однако до сих пор задача решалась для произвольно выбранного региона, характеризующегося квазиоднородными глубинными геологическими условиями сейсмичности. Ниже будут показаны результаты комплексного анализа информации для сейсмически активных регионов территории СССР. Получена серия карт в изолиниях близости и адекватности землетрясениям с магнитудой $M \geq 6,0$. Исследования проводились



с. 36. Карта в изолиниях близости к землетрясениям с $M \geq 6,0$ Крым-Кавказ-Копетдагского региона. Выделены области аномальных значений близости и адекватности, черными – эталонные объекты. Кругами показаны эпицентры

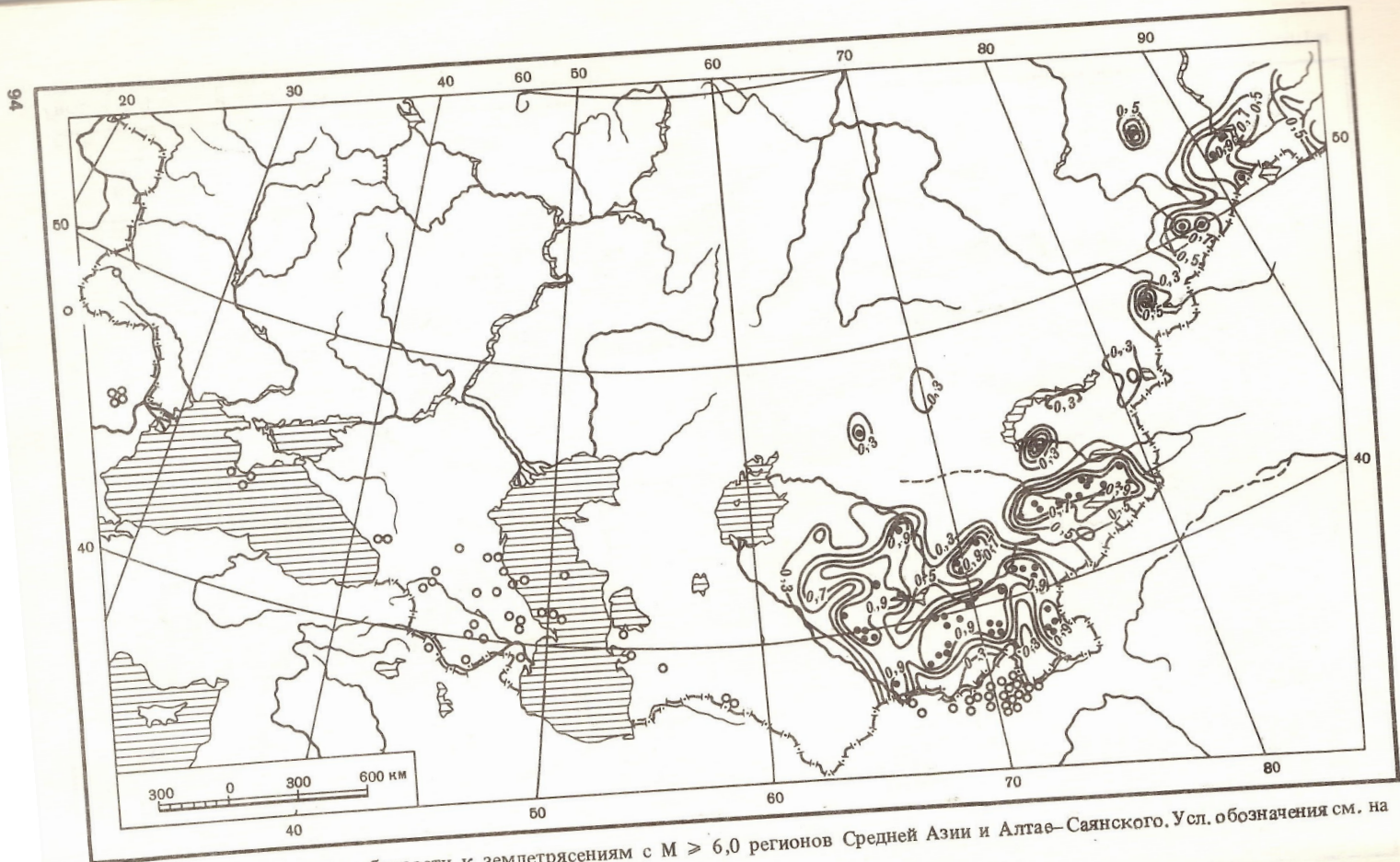
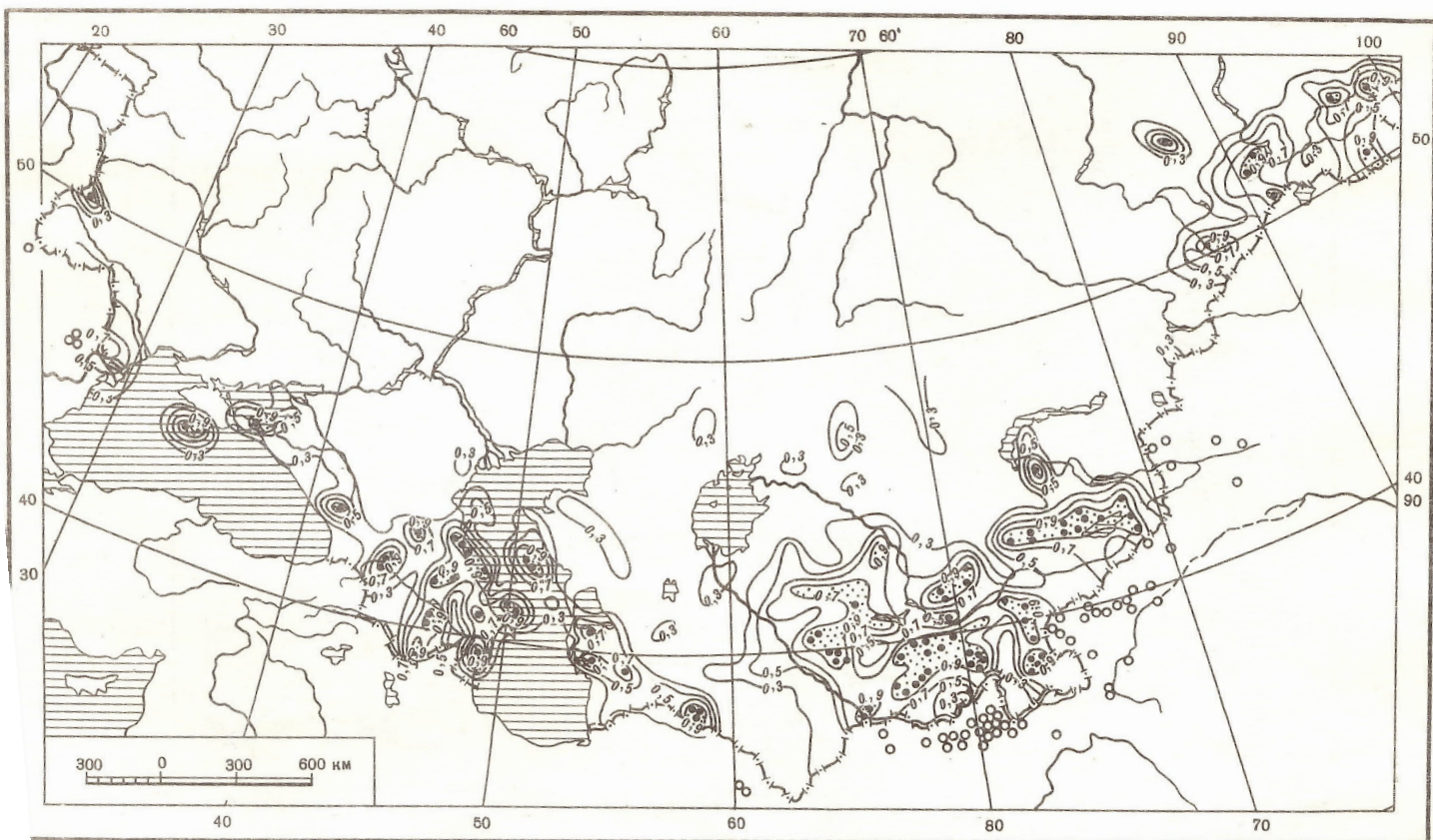


Рис. 37. Карта в изолиниях близости к землетрясениям с $M \geq 6,0$ регионов Средней Азии и Алтае-Саянского. Усл. обозначения см. на рис. 36



с. 38. Карта в изолиниях близости к землетрясениям с $M \geq 6,0$ регионов Крым-Кавказ-Копетдагского, Средней Азии и Алтае-Саянского. Усл. обозначения см. на рис. 36

