

Г. И. РЕЙСНЕР

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ ОЦЕНКИ
СЕЙСМИЧЕСКОЙ
ОПАСНОСТИ



Г.И. РЕЙСНЕР

**Геологические
методы оценки
сейсмической
опасности**

3393



Москва «Недра» 1980



Рейснер Г. И. Геологические методы оценки сейсмической опасности. — М., Недра, 1980 — 173 с.

Основное внимание в книге уделено определению и способам накопления исходных геологических данных, необходимых для оценки потенциальной сейсмической опасности. Рассмотрены две группы геологических методов выделения сейсмоопасных зон — традиционная, наиболее распространенная в настоящее время при сейсмическом районировании, и формальная, разработка и внедрение методов которой началось сравнительно недавно. Совместный анализ обеих групп методов позволил установить высокую надежность, достоверность и перспективность второй из них (формальной) для выделения зон возникновения землетрясений. Приведен обширный фактический материал по различным регионам СССР и по ряду зарубежных территорий.

Для широкого круга геологов и геофизиков, занимающихся вопросами прогнозирования сейсмической опасности и сейсмическим районированием, а также для специалистов в области антисейсмического строительства.

Табл. 9, ил. 27, список лит. — 167 назв.

Рецензент — канд. геол.-минер. наук Ю. К. Шукин

ПРЕДИСЛОВИЕ

Каждый год на земном шаре происходит большое число катастрофических землетрясений, которые уносят тысячи человеческих жизней, оставляют без крова миллионы людей, наносят огромный ущерб экономике ряда стран. В качестве примера можно привести недавние землетрясения (1976—1979 гг.) в Италии, Гватемале, Индонезии, Китае, Турции, Иране и в других государствах на всех континентах. Значительная часть территории нашей страны также подвержена воздействию сильных землетрясений. В пределах Советского Союза сейсмически активные области занимают 20% территории с населением около 40 млн. чел. В этих областях расположено 9 столиц союзных республик, а плотность населения в некоторых районах превышает 100 чел/км² [155].

Необходимость предотвращения катастрофических последствий землетрясений заставляет из года в год увеличивать объем научных исследований по разработке проблемы прогноза сейсмической опасности. Во многих странах существуют национальные программы, направленные на ее решение, расширяется международное сотрудничество в этой области, ведутся исследования по двусторонним и многосторонним международным проектам. Можно отметить, например, пятилетнюю (1976—1980) Национальную итальянскую программу «Геодинамика», в рамках которой действует комиссия «Сейсмический риск», призванная подготовить рекомендации по антисейсмическому строительству в этой стране; недавно закончивший свою деятельность международный «Балканский сейсмический проект» ЮНЕСКО (1971—1976 гг.), под эгидой которого ученые Румынии, Болгарии, Югославии, Греции и Турции с помощью экспертов ряда других стран (в том числе СССР) подготовили карты сейсмического районирования этого региона; действующее ныне двустороннее советско-американское соглашение по поискам предвестников землетрясений с проведением совместных работ на двух полигонах на Памире (СССР) и в Калифорнии (США); совместные работы ученых в рамках Ассоциации социалистических стран по пла-

нетарной геофизике (КАПГ); деятельность Европейской сейсмологической комиссии (ЕСК) и т. д.

Проблема предотвращения катастрофических последствий землетрясений является чрезвычайно сложной, комплексной, требующей участия специалистов различного профиля — сейсмологов, геологов, геофизиков, инженеров-сейсмологов, физиков, математиков, инженеров-конструкторов, строителей и т. д. Несмотря на огромные усилия, направленные на ее решение во многих странах, и частные успехи, достигнутые в разработке отдельных ее аспектов, можно констатировать, что ни в одной стране проблема предотвращения катастрофических последствий землетрясений еще не решена окончательно.

Представляется, что наиболее важными, узловыми задачами в указанной проблеме являются: 1) прогноз места и силы ожидаемых землетрясений (проведение сейсмического районирования); 2) прогноз времени возникновения землетрясений в известных сейсмоопасных зонах и поиски их предвестников.

Настоящая работа теснейшим образом связана с задачами сейсмического районирования, т. е. определения степени потенциальной сейсмической опасности различных территорий, более конкретно — с решением принципиально важных вопросов прогноза места и силы ожидаемых землетрясений, требующего неременного привлечения геологических методов исследования (в широком понимании термина «геологический», т. е. с использованием также геофизических, геодезических и геоморфологических материалов). Только комплексный анализ сейсмологических и геологических данных позволяет на научной основе оценить наибольший уровень энергии, которая может выделиться в той или иной очаговой зоне (один из показателей этого уровня — магнитуда землетрясений).

Геоморфологические последствия землетрясений и степень разрушения искусственных сооружений на поверхности Земли (интенсивность сотрясений, балльность) здесь не рассматриваются. Интенсивность сотрясения, как известно, зависит от особенностей прохождения сейсмических волн от очага землетрясения до пункта их выхода на дневную поверхность, от поверхностных геологических условий, а степень повреждения искусственных сооружений — также от качества строительства. Но прежде всего, конечно, сила сотрясения зависит от

местоположения очага и энергии землетрясения. Следовательно, установление (прогнозирование) максимальной для каждого района энергии (магнитуды) землетрясения надо считать первой фазой работы по определению степени сейсмической опасности и сейсмическому районированию.

Необходимость и важность этой стадии работ по сейсмическому районированию (выделение зон возникновения землетрясений) подчеркивались в «Методических рекомендациях по сейсмическому районированию территории СССР» [75]. Многие исследователи считали ее первоочередной. И. Е. Губин, например, писал: «Только после установления очаговых зон и степени их сейсмогенности можно рассчитать ожидаемое распространение сотрясений определенных баллов на всей изучаемой территории. Других научных путей для этого нет» [55, с. 22].

Решать эту задачу без привлечения сведений о геологическом строении и тенденциях развития большинства районов невозможно, так как материал сейсмостатистики явно недостаточен. Из-за того что сильные землетрясения сравнительно редки, многие очаговые зоны, постоянно действующие в геологическом масштабе времени, еще не обнаружены. В редких случаях имеются сейсмостатистические данные за промежутки времени, измеряемые сотнями или тысячами лет; во многих местах сроки, в течение которых проводились сейсмические наблюдения, не превышают 50—70 лет.

Теоретически возможно использовать геологические данные для изучения закономерностей распределения сейсмически опасных зон, так как тектонические движения и сейсмичность представляют следствия одного и того же эндогенного процесса. Тектонические движения имеют направленный и долговременный характер: они влияют на облик складок и разрывов, наблюдаемых в обнажениях коренных пород, на формы рельефа, высоту и мощность аллювиальных отложений речных террас, а также на распределение геофизических аномалий. Поэтому данные о тектонических движениях могут быть использованы для изучения сейсмических явлений.

Вплоть до настоящего времени не найдены надежные методы перехода от исходной геологической информации к прогнозированию потенциальной сейсмической опасности, что сказывается на качестве карт сейсмического районирования.

В последние годы поиски оптимальных методов выделения зон возникновения землетрясений с различной магнитудой развернулись во многих странах. Ведущие международные организации (ЮНЕСКО, ЕСК, КАПГ и др.) прилагают огромные усилия, направленные на решение этой проблемы.

В СССР к настоящему времени разработаны две основные группы методов ее решения — традиционные и формальные. Первые из них доминируют при решении практических вопросов районирования территории по степени их сейсмической опасности; формальные методы в практику до сих пор не внедрены.

В работе анализируются разработанные автором, или с его участием, методы перехода от исходной геологической информации к определению зон возникновения землетрясений с разной магнитудой, относящиеся к обеим указанным группам.

Все геологические методы оценки максимально возможной магнитуды ожидаемых землетрясений (M_{\max}) основаны на сравнении зарегистрированного уровня сейсмичности в отдельных наиболее изученных сейсмологически районах с особенностями геологического строения и тенденциями развития этих районов. Обойтись при этом без сейсмостатистики нельзя: до сих пор нет прямых методов, которые позволяли бы сделать оценку M_{\max} , опираясь только на данные о внутреннем состоянии земных недр и происходящих там процессах. Проблема заключается не только в том, что трудно оценить количественно величину напряжений, накапливающихся на разных глубинах в различных районах Земли, определить прочность и вязкость находящегося там материала, а также получить точные сведения о глубинном строении земной коры и верхней мантии; проблема осложняется еще и тем, что, как известно, при землетрясениях высвобождается только некоторая (неизвестно какая) часть накопленной энергии деформации.

Таким образом, приходится мириться с тем, что в настоящее время оценка геологическими методами величины M_{\max} для каждого района так или иначе зависит от данных сейсмостатистики и представляет собой интерполяцию и экстраполяцию результатов сейсмических наблюдений, проведенных в отдельных пунктах, на всю территорию рассматриваемого региона. Это означает, в частности, что зарегистрированная в

определенном регионе к настоящему времени наибольшая магнитуда землетрясения ($\text{Sup } M$) принимается для него как максимально возможная. Чтобы установить, будут ли в этом регионе еще более сильные землетрясения (с магнитудой выше $\text{Sup } M$), надо проанализировать геологические условия в тех областях, где такие землетрясения возникали. Для Кавказа, например, $\text{Sup } M=6,9$ [93]; чтобы узнать, возможны ли здесь землетрясения с $M \geq 7$; следует расширить изучаемую территорию, включив в нее соседние районы Турции и Ирана.

Основными задачами настоящей работы являются: анализ современного состояния проблемы выделения зон возникновения землетрясений с различной магнитудой на основе использования геологических данных; разработка требований к необходимому для этой цели исходному геологическому материалу и показ того, в какой форме и какими методами он должен накапливаться; сопоставление достоинств и недостатков различных методов решения задачи выделения зон с различным потенциальным уровнем сейсмической опасности и рекомендации для проведения работ по сейсмическому районированию.

Монография посвящена геологическим методам прогнозирования сейсмической опасности, связанной с землетрясениями, происходящими только в земной коре. Мантийные землетрясения (промежуточные и глубокие), возникающие, как правило, в хорошо известных очаговых зонах, в данной работе не рассматриваются.

Представляется необходимым сформулировать в самом общем виде принципы выделения сейсмоопасных зон с использованием геологической информации.

1. Каждый район имеет свою «удельную» величину максимально возможной магнитуды землетрясений M_{max} . Поэтому сильные землетрясения возможны не везде, а только в определенных местах. Геологические причины, приводящие к землетрясению, в разных районах различны. В самом общем виде можно считать, что сейсмичность зависит от характера и интенсивности тектонического процесса и свойств среды, в которой этот процесс развивается.

2. Интенсивность тектонического процесса и свойства среды*, формирующейся при геологическом развитии территории, определяют ее геотектоническую принадлежность, от ко-

торой зависит тип закономерностей, связывающих тектонический процесс и сейсмичность.

3. Тектонические процессы носят длительный, направленный характер, поэтому для выяснения закономерностей проявлений сейсмичности необходимо привлекать данные по истории развития за длительные отрезки геологической жизни территории. Этот анализ позволит оценить направленность тектонического процесса, а также определить основные элементы современной структуры, с которыми связаны землетрясения.