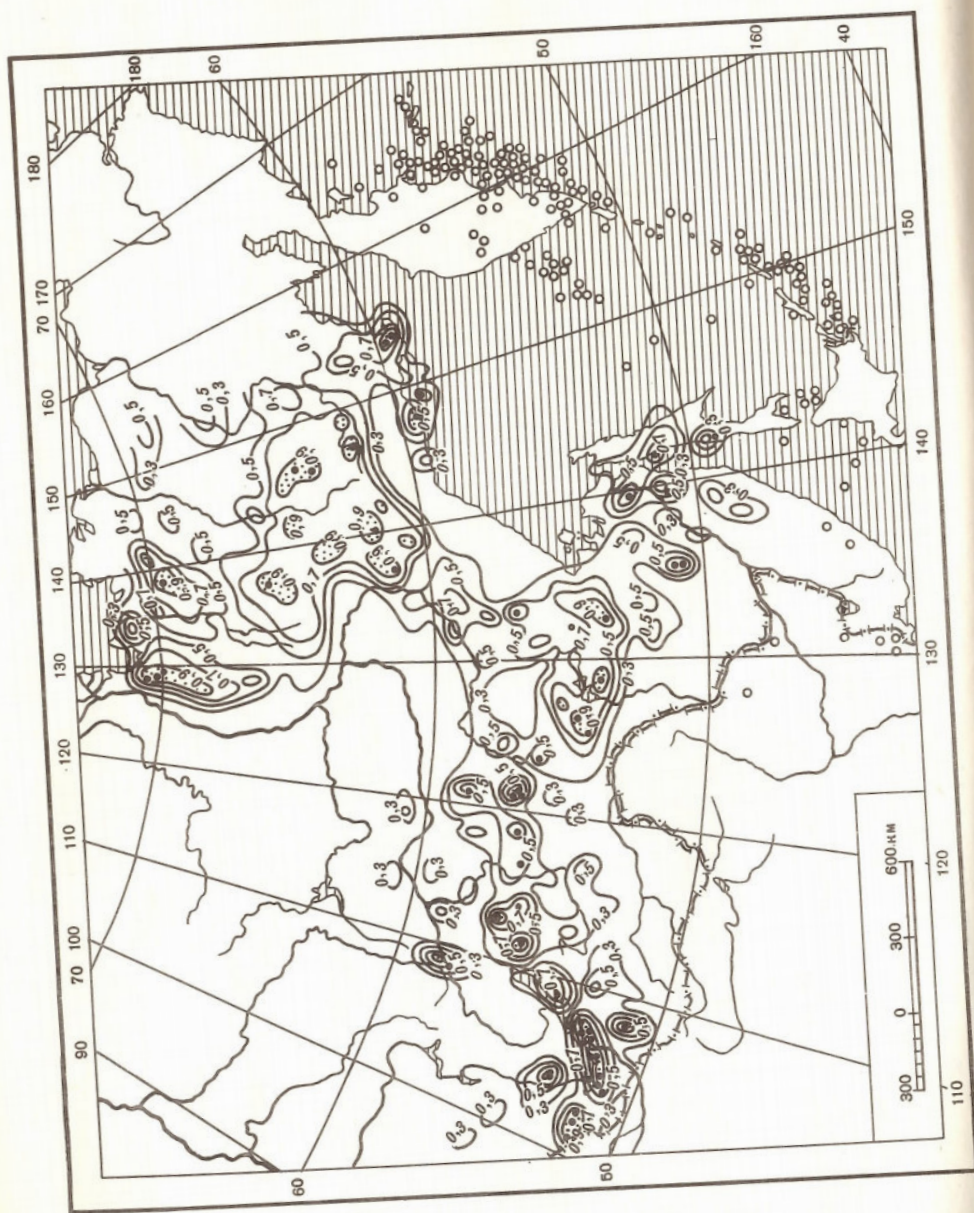


Рис. 41. Карта в изолиниях близости к землетрясениям с $M \geq 6,0$ Байкальского региона и Верхоянья. Усл. обозначения см. на рис. 36

в поисковых целях на однородном материале карт масштаба 1:10 000 000, содержащем следующие параметры (см. табл. 32).

Для обучения ЭВМ использовались сильные землетрясения с $M \geq 6,0$ по всему исследуемому региону Юга СССР [Новый каталог землетрясений..., 1977].

Исходя из опыта прежних работ, решение задачи начиналось с самоопознавания эталонных сейсмичных объектов класса А, которыми служили эпицентры землетрясений с $M \geq 6,0$. При этом осуществлялось сопоставление (сравнение) каждого эпицентра по комплексу признаков со всеми остальными в пределах каждого из выделенных нами регионов: Крым, Кавказ, Копетдаг, Средняя Азия и Алтай-Саяны, Сибирь (Байкальская и Прибайкальская зоны) и Дальний Восток, Камчатка и Курильские острова.

В результате самоопознавания намечились регионы, в пределах которых обнаружались тесные связи между эпицентрами землетрясений (однородные по комплексу признаков регионы), например Средняя Азия, и регионы (вероятно, более гетерогенные), где такие связи между эпицентрами (вернее сказать, очагами) менее тесные (Средняя Азия-Сибирь, если их рассматривать вместе).

Иными словами, возникает предположение об индивидуальности или же сходстве землетрясений и сред, которые их порождают.

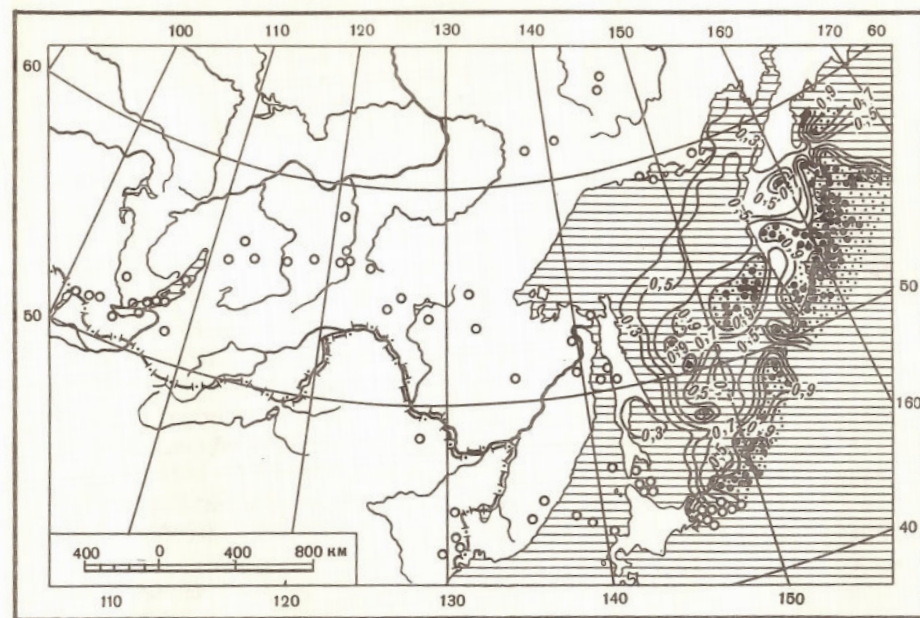


Рис. 42. Карта в изолиниях близости к землетрясениям с $M \geq 6,0$ Курило-Камчатского региона. Усл. обозначения см. на рис. 36

7. Зак. 872

Таблица 34

Сравнительный анализ эталонных сейсмичных групп с асейсмичными областями (коэффициенты корреляции)

Параметры	Класс А	Крым—Кавказ—Копетдаг		Средняя Азия—Алтай—Саяны		Сибирь—Дальний Восток	
	Класс А	Северный Кавказ	Весь регион	Сибирская платформа	Весь регион	Сибирская платформа	Весь регион
ΔT_a		-0,10	-0,22	-0,02	0,14	0,07	-0,04
h_p		0,24	0,02	0,48	0,60	-0,13	0,08
H_M		0,23	0,20	0,79	0,50	-0,31	-0,40
$H_{M.p.}$		0,34	0,01	0,36	0,05	-0,07	-0,16
пл. диффер.		-0,18	0,34	-0,75	-0,64	0,37	0,18
$\Delta g_{гп}$		-0,28	0,22	0,38	0,12	-0,09	-0,20
петропл.		0,06	-0,11	-0,47	0,24	-0,34	0,11
$T_{\varphi\lambda}$		-0,57	0,14	-0,84	-0,06	-0,70	0,31
T_{RR}		0,32	0,13	-0,67	-0,23	-0,77	0,05
grad Q		0,19	0,06	0,73	0,16	0,54	-0,22
Q		0,11	0,02	0,69	0,10	0,60	0,14
grad N_a		0,64	0,72	0,45	0,53	0,33	0,37
A_{10}		0,59	0,69	0,37	0,45	0,35	0,42
V_r^M		-0,22	0,05	-0,92	-0,19	-0,76	-0,18

Это первый важный результат, позволяющий надеяться на использование индивидуальных геолого-геофизических характеристик при дифференцированном подходе к прогнозированию сейсмической опасности. На ряде регионов это было показано нами ранее [Геофизические условия..., 1983; Исследования земной коры..., 1984; Глубинное строение..., 1987].