4. Ввиду разнообразия причин, вызывающих проявления сейсмичности в разных областях, не может быть «универсального» критерия сейсмичности. Следует учитывать многие геологические признаки. При необходимости изучения сейсмичности геотектонически разнородного региона приходится выбирать из всех геологических признаков такие, которые одинаково связаны с уровнем сейсмичности во всех его геотектонических зонах.

В работе обобщен 25-летний опыт исследований автора, касающийся вопросов связи геологических и сейсмических явлений, геологических критериев сейсмичности, выделения сейсмоопасных зон по геологическим данным, сейсмического районирования, накопленный при проведении работ в области послеплатформенной активизации тектонических движений (Тянь-Шань, Восточный Казахстан, Алтае-Саянская область) и альпийской складчатой зоне как в СССР (Кавказ, Крым), так и за его пределами (Карпато-Балканский регион, Альпы). Эти работы проводились в связи с разработкой ряда научных и практических задач в составе различных подразделений Института физики Земли АН СССР им. О. Ю. Шмидта (ИФЗ АН СССР): геологической группы Таджикской комплексной сейсмологической экспедиции (ТКСЭ)**, Южно-Сибирской геологической и Кавказской тектонической экспедиций отдела Геодинамики. Изложены также материалы, собранные при проведении исследований по международным проектам.

Работа выполнена в отделе Геодинамики ИФЗ АН СССР. Научное руководство всеми исследованиями осуществлял чл.-кор. АН СССР В. В. Белоусов. В процессе написания

* Степень жесткости, раздробленности тех или иных участков земной коры

** Ныне — Комплексная сейсмологическая экспедиция (КСЭ).

работы автор пользовался помощью и советами сотрудников ИФЗ АН СССР И. В. Кирилловой, Б. А. Петрушевского, Н. В. Шебалина. При оформлении рукописи большую помощь оказали В. А. Дятлова, Г. Н. Квятковская, В. В. Кожанова, Л. С. Павлова. Автор особо признателен Б. А. Борисову, А. В. Горячеву, Ю. Г. Леонову, А. А. Никонову и В. Н. Шолпо за ряд ценных замечаний и выражает всем перечисленным лицам глубокую благодарность.

ОБЗОР МЕТОДОВ ВЫДЕЛЕНИЯ СЕЙСМООПАСНЫХ ЗОН В СССР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

В настоящей главе рассматривается история развития методов выделения сейсмоопасных зон только в Советском Союзе. Русские и советские специалисты в области прогноза сейсмической опасности всегда подчеркивали большую роль геологических данных в решении этой проблемы. В 1933 г. Д. И. Мушкетов писал: «Для всякого рода общих прогнозов, предубждений о той или иной степени безопасности, или, наоборот, «угрожаемости, неблагоприятия по землетрясениям», основными, совершенно необходимыми отправными точками рассуждений будут всегда сеймотектонические» [78, с. 21].

Оценивая состояние и перспективы работ в области прогноза землетрясений, акад. Г. А. Гамбурцев отмечал: «Превалирование методов сейсмостатистики при современном состоянии сейсмологии неизбежно. В дальнейшем, по мере накопления наших знаний о природе землетрясений и об условиях их возникновения, роль сейсмостатистики должна уменьшаться и, соответственно, главное значение должны получить твердо обоснованные физические и геологические критерии сейсмичности. В этом основная задача развития методов сейсмического районирования» [31, с. 11].

В то же время, вряд ли кто-нибудь в настоящее время будет оспаривать то положение, что в нашей стране методы прогноза места и силы ожидаемых землетрясений разрабатывались и разрабатываются наиболее полно и детально. Этим, в частности, обусловлено широкое привлечение советских специалистов в области сейсмологии и сеймотектоники к участию во многих международных проектах.

Большую роль советских и русских ученых в развитии методов сейсмического районирования с привлечением геологических данных подчеркивали и зарубежные ученые [127, 149].

В нашей стране проведен очень большой объем сейсмогеологических исследований. Опубликовано большое число статей и книг, посвященных обследованию землетрясений в различных регионах страны и геологических условий их возникновения, характеристике геоморфологических последствий землетрясений, вопросам установления геологических критериев сейсмичности, рассмотрению землетрясений с точки зрения оценки современной тектонической активности отдельных районов и областей, результатам изучения палеосейсмодислокаций, вопросам сейсмического микрорайонирования и т. д.

В этом потоке сейсмогеологической информации только сравнительно небольшая часть имеет прямое отношение к

поискам методов выделения сейсмоопасных зон с комплексным использованием геологических данных, т. е. к тем задачам, которые ставит перед собой автор. Этим работам в настоящей главе уделяется главное внимание. В первую очередь рассматриваются те исследования, которые были проведены специалистами ИФЗ АН СССР* по разработке оптимальной методики выделения сейсмоопасных зон в СССР в связи с необходимостью составления нормативных карт сейсмического районирования территории нашей страны.

Из сказанного вовсе не следует, что в своих исследованиях автор не опирается на тот огромный фактический материал, который накоплен всей советской школой сейсмогеологов в изучении связи между геологическими явлениями и сейсмичностью. Ниже будет показано, что разработка методов выделения сейсмоопасных зон с использованием геологических данных была бы невозможна без фактического материала по различным направлениям сейсмогеологии, развиваемых в различных регионах СССР. Читателей, заинтересованных в получении более подробной информации по отдельным затронутым вопросам, можно отослать к работам И. В. Кирилловой и других [60], Б. А. Петрушевского [96, 97, 100], В. Карника [157], Г. П. Горшкова [45, 46, 47], М. В. Гзовского [33, 34, 36], В. П. Солоненко [133, 134], А. А. Никонова [92] и к монографиям [76, 130, 132].

В конце прошлого столетия Э. Зюсс указал на связь землетрясений с определенными тектоническими линиями и на то, что сами землетрясения порождают такие тектонические линии. Тем самым подчеркивалась генетическая связь тектонических явлений с сейсмичностью.

После работ Э. Зюсса «открылось широкое поле для изучения землетрясений с геологической точки зрения, т. е. в отношении их связи со структурными формами данного участка земной поверхности и в отношении влияния на их проявление вещественного состава земной коры» [12, с. 4]. В цитируемой статье сформулированы задачи, которые стоят перед геологами в области изучения землетрясений: «... задача геологов — установить явления остаточной деформации, подвергнуть их критике, найти и указать связь их с тектоническими чертами и наметить их связь с общей геологической жизнью страны...» [там же, с. 6].

Такой генетический взгляд на землетрясения был всегда присущ русской и советской школе геологов, занимающихся вопросами сейсмогеологии. Достаточно в связи с этим напомнить, что первый опыт прогноза сейсмической опасности был осуществлен И. В. Мушкетовым, который на основании изучения Верненского землетрясения 1887 г. выделил 12 наибо-

* Ранее Сейсмологического, затем Геофизического института АН СССР.

лее вероятных сейсмических пунктов, в которых в будущем возможно возникновение землетрясений [80].

В работах А. Е. Лагорио, И. В. Мушкетова, В. Н. Вебера, К. И. Богдановича и других русских геологов уже в конце XIX—начале XX вв. были сформулированы геологические основы проблемы изучения землетрясений. Таким образом, уже на заре развития сейсмогеологии было достаточно ясно, что надо обращать внимание в первую очередь на те общие особенности геологического строения территории, которые могут быть связаны с проявлением землетрясений—на характер современной структуры, историю ее развития и вещественный состав данного участка земной коры.

После Октябрьской революции работы в этом направлении развернулись в нашей стране только с 1928 г.—со времени образования в системе Академии наук СССР Сейсмологического института. Сначала проводилось сейсмогеологическое изучение ряда сейсмически активных областей СССР, в первую очередь Крыма, Кавказа и Средней Азии. Результаты этих работ были обобщены Д. И. Мушкетовым [77—79]; им же намечены общие связи сейсмичности с тектоникой в масштабе всей страны.

Наиболее опасной в сейсмическом отношении представлялась средиземноморская геосинклинальная полоса (Тетис), к северу от которой интенсивность сейсмических процессов затухает. Д. И. Мушкетов [78] выделил четыре зоны различной сейсмической активности, заключающие в пределах СССР десять важнейших сейсмических областей: Карельскую, Подольскую, Крымскую, Кавказскую, Закаспийскую, Среднеазиатскую, Алтайскую, Прибайкальскую, Дальневосточную и Камчатскую, которые в свою очередь подразделялись на 52 района. Тем самым впервые были оговорены главнейшие сейсмически активные районы СССР, в пределах которых в дальнейшем надлежало проводить более детальные работы.

Д. И. Мушкетов [78] развил представление о необходимости дифференцированного подхода к изучению сейсмогеологических явлений и подчеркнул, что тип работ зависит от масштаба, в котором они проводятся: обзорные исследования ведутся в наиболее мелком масштабе, затем следуют областные (1:3 000 000), районные (1:1 000 000) и детальные (1:200 000—1:100 000). Попутно Д. И. Мушкетов высказал чрезвычайно важные замечания по существу выявленных связей между геологическими и сейсмическими явлениями. В частности, им отмечено, что для альпийской складчатой зоны характерна большая частота, но меньшая сила землетрясений, чем для Тянь-Шаня; что древние разломы характеризуются повышенной сейсмической опасностью лишь в зонах воздействия «молодой орогении»—тем самым выявлена важность изучения молодых движений для познания закономер-

ностей проявления сейсмического процесса.

Д. И. Мушкетов представил и первый вариант карты сейсмического районирования Средней Азии с легендой, принятой и поныне: карта выполнена в виде изолиний разной балльности (V, VII и IX баллов). При ее составлении была сделана первая, еще очень несовершенная попытка применения тех принципов, о которых шла речь выше. На карте геологическая нагрузка невелика — выделены только зоны поднятий и депрессий, хотя в сопровождающем ее текстовом описании подчеркивается повышенная сейсмическая опасность участков, в пределах которых развиты различного рода дизъюнктивные дислокации — «места, где земная поверхность подвергалась и подвергается различного рода разрывам», сбросам, надвигам, где возникают «изогнутия и скручивания» и происходит переработка структур. Эти важнейшие критерии сейсмической опасности ни на самой карте сейсмического районирования Средней Азии, ни на другой какой-то схеме, ее предваряющей, не показаны вследствие, очевидно, слабой геологической изученности территории. Поэтому карта сейсмического районирования в основном отражает зарегистрированную к тому времени сейсмичность Средней Азии и является сейсмостатистической.

В последующие предвоенные годы интенсивно накапливался сейсмостатистический материал по различным регионам СССР, но основное внимание, по-прежнему, уделялось Средней Азии. Эта территория в течение длительного времени оставалась основным полигоном для установления связей между геологическими и сейсмическими явлениями [44]. Уже в 1936 г. Сейсмологический институт АН СССР подготовил карту сейсмического районирования всей территории Советского Союза. Хотя карта не сопровождалась объяснительной запиской, она, как и предшествовавшая карта сейсмического районирования Средней Азии, сейсмостатистическая и составлена без учета геологических данных.