Следующим описанным выше этапом исследований предусматривалось решение задачи поиска территорий сходных с эталонным типом сейсмогенных сред. В качестве эталонных были взяты очаги поочередно каждого из регионов, а также их комбинации: Крым—Кавказ—Копетдаг; Средняя Азия—Алтай—Саяны; Средняя Азия—Алтай—Саяны—Сибирь; Сибирь—Дальний Восток—Камчатка—Курилы.

Результаты такого перебора регионов представлены в виде карт в изолиниях близости и адекватности землетрясениям с $M \geq 6,0$ разных сейсмических регионов.

Карты в изолиниях близости построены для всех выделенных эталонных объектов, назначение их состоит в уточнении границ зон сейсмической опасности с однородными по комплексу признаков очагами, а в ряде случаев — в детализации таких однородных зон с выделением внутри них

Камчатка—Курильские острова		Крым—Кавказ—Копетдаг—Средняя Азия—Алтай—Саяны			Средняя Азия—Сибирь		Сибирь—Камчатка—Курильские острова
Сибирская платформа	Весь регион	Северный Кавказ	Сибирская платформа	Весь регион	Сибирская платформа	Весь регион	Весь регион
0,03	-0,10	-0,01	-0,06	-0,19	-0,04	-0,16	-0,06
-0,47	-0,51	0,39	0,26	0,42	0,32	0,47	-0,23
-0,83	0,82	0,41	0,61	0,43	0,41	0,28	-0,56
-0,51	-0,57	0,39	0,18	0,03	-0,04	-0,15	-0,32
0,97	0,83	-0,52	-0,10	-0,30	-0,38	-0,51	0,44
-0,56	0,56	-0,31	0,35	0,17	0,36	0,12	-0,36
-0,80	-0,61	0,27	-0,41	0,11	-0,35	0,33	-0,20
-0,97	0,30	-0,31	-0,82	0,03	-0,67	0,14	0,32
-0,77	0,33	-0,10	-0,59	-0,13	-0,65	-0,20	0,18
0,44	0,07	0,20	0,68	0,14	0,57	0,24	0,18
0,19	0,00	0,24	0,47	0,08	0,60	0,14	0,10
0,39	0,49	0,42	0,45	0,56	0,38	0,47	0,37
0,44	0,56	0,34	0,37	0,48	0,32	0,40	0,37
-0,81	-0,18	-0,38	-0,88	-0,11	-0,91	-0,33	-0,17

отдельных (внутрирегиональных) групп очагов землетрясений. Примеры детализации можно назвать в регионах Кавказа, Средней Азии, Алтае-Саянах, Сибири. Изолинии близости со значением 0,3 охватывают всю сейсмоактивную область и конкретизируют ее границы, а изолинии значений близости 0,7–0,9, вероятнее всего, оконтуривают непосредственно очаговую зону (рис. 36–42, рис. 39, 40, см. вкл.).

Значения адекватности получаются при сравнении каждой исследуемой точки массива данных с эталонной точкой класса А (землетрясения) и класса \bar{A} (асейсмичная область). Карты в изолиниях адекватности землетрясениям с $M \geq 6,0$ того или иного региона построены для всех эталонных объектов указанных выше сейсмичных областей СССР. Полученные на картах широкие по площади области со значением адекватности 0,9 и более характеризуют высокую сейсмическую активность региона. Однако здесь важнее другое — появление контуров прогнозных областей за пределами эталонных объектов и даже "эталонных" регионов. Последнее свидетельствует о том, что в пределах разнородных регионов есть и общие, объединяющие признаки, а некоторые из очагов Карпатской зоны, Сибири и Дальнего Востока похожи (вероятно, по глубинным условиям).

Таблица 35

Сравнительный анализ эталонных сейсмичных групп
(коэффициенты корреляции)

Параметры	Класс А	Крым—Кавказ—Копетдаг	Крым—Кавказ—Копетдаг	Крым—Кавказ—Копетдаг	Средняя Азия—Алтай—Саяны
	Класс А	Средняя Азия—Алтай—Саяны	Сибирь—Дальний Восток	Камчатка—Курильские острова	Сибирь
ΔT_a		-0,13	-0,20	-0,18	0,07
h_p		-0,49	-0,04	+0,41	0,42
H_M		-0,42	0,49	0,87	0,70
H_{M_p}		-0,04	0,16	0,51	0,79
пл. диффер.		0,92	0,12	-0,94	-0,47
$\Delta g_{гл}$		0,16	0,47	0,71	0,08
петропл.		-0,42	-0,23	0,51	-0,36
$T_{\varphi\lambda}$		0,27	-0,27	-0,55	-0,59
T_{RR}		0,36	0,18	-0,34	-0,17
grad Q		-0,16	-0,22	-0,15	-0,33
Q		-0,23	-0,29	0,03	-0,28
grad N_a		0,21	0,55	0,33	0,23
A_{10}		0,10	0,49	-0,20	0,17
V_{Γ}^M		0,43	0,24	0,26	0,64

В нашем исследовании была предпринята также попытка классификации очагов землетрясений по типам сейсмогенных сред, выраженным в индивидуальном сочетании (комбинации) геолого-геофизических параметров, определяющих сейсмичность.

Использование альтернативного класса эталонов (взятых в пределах асейсмичных районов, в районах с низкой сейсмичностью (Северный Кавказ, юг Сибирской платформы) или в отдельных точках с нулевой сейсмичностью по всему исследуемому региону) позволило определить наиболее информативные параметры в комплексе геолого-геофизических признаков.

Высокий коэффициент корреляции с классифицирующим признаком указывает на наибольшее отличие сейсмичных областей от асейсмичных. Соответственно высокий коэффициент корреляции может служить отличительным признаком, определяющим сейсмичность в эталонной сейсмогенной области (табл. 34).

Отметим, что для различных (на первый взгляд) сейсмичных областей найдены общие параметры с высокой информативностью: глубина до поверхности Мохоровичича; плотностная дифференциация мантийно-коровых блоков; градиент скорости вертикальных новейших движений, по

Средняя Азия—Алтай—Саяны	Сибирь	Крым—Кавказ—Средняя Азия—Алтай—Саяны	Крым—Кавказ—Копетдаг—Средняя Азия	Средняя Азия—Алтай—Саяны	Крым—Кавказ
Камчатка—Курильские острова	Камчатка	Средняя Азия—Сибирь	Сибирь—Камчатка	Сибирь—Камчатка	Средняя Азия—Алтай—Саяны
-0,07	-0,12	-0,03	-0,14	0,09	-0,22
0,68	0,45	-0,04	0,46	0,46	-0,46
0,94	0,77	0,15	0,74	-0,75	-0,38
0,67	0,22	0,23	0,38	-0,41	-0,07
-0,98	-0,89	0,23	-0,59	0,75	0,91
0,69	0,67	0,08	0,53	-0,49	0,12
0,77	0,77	-0,27	0,29	-0,38	-0,44
-0,47	0,59	-0,14	-0,37	0,42	0,25
-0,55	-0,75	0,07	-0,32	0,43	0,37
-0,03	-0,14	-0,18	-0,14	0,10	-0,18
0,22	0,32	-0,17	-0,06	-0,01	-0,18
0,12	-0,14	0,16	0,34	-0,27	0,19
-0,29	-0,34	0,10	0,04	0,00	0,07
0,00	-0,42	0,35	0,10	-0,01	0,41

которым эти области отличаются от альтернативных им областей, т.е. асейсмичных и слабосейсмичных. В то же время каждый сейсмоопасный регион характеризуется своим набором информативных признаков (см. табл. 35).

Был также проведен сравнительный анализ эталонных сейсмичных регионов и их групп. Признаки их сходства и различия вынесены в табл. 35. Высокими коэффициентами корреляции характеризуются признаки, по которым можно отличить и отделить один сейсмоопасный регион от другого. Общими признаками, отличающими сейсмичность одного региона от другого являются: глубина до поверхности Мохоровичича; плотностная дифференциация мантийно-коровых блоков (в большей степени); высота рельефа дневной поверхности; глубинные аномалии силы тяжести; петроплотностная характеристика геологических формаций. Невысокие коэффициенты корреляции (см. рис. 47 и табл. 35) указывают на сходство сейсмоопасных регионов между собой по этим признакам.