Новый вариант карты сейсмического районирования СССР был подготовлен Г. П. Горшковым [45]. При проведении работ по составлению этой карты вновь была сделана попытка учесть имеющуюся геологическую информацию для прогнозирования потенциальной сейсмической опасности. Однако на новой карте были лишь несколько расширены границы зон высокой балльности за счет вновь зарегистрированных к тому времени землетрясений, а также на основании некоторых общих закономерностей связи между геологическими и сейсмическими явлениями.

Для Крымского региона, в частности, реализовано представление о важном значении поперечных структур в проявлении сейсмической активности; одна из этих структур располагается на линии Симферополь—Алушта и по ней уже от-

мечались землетрясения; по двум другим поперечным полосам (на меридианах Судака и Симеиза) предполагаемое увеличение сейсмичности нашло отражение на новой схеме. Для территории Туркмении было высказано предположение о связи крупных землетрясений со структурами первого порядка (зоной сочленения Туркмено-Хорасанских гор с депрессией Каракумов), землетрясений средней силы — со структурами второго порядка (антиклинориями и синклинориями) и т. д.

Тем не менее на новой карте сейсмического районирования эти и некоторые другие установленные к тому времени закономерности проявления сейсмичности не нашли еще полного отражения, что привело при ее составлении к ошибкам типа «пропуск цели». Совершенно справедливо В. В. Белоусов писал: «Принцип составления этой карты состоит в предположении, что где-либо происходившие ранее землетрясения данной максимальной силы могут повториться. При этом условия возникновения землетрясений, их связь со строением земной коры и тектоническими движениями были использованы в самой общей форме» [5, с. 209].

В конце 40-х годов И. Е. Губин [50] сформулировал «сейсотектонический метод» сейсмического районирования, суть которого можно свести к следующему. Землетрясения связаны с разрывами, видимыми на земной поверхности или предполагаемыми на глубине, с местами активного развития структур. Разрывы, следовательно, являются поисковыми признаками для выявления мест, опасных в сейсмическом отношении. Разрывы различаются между собой в зависимости от того, какие структуры они разделяют, поэтому необходимо классифицировать структуру и разделяющие их разрывы, с которыми связаны различные типы землетрясений. После проведения такой классификации необходимо выделить структуру и разрывы, еще не проявившиеся в сейсмическом отношении (или проявившиеся в меньшей степени, чем «эталонные»), аналогичные тем, в пределах которых зарегистрированы землетрясения определенной силы, но при этом исходный уровень сейсмичности «эталонных структур» и соответствующих им разрывов оценивался сейсмостатистическим методом (по уровню максимальных зарегистрированных землетрясений). Именно поэтому суть метода заключается не в нахождении максимального уровня сейсмичности каким-то независимым от сейсмостатистических данных путем, а в экстраполяции данных сейсмостатистики в пространстве.

Этот цикл работ И. Е. Губина вызвал критику со стороны ряда специалистов, занимавшихся вопросами сейсмического районирования [5, 8].

Хотя проблема прогноза места и силы возможных землетрясений не была полностью решена в работах И. Е. Губина [50], принципиальные исходные положения сейсотектониче-

ского метода в позднейших его вариантах [52—55] вряд ли можно оспаривать. Нам представляется, что итоги обсуждения сеймотектонического метода И. Е. Губина имели большое значение для дальнейшего развития методов сейсмического районирования с привлечением геологических данных. Заслуга его заключается прежде всего в том, что он подверг резкой критике сеймостатистический метод и предложил некоторые приемы и способы проведения экстраполяции определенных геологических условий в пространстве.

Создавшееся положение позволило довольно четко наметить пути, по которым должно было пойти развитие геологических методов при проведении сейсмического районирования. В общей форме этого сделал В. В. Белоусов: «В основе сейсмрайонирования должно лежать комплексное геолого-геофизическое изучение сейсмической области, включающее всестороннее изучение сейсмического режима в сопоставлении его с тектоническим развитием и строением крупных структур земной коры, сопровождаемое применением новых методов изучения строения земной коры и сейсмических явлений» [5, с. 219].

В дальнейшем в ИФЗ АН СССР сейсмогеологические исследования пошли по трем основным направлениям: 1) изучение связей между геологическими и сейсмическими явлениями в различных регионах СССР и выделение геологических критериев сейсмичности; 2) развитие тектонофизических методов и тектонофизическое обоснование геологических критериев сейсмичности; 3) практическое внедрение полученных результатов при составлении новых вариантов карт сейсмического районирования территории СССР.

В 40—60-х гг. в различных регионах СССР развернулись широкие сейсмогеологические исследования, проводившиеся специалистами разных институтов Академии наук СССР и ее Сибирского отделения, академий наук союзных республик и учреждений другого ведомственного подчинения. В частности, большая работа была проведена коллективом сотрудников ИФЗ АН СССР под руководством В. В. Белоусова. Результаты этих региональных исследований в пределах областей альпийской складчатости и послеплатформенной активизации новейших тектонических движений нашли отражение в публикациях В. В. Белоусова [5—7, 9], М. В. Гзовского [39—42], А. В. Горячева [48, 49], И. В. Кирилловой [56—60], В. Н. Крестникова [63—65], Н. Н. Леонова [67], Б. А. Петрушевского [95, 96, 98—101, 103], В. А. Растворовой [30, 107, 109, 110], И. А. Резанова [111—114], Г. И. Рейснера [70, 117], Е. М. Рудича [128], А. А. Сорского [60, 137].

В результате этих исследований были изучены конкретные сейсмогеологические условия и выявлены связи геологических и сейсмических явлений в пределах таких крупных регионов, как Кавказ, система Туркмено-Хорасанских гор, Памир,

Тянь-Шань, система поднятий Джунгарского Алатау и Тарбагатая, Алтай, Саяны, Тува, зона перехода от Азиатского континента к Тихому океану, Северо-Восток СССР. Эти связи оказались сложными и многообразными не только в областях, различающихся по особенностям древнего и новейшего плана развития и соотношению этих планов в пространстве, но и в пределах, казалось бы, однородных в тектоническом отношении территорий.

Уже с самого начала региональных работ выяснилось, что сейсмические явления невозможно связывать с каким-то одним геологическим признаком: связь их с новейшими движениями и с новейшей структурой проявлялась только в самом общем виде, и не существовало пропорциональной зависимости между интенсивностью этих движений и уровнем зарегистрированной сейсмичности; землетрясения часто связывались с разломами, но не везде эта связь выражалась в явной форме, а во многих случаях зоны активных разломов оказывались практически асейсмичными; не обнаружилось универсальных закономерностей в связи сейсмичности с глубинным строением, распределением аномальных геофизических полей.

В 1955 г. Б. А. Петрушевский [95] сформулировал представление о связи землетрясений с крупными структурными комплексами земной коры, развитие которых обусловлено глубинными процессами. В более поздних работах [Петрушевский, 96, 98—100, 102, 103] эти представления были уточнены и детализированы. В частности, были выделены три типа областей, в пределах которых связи между геологическими и сейсмическими явлениями проявляются по-разному — альпийская геосинклиналь, платформа и переработанная (активизированная) платформа. Для каждой из этих областей были намечены частные геологические критерии сейсмичности. В альпийской геосинклинальной области сейсмичность увеличивается, например в районах тектонической перестройки, на платформе — в тех участках, которые имеют более молодой возраст складчатости, на активизированных платформах — в местах, где фиксируется дробная дифференциация новейших тектонических движений. При этом отдельные крупные зоны отличаются одна от другой по некоторым важнейшим показателям сейсмического режима: в пределах переработанных платформ землетрясения отмечаются реже, чем в альпийской зоне, но они сильнее.

На материалах по Кавказу и смежным регионам И. В. Кириллова и А. А. Сорский проанализировали связи геологических и сейсмических явлений в альпийской складчатой области [60]. Они сделали вывод о возможности выделения общих и частных геологических критериев сейсмичности. Первые связаны с характером проявления новейших тектонических движений — с их интенсивностью и изменением в новейшее время об-

щей направленности развития по сравнению с более ранними этапами. Эти критерии определяют уровень сейсмичности обширных по площади территории, таких как Кавказ в целом. Внутри крупных регионов пространственное распределение зон различной сейсмичности обусловлено закономерностями распространения частных геологических критериев сейсмичности. К их числу относятся перестройка современного рельефа, контрастность проявления новейших (особенно четвертичных) тектонических движений, градиент этих движений, зоны активных в новейшее время глубинных разломов по границам крупных геотектонических элементов с различной, резко меняющейся во времени направленностью тектонических движений.

Особое внимание И. В. Кириллова и А. А. Сорский уделили зонам поперечных (по отношению к простираению главных структурных элементов складчатой области) поднятий различного порядка. Главные из них пересекают всю складчатую область и продолжаются в обрамляющей платформе, другие не выходят за пределы альпийской зоны, третьи ограничено проявляются в отдельных ее частях. К частным геологическим критериям сейсмичности относятся, кроме того, полосы проявлений новейшего вулканизма.

На Кавказе к зоне контрастного проявления новейших тектонических движений приурочена активная в сейсмическом отношении полоса южного склона Восточного Кавказа (по границе с Алазано-Агричайской депрессией). Высокими градиентами новейших движений отличаются такие сейсмические районы Восточного Кавказа, как Шемахинский на южном его склоне и Махачкалинский — на северном. С зонами глубинных разломов, активных в новейшее время, связано проявление высокой сейсмичности в полосах, обрамляющих Куринскую и Рионскую межгорные депрессии.

И. В. Кириллова и А. А. Сорский составили карту геологических критериев сейсмичности Кавказа, на основе которой подготовили макет карты сейсмического районирования этого региона [60].

Изучение геологических критериев сейсмичности продолжалось при подготовке Сеймотектонической карты Европы [9]. В ходе ее составления сделаны выводы о приуроченности высокой сейсмичности к областям быстрой перестройки тектонического плана, где подвергаются раздроблению и распаду древние устойчивые в течение длительного времени поднятия. Особо опасными считались районы, в пределах которых отмечается большое число разных геологических критериев сейсмичности.

Для Средней Азии были получены материалы о тесной связи сейсмичности с характером проявления тектонических движений на новейшем этапе развития, с градиентами скорости вертикальных новейших и четвертичных движений [39, 41]. Были предложены методы построения карт градиентов скоро-

сти вертикальных тектонических движений [116], а также подробно рассмотрены связи геологических и сейсмических явлений в пределах Алтае-Саянской области [70, 99, 117—119].

В нашу задачу не входит подробная характеристика перечисленных работ геологов ИФЗ АН СССР. Следует лишь подчеркнуть, что на основе специальных сейсмогеологических исследований для различных регионов установлено большое число геологических критериев сейсмичности. Главнейшие из них характеризуют определенные черты развития территории в течение длительных отрезков геологической истории. Среди них выделяются следующие зоны: 1) сочленения крупных структурных комплексов, отличающихся характером проявления новейших и современных тектонических движений; 2) недавней переработки древнего структурного плана; 3) высоких значений градиентов вертикальных тектонических движений (новейших, четвертичных и современных); 4) проявления молодого (неоген-четвертичного) вулканизма; 5) поперечных поднятий различного порядка; 6) высоких градиентов аномальных геофизических полей, смещений на границах разделов в земной коре и верхней мантии и т. д.