Разделив условно весь набор использованных нами геолого-геофизи-

Рис. 46. Карта вероятного геодинамического влияния сейсмоактивного Курило-Камчатского региона. Усл. обозначения см. на рис. 44

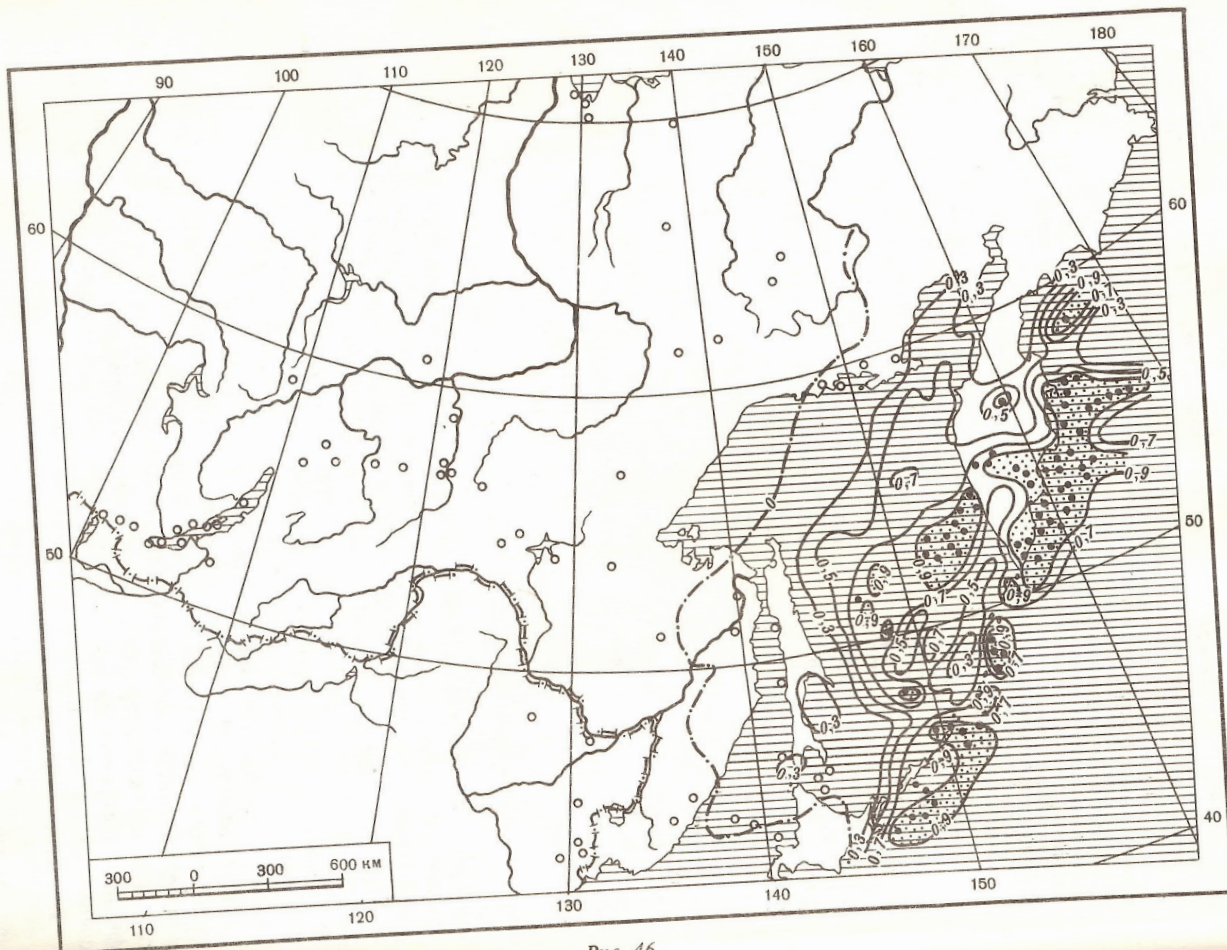


Рис. 46

Набор признаков	A	Крым-Кавказ-Копетдаг		Средняя Азия-Алтае-Саяны		Сибирь-Дальний Восток		Камчатка-Курильские острова		Крым-Кавказ-Копетдаг Средняя Азия-Алтае-Саяны			Средняя Азия-Алтае-Саяны-Сибирь		Сибирь-Камчатка	
		Северный Кавказ	Вся территория	Сибирская платформа	Вся территория	Сибирская платформа	Вся территория	Сибирская платформа	Вся территория	Северный Кавказ	Сибирская платформа	Вся территория	Сибирская платформа	Вся территория	Сибирская платформа	Вся территория
Структура	Аномальное магнитное поле ΔT_a															
	Рельеф дневной поверхности $h_{д,р}$															
	Рельеф поверхности Мохоровичича H_M															
	Раздробленность коры $H_{Mр}$															
Вещество	Плотностная дифференциация среды $\bar{\sigma}$															
	Глубинные аномалии силы тяжести $\Delta g_{г,л}$															
	Петроплотностные неоднородности среды															
	Характеристика геоида $T_{\phi\lambda}$															
Динамика	Характеристика геоида T_{RR}															
	Геотермический градиент $ \text{grad } Q $															
	Тепловой поток Q															
	Градиент новейших тектонических движений $ \text{grad } N_a $															
Динамика	Сейсмическая активность A_{10}															
	Граничная скорость на подошве земной коры $V_{г}^M$															

Рис. 47. Качественное сопоставление сейсмоопасных зон по комплексу признаков для классов эталонных сейсмичных А и асейсмичных \bar{A} объектов

ческих параметров на структурные (аномалии магнитного поля; высота рельефа дневной поверхности; глубина поверхности Мохоровичича; блоковая делимость консолидированной коры), вещественные (плотностная дифференциация мантийно-коровых блоков; глубинные аномалии силы тяжести; петроплотностная характеристика геологических формаций; смешанная производная геопотенциала; аномалии вертикального градиента силы притяжения) и динамические (аномалии теплового потока; геотермический градиент; градиент скорости вертикальных новейших движений; граничная скорость продольных сейсмических волн на поверхности Мохоровичича; сейсмическая активность), мы смогли столь же условно классифицировать сейсмоактивные регионы.

Каждый регион отличается своим набором признаков, отвечающих за структурно-вещественное и динамическое состояние среды, вмещающей очаги землетрясений. Так, например, Крым–Кавказ–Копетдагский регион отличает от других активных регионов признаки, характеризующие в первую очередь вещество и динамику среды; для Средней Азии и Алтае-Саянской области характерны структурные, вещественные и динамические признаки; для Восточной Сибири (включая Байкальскую зону) и Дальнего Востока более характерны признаки вещественного состава среды и ее динамики, а для Курило-Камчатской зоны — признаки, определяющие структуру, вещество и динамику среды сейсмоактивных районов.

Интересно, что связь активных сред и очагов землетрясений с вещественным составом характерна для всех регионов, а для активных сред в Сибири в меньшей степени (и даже отсутствуют как информативные) характерны структурные параметры среды. Сказанное легко проследить по рис. 47 качественного сопоставления сейсмоопасных зон по комплексу признаков (численные значения коэффициентов корреляции, как говорилось выше, можно извлечь из табл. 35).

Естественно, что указанные общие закономерности сходства и различия сейсмоактивных регионов получены статистически и только при использовании выбранного (хотя и немалого) нами набора признаков. Тем не менее решение поставленной задачи кажется нам значимой. Эти результаты позволяют более строго наметить границы между регионами с разным типом сейсмичности, а также получать более достоверные результаты по типизации сред внутри квазиоднородных по геологическим и геофизическим признакам областей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании изложенного выше можно сделать следующие выводы. Совместная количественная обработка геолого-геофизической и сейсмологической информации по предложенной методике дает возможность: — выделять на исследуемой территории специфические участки и соответствующие им области глубинных недр, где возможно формирование очагов новых землетрясений; — оценить степень генетической однородности очаговых зон различных землетрясений; — оценить информативность используемых параметров и наметить их рациональный комплекс.