Это направление сеймотектоники продолжает развиваться вплоть до настоящего времени. В ряде регионов СССР проводится анализ связей геологических и сейсмических явлений и выделяются геологические критерии сейсмичности. Наиболее полно результаты работ этого направления отражены в сборниках [131, 132].

Вопрос о геологических критериях сейсмичности несколько позже специально разобрали Н. И. Николаев и П. Н. Николаев [83, 84], разработавшие стохастическую модель сеймотектонических связей. Последняя исходит из признания множественности факторов, часто взаимосвязанных, регулирующих сеймотектонический процесс. В этом случае действие каждого геологического критерия сейсмичности протекает в различных условиях, в связи с чем все сеймотектонические связи невозможно представить в виде простых функциональных зависимостей. Соответственно нельзя однозначно утверждать, что величине геологического критерия соответствует строго регламентированное значение определенного сейсмологического параметра: это соотношение можно ожидать только с какой-то степенью вероятности.

Вместе с тем указанные исследователи подметили большую неопределенность многих геологических критериев сейсмичности, создающую значительную сложность в установлении их корреляционных связей с параметрами сейсмического режима. В особенности это относится к геологическим критериям, характеризующим режим новейших тектонических движений. Специальный анализ позволил предложить ряд новых количественных характеристик различных сторон кинематики тектониче-

ских движений, таких, как тектоническая активность (пропорциональная импульсу давления суммарных тектонических сил), величина горизонтального взаимодействия между блоками с потенциальным полем скоростей, дробность тектонических движений [86, 89].

Вопрос о физических связях между геологическими и сейсмическими явлениями рассмотрел М. В. Гзовский [33, 35, 37, 38], предложивший тектонофизическое обоснование геологических критериев сейсмичности. По его мнению, общий признак зон наибольшей сейсмической опасности — существование в их пределах максимальных градиентов скорости новейших и современных вертикальных тектонических движений. М. В. Гзовский [33] предложил сопоставлять геологические условия не только с силой толчка в эпицентре, но и с его энергией, что означало переход к новому циклу исследований, направленному на прогнозирование зон возникновения землетрясений (с различным потенциальным уровнем энергии), а не зон сотрясения различной интенсивности. М. В. Гзовский вывел уравнение, связывающее силу и повторяемость землетрясений с геологическими критериями сейсмичности. Суть его заключается в том, что энергия землетрясения вполне определенным образом связана с рядом величин, поддающихся изучению геологическими методами.

Таким образом, теоретически была обоснована возможность прямой оценки максимальной энергии вероятных землетрясений в любом районе. Практически же провести такие расчеты было невозможно (как невозможно их осуществить и в настоящее время) прежде всего потому, что механические свойства земной коры и ее вязкость в области максимумов касательных напряжений могут быть оценены только в качественной форме.

Практическое применение развиваемых М. В. Гзовским представлений сводилось к созданию в том или ином регионе определенной «иерархической» лестницы районов. Последние отличаются по степени сейсмической опасности в зависимости от геологических критериев сейсмичности, в первую очередь величины градиента скорости вертикальных тектонических движений [34, 39, 41, 42]. Оценка максимальной силы (энергии) землетрясений, возможных в пределах районов, определялась непосредственно или в скрытой форме на основе сейсмостатистических данных в зависимости от количественных соотношений между тектоническими движениями и интенсивностью землетрясений.

Нам представляется, что работы М. В. Гзовского внесли большой вклад в развитие методов выделения зон, опасных в сейсмическом отношении. В них впервые дана физическая интерпретация данных о геологических критериях сейсмичности, материал о которых был накоплен в результате прове-

дения сейсмогеологических исследований в различных регионах СССР; впервые теоретически обоснована возможность независимой от сейсмостатистических данных оценки потенциальной сейсмической опасности на основе геологических критериев сейсмичности; впервые предприняты попытки установления количественных соотношений между максимальной энергией землетрясений и геологическими критериями сейсмичности. Участвуя в работах по геологическому обоснованию карт сейсмического районирования Средней Азии, М. В. Гзовский развивал новые методы использования геологических данных (в частности, метод выделения квазиоднородных зон), которые нашли практическое применение при составлении последних трех вариантов карты сейсмического районирования территории СССР.

Первым практическим шагом по внедрению представлений, появившихся в результате проведения региональных исследований, было создание новой карты сейсмического районирования территории СССР под редакцией С. В. Медведева и Б. А. Петрушевского [73]. Она существенно отличалась от рассмотренных ранее значительно большими площадями зон высокой (VIII, IX) балльности. Для некоторых районов это было обусловлено появлением сейсмостатистического материала, однако в ряде районов изменения в карту были внесены с учетом данных о той конкретной геологической обстановке, которая была выяснена сравнительно недавно. Карта не сопровождалась подробным геологическим обоснованием, поэтому не всегда ясно, чем обусловлено изменение на ней контуров зон разной балльности по сравнению с более ранними картами. Это обстоятельство вызвало критику со стороны ряда специалистов [52, 136].

К моменту составления следующего варианта карты сейсмического районирования территории СССР [130] сложились некоторые общие приемы и методы учета геологических данных при составлении нормативных карт, были разработаны методы накопления сейсмостатистических данных, в том числе и палеосейсмогеологический, который развивали главным образом специалисты Института земной коры Сибирского отделения АН СССР [133, 136, 142, 143].