В связи с этим можно сформулировать вопросы, разработка которых была бы полезной в связи с поисками динамических и структурных признаков сейсмоопасных участков и постановкой комплексных геолого-геофизических работ специального назначения. К их числу относятся: — создание региональных комплексных геолого-геофизических моделей земной коры и верхней мантии сейсмичных и асейсмичных сред; — формирование признаков сходства и различия сред с разной палео- и современной тектонической активностью в данном конкретном регионе, поскольку такие признаки сходства и различия не переносятся из региона в регион с разными геодинамическими режимами развития; — изучение тонких структурных и динамических неоднородностей среды (коры, мантии) и создание комплексных геолого-геофизических моделей очаговых зон сильнейших землетрясений СССР для их типизации, а также для размещения пунктов режимных прогностических наблюдений; — выявление и отбор информативных на сейсмичность методов исследования и соответствующих геофизических признаков для рационализации многолетних комплексных геолого-геофизических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- Агапова Г.И., Ивановская Л.В., Лопатина Н.П. и др. Количественная оценка сейсмической опасности восточной части района БАМ и прилегающих территорий // Исследование земной коры и верхней мантии сейсмоопасных зон территории СССР. М.: Наука, 1984. С. 132–149.
- Агапова Г.И., Хоменюк Ю.В., Шукин Ю.К. Использование метода опознавания образов для изучения сейсмоопасных зон // Бюл. МОИП. Отд. геол., 1973. Вып. 5.
- Борисов А.А., Лопатина Н.П., Фирсова Д.Б. и др. Прогнозирование сейсмической опасности на территории трассы БАМ по региональным геолого-геофизическим данным // Геофизические условия в очаговых зонах сильных землетрясений. М.: Наука, 1983. С. 180–204.
- Борисов А.А., Фирсова Д.Б., Лопатина Н.П. и др. Исследование геофизических условий в очаговой зоне Газлийских землетрясений 1976 г. // Геофизические условия в очаговых зонах сильных землетрясений. М.: Наука, 1983. С. 97–126.
- Временные методические указания по проведению геофизических работ с целью прямых поисков залежей нефти и газа. М.: ВИЭМС, 1979. 133 с.
- Геофизические условия в очаговых зонах сильных землетрясений. М.: Наука, 1983. 247 с.
- Ивановская Л.В., Добрев Т.Б., Шукин Ю.К. Геофизические характеристики очаговых зон сильных землетрясений и оценка вероятности их возникновения на территории Болгарии // Геофизические условия в очаговых зонах сильных землетрясений. М.: Наука, 1983. С. 45–67.
- Исследования земной коры и верхней мантии сейсмоопасных зон территории СССР. М.: Наука, 1984. 199 с.
- Келли Дж.Д. Общая топология. М.: Наука, 1968. 384 с.
- Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 176 с.
- Ризниченко Ю.В. Проблема величины землетрясений // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. М.: Наука, 1974. С. 98–103.
- Сейсмическое районирование территории СССР: Метод. основы и регион. описание / Под ред. В.Н. Бунз, Г.П. Горшкова. М.: Наука, 1980. 560 с.
- Сейсмическая сотрясаемость территории СССР. М.: Наука, 1979. 192 с.
- Уилкс С. Математическая статистика. М.: Наука, 1967. 632 с.
- Хоменюк Ю.В. Геологическая разведка как проблема опознавания образов // Мат. методы исслед. в геологии: Экспресс-информ. ВИЭМС. 1974б. Вып. 7. С. 1–15.
- Хоменюк Ю.В. Методика поэтапного построения прогнозных карт нефтегазонасыщенности в изолиниях адекватности // Сов. геология. 1974а. № 5. С. 23–36.
- Хоменюк Ю.В. Программа опознавания образов ПОИСК // Гляциология Средней Азии. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 19–29. (Тр. Среднеазиат. НИИ; Вып. 32).
- Хоменюк Ю.В. Разложение случайного вектора по системе случайных величин с ортонормальными вариациями и некоторые его приложения // Материалы семинара по применению геофизических и математических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях: Темат. сб. ВСЕГИНГЕО. М., 1967. Вып. 5. С. 5–16.
- Хоменюк Ю.В., Исаев В.С., Максимов А.Б. Система программ ПОИСК для ЭВМ БЭСМ-6: (Руководство программиста и пользователя). М.: ВНИИГеофизика, 1984. 74 с.
- Хоменюк Ю.В., Исаев В.С., Максимов А.Б. Статистический анализ и транс-

формация двумерных полей (ШЛИХ). М.: ВНИИГеофизика, 1980. 26 с.

Хоменюк Ю.В., Лебедев В.Р. Программа ПОИСК-20. М.: ВНИИГеофизика. 1974. 30 с.

Хоменюк Ю.В., Максимов А.Б., Рыженко Л.И. Аналитическое описание структуры полей в терминах дифференциальной геометрии // Прикл. геофизика. 1978. № 92. С. 140–148.

Хоменюк Ю.В., Филиппова Г.П., Фирсова Д.Б. и др. Оценка пространственного распределения сейсмичности по комплексу геолого-геофизических данных // Сейсмологические исследования в Узбекистане. Ташкент: Фан, 1979. С. 17–21.

Хоменюк Ю.В., Фирсова Д.Б. Методика оценки потенциальной опасности сейсмических зон по комплексу геолого-геофизических данных // Глубинное строение земной коры. М.: Наука, 1975. С. 45–52.

Хоменюк Ю.В., Шукин Ю.К., Фирсо-

ва Д.Б. и др. Методика оценки вероятности сильнейших землетрясений по комплексу геолого-геофизических данных // Результаты комплексных геофизических исследований в сейсмоопасных зонах. М.: Наука, 1978. С. 86–100.

Шукин Ю.К., Агапова Г.И., Ивановская Л.В. и др. Прогнозирование сейсмической опасности на территории трассы БАМ по региональным геолого-геофизическим данным // Сейсмическая опасность и сейсмическое строительство района БАМ: (Тез. докл. на выезд. сес. МССС). Иркутск, 1979. С. 14–16.

Шукин Ю.К., Краснопецева Г.В., Фирсова Д.Б. и др. Исследование земной коры и верхней мантии сейсмоопасных зон территории СССР. М.: Наука, 1984. 199 с.

Шукин Ю.К. Современные геодинамические процессы и сейсмичность слабоактивных регионов // Глубинное строение слабосейсмичных регионов СССР. М.: Наука, 1987. С. 217–225.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
<i>Глава I</i>	
Теоретические предпосылки методики	5
1. Физико-геологические и математические основы методики	5
2. Сущность методики	6
<i>Глава II</i>	
Математическое обеспечение методики	7
1. Общая характеристика программы ПОИСК	7
2. Описание основной части алгоритма	8
3. Опознавание при неполном комплексе параметров	12
<i>Глава III</i>	
Постановка задачи, подготовка и анализ исходной информации	14
1. Выделение района исследований	14
2. Подготовка картографической основы	14
3. Выбор геолого-геофизических параметров	15
4. Выделение эталонных участков и опорных точек	18
5. Самоопознавание опорных (эталонных) точек	19
6. Анализ комплекса используемых параметров	20
<i>Глава IV</i>	
Комплексное использование результатов количественной обработки геолого-геофизических данных в сейсмоактивных регионах	22
1. Построение результативных карт и их интерпретация	22
2. Балканский регион (в пределах территории Болгарии)	23
3. Крымско-Таманский регион	35
4. Кавказский регион	43
5. Копетдагский регион	53
6. Туранская плита	60
7. Северо-Тяньшаньский регион	67
8. Регион Байкало-Амурской железнодорожной магистрали (БАМ)	74
9. Курило-Камчатский регион	85
10. Восточно-Европейская платформа	86
<i>Глава V</i>	
Геофизические признаки сейсмичных регионов с разными геодинамическими режимами	92
Заключение	105
Литература	106

Научное издание

**ДОЛГОВРЕМЕННОЕ
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
СЕЙСМИЧЕСКОЙ
ОПАСНОСТИ
ПО КОМПЛЕКСУ
ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

*Утверждено к печати
Межведомственным советом по сейсмологии
и сейсмостойкому строительству
при Президиуме Академии наук СССР*

Редактор *Н.С. Гуляева*
Художник *А.Г. Кобрин*
Художественный редактор *Н.Н. Власик*
Технические редакторы *В.В. Лебедева, Л.Н. Богданова*
Корректор *Г.В. Дубовицкая*
Оператор *В.В. Неснова*

Набор выполнен в издательстве
на наборно-печатающих автоматах

ИБ № 37080
Подписано к печати 05.11.88. Т — 20731
Формат 60X90 1/16. Бумага книжно-журнальная
Гарнитура Пресс-Роман. Печать офсетная
Усл.печ.л. 7,0 + 0,7 вкл. Усл.кр.-отт. 7,3. Уч.-изд.л. 8,5
Тираж 600 экз. Тип. зак. 872. Цена 1р. 70к.

Ордена Трудового Красного Знамени
издательство "Наука", 117864 ГСП-7,
Москва В-485, Профсоюзная ул., д. 90

Ордена Трудового Красного Знамени
1-я типография издательства "Наука"
199034, Ленинград В-34, 9-я линия, 12

ИЗДАТЕЛЬСТВО "НАУКА"

Готовятся к печати книги:

**Комплексные исследования по сейсмологии
и сейсмостойкому строительству**

20 л. 4 р. 40 к.

В сборнике освещены результаты исследований по направлениям, сформированным организатором Межведомственного совета по сейсмологии и сейсмостойкому строительству чл.-корр. АН СССР Е.Ф. Саваренским. Это следующие направления: развитие сейсмологических наблюдений в СССР; изучение внутреннего строения Земли и физики очага; прогноз землетрясений, сейсмичность и оценка сейсмической опасности территорий; определение сейсмических воздействий для сейсмостойкого строительства.

Для геофизиков, сейсмологов, геологов.

Пархоменко Э.И.

**Геоэлектрические свойства минералов и горных пород
при высоких давлениях и температурах**

15 л. 3 р.

В монографии систематизированы и обобщены электрические характеристики (электропроводность и диэлектрическая проницаемость) минералов, осадочных, метаморфических и магматических пород. Раскрыта связь электрических параметров минералов и горных пород с их кристаллохимическими особенностями, химическим и минеральным составом. Показана закономерность изменения этих параметров при физико-химических процессах на основе теории физики полупроводников и диэлектриков.

Для специалистов, работающих в области геофизики, геологии, геохимии.

Сейсмологические наблюдения на Дальнем Востоке СССР

16 л. 3 р. 20 к.

Статьи сборника содержат новые сведения о локальных сейсмометрических сетях и их регистрационных возможностях. Приведены результаты методических работ по автоматизации процессов интерпретации и формированию регионального Центра обработки сейсмологической информации, а также ряда важнейших работ по интерпретации волновой картины, выделению сейсмических волн, оценке интенсивности по инструментальным данным и др.

Для сейсмологов, геофизиков.

Теория и алгоритмы интерпретации геофизических данных

20 л. 3 р. 40 к.

В сборнике теоретически и экспериментально исследованы модели сейсмического режима и их приложения к долгосрочному прогнозу землетрясений. Изучены свойства сильных движений, вызванных землетрясениями. Рассмотрена теория и численные модели возбуждения магнитного динамо и конвекционных течений в Земле, а также ряд прямых и обратных задач сейсмологии и их приложения к решению конкретных геофизических задач.

Для геофизиков, занимающихся проблемами внутреннего строения Земли и прогноза землетрясений.

**Экспериментальные и численные методы
в изучении очагов землетрясений**

20 л. 4 р. 50 к.

Сборник содержит материалы IV Всесоюзной научной сессии "Физика очага землетрясения", состоявшейся в Москве. Представлены результаты проводившихся в последние годы в СССР исследований физических процессов в очаге землетрясения методами полевых наблюдений, лабораторного эксперимента и теоретического анализа.

Для геофизиков, геологов и специалистов по изучению разрушения горных пород.

1 p. 70 к.

Б. 2102

K 3594

10/10

с. 10/10

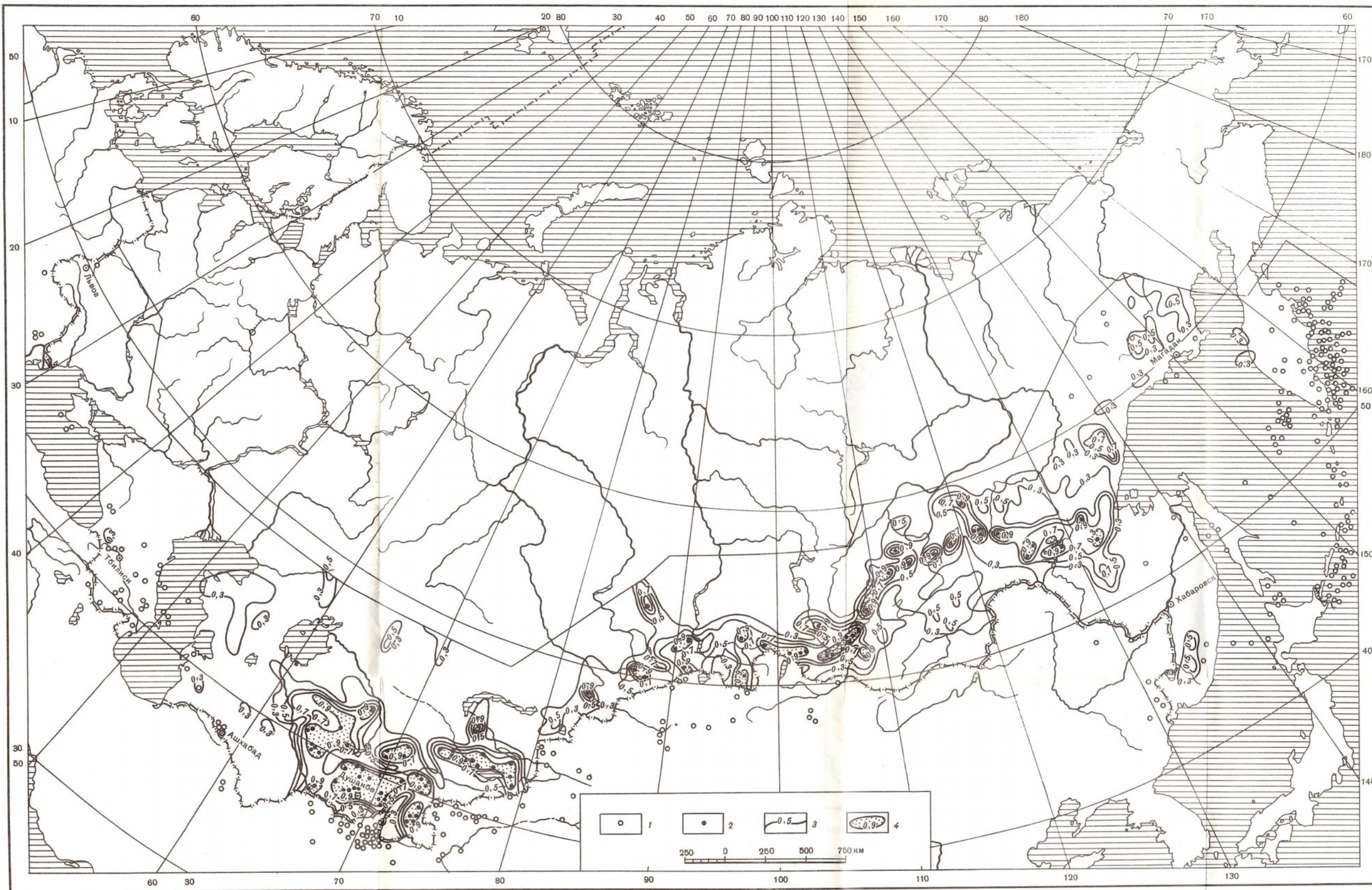
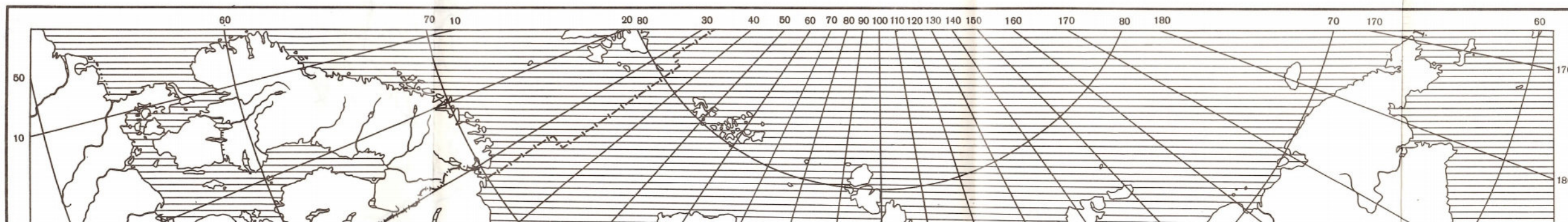


Рис. 39. Карта в изолиниях близости к землетрясениям с $M > 6,0$ регионов Средней Азии, Алтае-Саянского и Сибири. Усл. обозначения см. на рис. 36



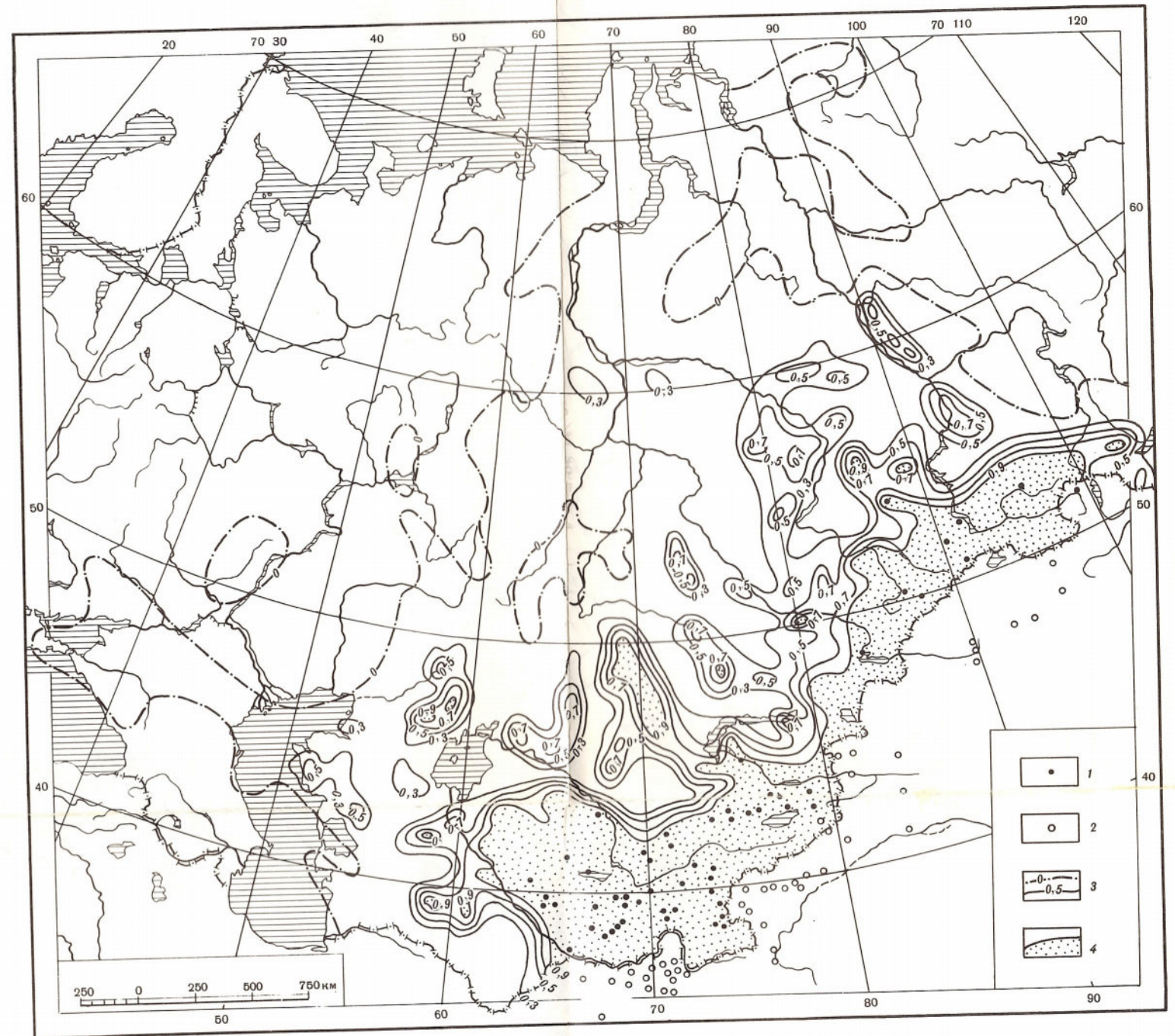
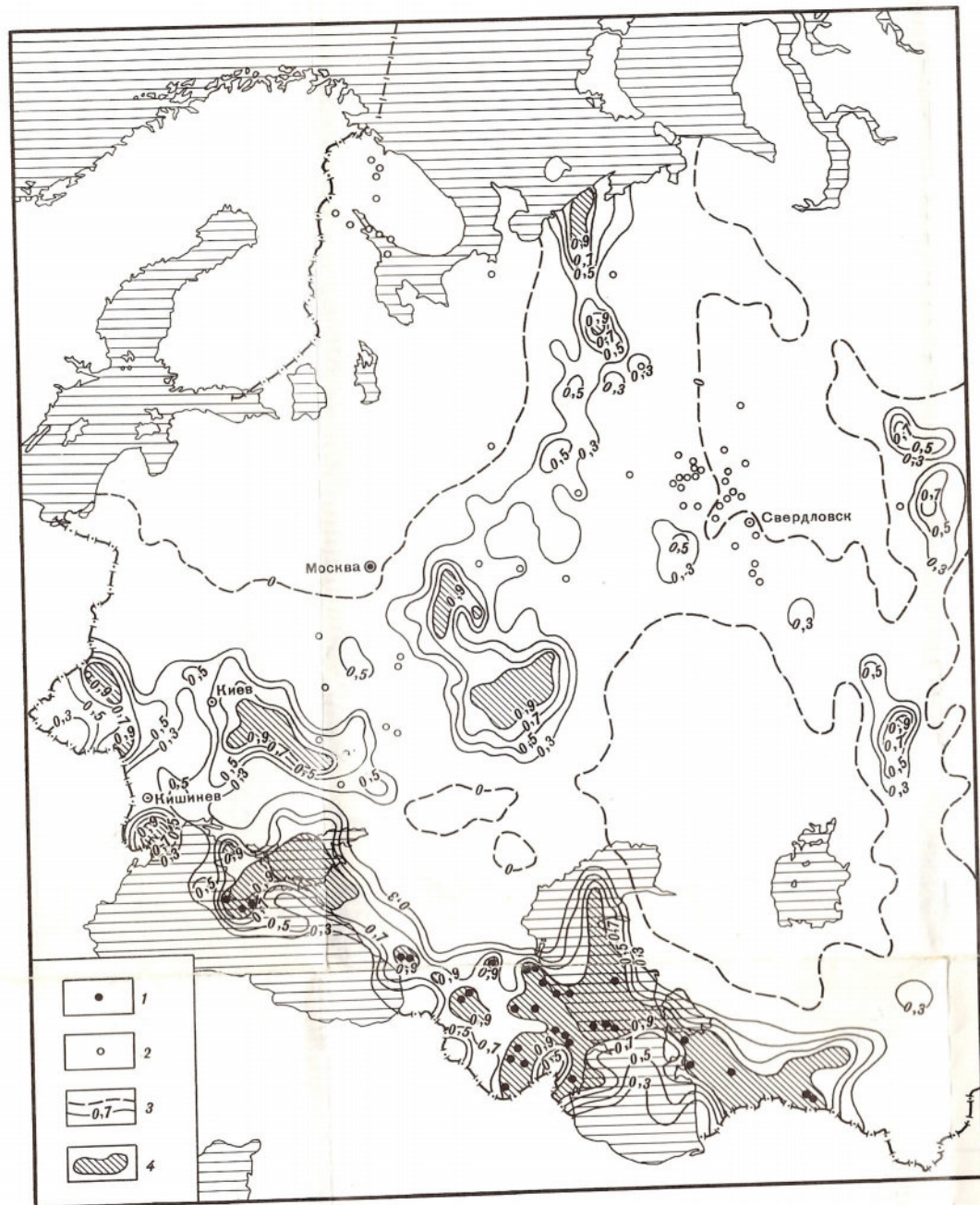


Рис. 43. Карта вероятного геодинамического влияния сейсмоактивного Крым-Кавказ-Копетдагского региона. Усл. обозначения см. на рис. 36
 1 – эталонные эпицентры землетрясений с $M \geq 6,0$; 2 – землетрясения с $M \geq 3,0$ Восточно-Европейской платформы; 3 – изолинии близости; 4 – области аномальных значений близости

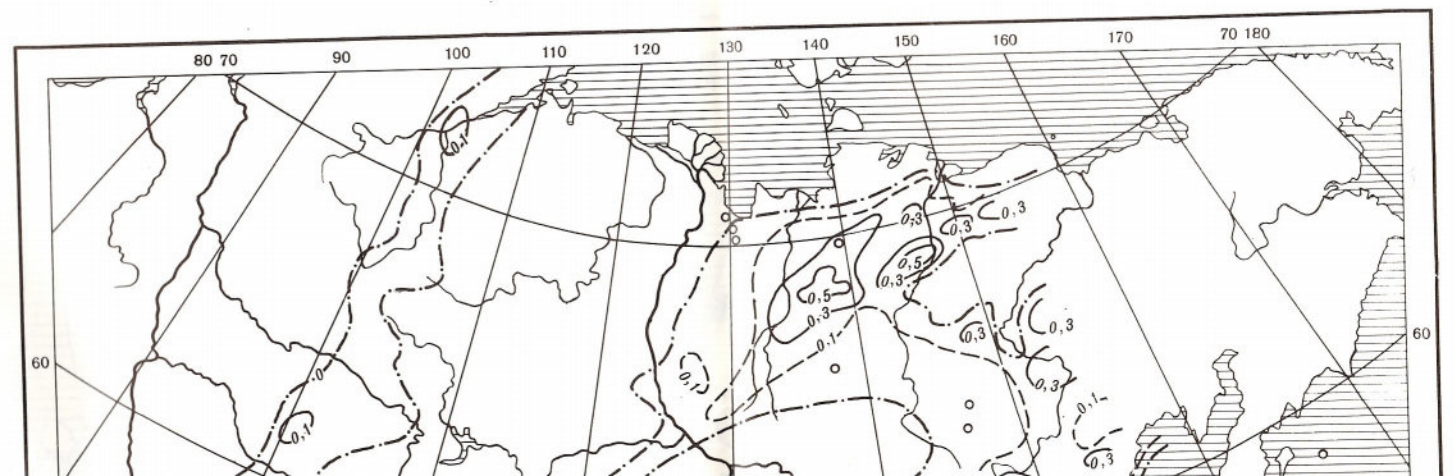


Рис. 43. Карта вероятного геодинамического влияния сейсмоактивного Крым-Кавказ-Копетдагского региона. Усл. обозначения см. на рис. 36

1 - эллиптические эпицентры землетрясений с $M \geq 3,0$ Восточно-Европейской платформой; 2 - эллиптические эпицентры землетрясений с $M \geq 6,0$; 3 - изолинии значений близости; 4 - области аномальных значений близости



Рис. 44. Карта вероятного геодинамического влияния сейсмоактивных регионов Средней Азии и Алтае-Саян

1 - эллиптические эпицентры землетрясений с $M \geq 6,0$; 2 - эллиптические эпицентры землетрясений с $M \geq 6,0$; 3 - изолинии близости; 4 - области аномальных значений близости

Рис. 45. Карта вероятного геодинамического влияния сейсмоактивных регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока. Усл. обозначения см. на рис. 44

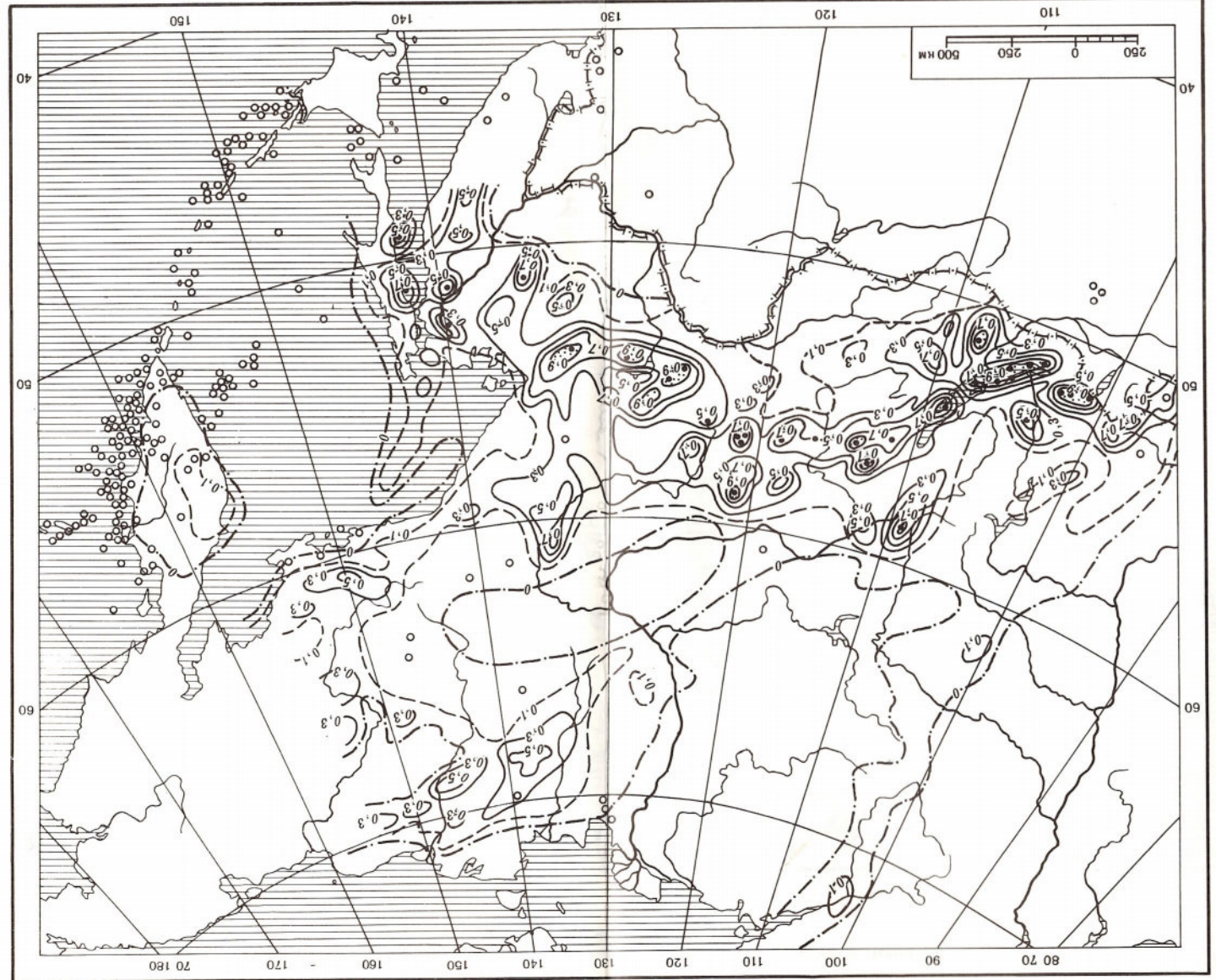
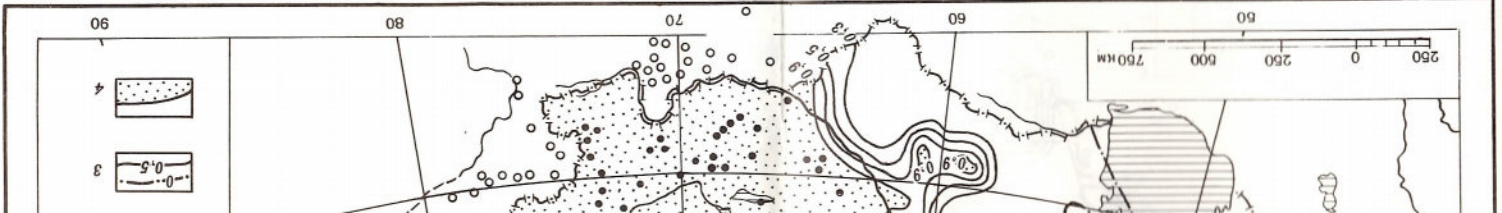


Рис. 40. Карта в изолиниях алексватности землетрясениям с $M \geq 6,0$ региона Сибири и Дальнего Востока. Усл. обозначения см. на рис. 36

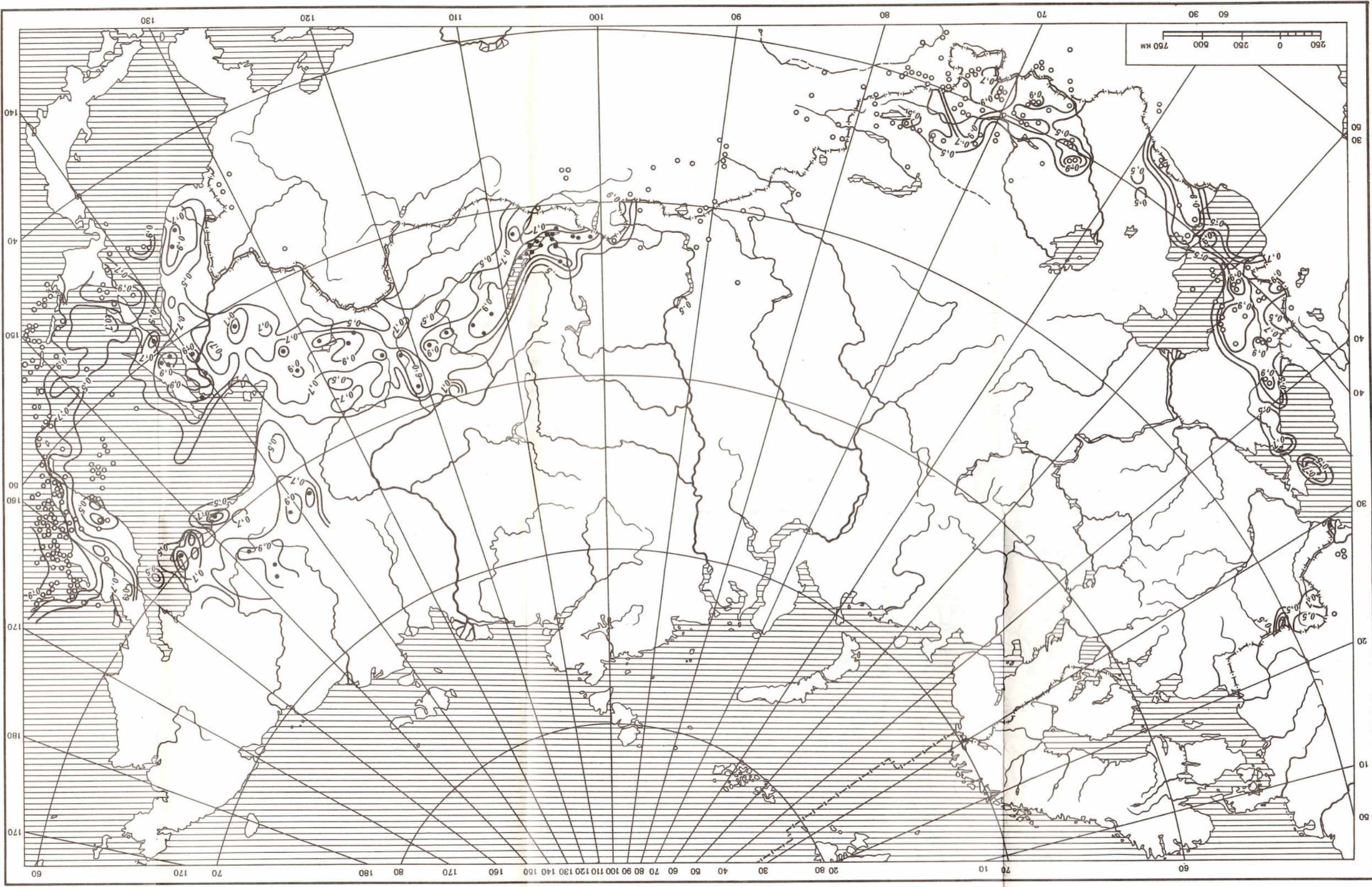


Рис. 39. Карта в изолиниях близости к землетрясениям с $M \geq 6,0$ регионов Средней Азии, Алтае-Саянского и Сибири. Усл. обозначения см. на рис. 36