Полигоном для разработки палеосейсмологического метода и его апробации послужили слабозаселенные пространства Восточной Сибири и Прибайкалья, сейсмичность которых до недавнего времени считалась пониженной из-за отсутствия надежных сейсмостатистических данных [73]. Широкое развитие гражданского и промышленного строительства, развернувшегося здесь с 50-х годов, потребовало по-новому оценить сейсмическую опасность этих территорий, что при отсутствии данных сейсмостатистики привело к необходимости разработки нового метода накопления сведений о сейсмичности на

основе анализа геологических данных. Суть палеосейсмогеологического метода заключается в следующем. В пределах различных районов изучаемой территории путем геологического и геоморфологического анализов (в том числе материалов аэрофотосъемки) устанавливаются формы рельефа (палеосейсмодислокации), которые могут быть интерпретированы как следы, оставленные на земной поверхности катастрофическими землетрясениями недавнего геологического прошлого. Сравнение этих палеосейсмодислокаций с теми нарушениями земной поверхности, которые возникали при катастрофических землетрясениях различной интенсивности и достаточно надежно описаны специалистами, позволяет установить интенсивность доисторических землетрясений и оценить тем самым потенциальную сейсмическую опасность районов, где имеются палеосейсмодислокации.

Авторы считают, что «палеосейсмогеологический метод на современной стадии своего развития позволяет определять высший предел сейсмической активности для локальных районов, что недоступно ни для одного из существующих методов сейсмического районирования. С его помощью можно перейти от общего к детальному сейсмическому районированию даже для территорий, для которых сейсмостатистический материал скуден или отсутствует совсем» [142, с. 33].

Нам представляется, что палеосейсмогеологический метод вряд ли настолько универсален. В рельефе земной поверхности, особенно в горных областях с большой глубиной эрозионного расчленения, где интенсивно протекают гравитационные процессы на склонах, существует большое число форм рельефа, внешне весьма сходных с дислокациями, возникающими при землетрясениях, но имеющих иное происхождение [94, 129]. Это обстоятельство заставляет с большой осторожностью относиться к выводам о наличии ряда палеосейсмодислокаций в некоторых областях, принадлежащих к зоне альпийской складчатости.

Н. И. Николаев [82] специально проанализировал особенности палеосейсмогеологического метода, указав на его многочисленные недостатки.

К настоящему времени не существует еще твердо обоснованной сравнительной шкалы, которая позволила бы классифицировать те или иные палеосейсмодислокации в зависимости от их типа, размеров, положения и степени выраженности в рельефе, схожести с дислокациями, возникающими при катастрофических землетрясениях, а также от некоторых других показателей и относить их к последствиям прошлых землетрясений различной интенсивности.

Палеосейсмогеологический метод вряд ли применим в сейсмоопасных зонах, в которых максимальная интенсивность землетрясений не превышает IX баллов. Эти зоны, как изве-

стно, занимают наибольшую площадь на картах районирования СССР. Интенсивно протекающие в горных районах денудационные процессы успевают за сравнительно короткий срок уничтожить следы деформаций, возникающих на дневной поверхности в результате землетрясений, особенно в районах с теплым и влажным климатом. Только те дислокации на земной поверхности, которые возникают при очень сильных землетрясениях, могли сохраниться с доисторических времен.

Нельзя не согласиться с Н. И. Николаевым, писавшим: «При всей убедительности привлекаемых данных и делаемых из них выводов, «палеосейсмогеологический» метод не является в настоящее время столь разработанным, чтобы принимая его, можно было бы делать категорические выводы, как, например, считать, что на Кавказе, для южного и северного склонов Главного Кавказского хребта, устанавливаются 9-ти и 10-балльные зоны» [82, с. 174].

Не отрицая перспективности развития палеосейсмологического метода, мы, однако, считаем, что изучение палеосейсмодислокаций дает возможность фиксировать (в лучшем случае) результаты уже свершившегося события. Следовательно, этот метод, строго говоря, статистический. Но статистические характеристики накапливаются в этом случае не путем использования сейсмологических данных (инструментальных и исторических), а путем применения в основном геолого-геоморфологических методов. Поэтому палеосейсмогеологический метод не лишен общего недостатка, свойственного всем статистическим методам: там, где палеосейсмодислокации зафиксированы, наличие сейсмической опасности, несомненно (если, конечно, сейсмогенный характер дислокаций доказан), отсутствие палеосейсмодислокаций еще не говорит о сейсмической безопасности. Поэтому при проведении сейсмического районирования возникает необходимость использовать для прогнозирования сейсмической опасности какие-то другие геологические методы. Эта необходимость возникает еще и потому, что палеосейсмодислокации распространены на площади сейсмоопасных зон неповсеместно.

Карта сейсмического районирования территории СССР (1967 г.) впервые сопровождалась геологическим обоснованием, выполненным в виде карт, характеризующих структуру и историю развития ряда регионов в течение длительных промежутков времени, охватывающих альпийский цикл и новейший этап. Для некоторых регионов была сделана попытка оценить относительную опасность входящих в них зон на основе геологических критериев сейсмичности. Этой оценке в ряде случаев придавалось на итоговой карте сейсмического районирования такое же значение, как и сейсмостатистической. Для многих районов на предварительной стадии была выявлена потенциальная сейсмическая опасность на уровне

очаговых зон и только на завершающей стадии она была охарактеризована в баллах (интенсивности возможных сотрясений на поверхности).

Хотя карта 1967 г. была несколько изменена по сравнению с вариантом 1957 г., ей все же свойственны определенные недостатки, обусловленные следующими причинами. Карта составлялась большим коллективом авторов из различных учреждений. При подготовке макетов по отдельным регионам исходный геологический материал собирался и обрабатывался по разной методике. На карте 1967 г. почти не нашли отражения результаты проведенных в СССР обширных геофизических исследований, давших интересный и во многом совершенно новый материал о глубинном строении ряда сейсмических областей. Зоны возникновения землетрясений охарактеризованы по большей части не в шкале энергий (магнитуд), а в шкале интенсивности. Хотя методика геологического обоснования была перспективной, при применении ее на практике не удавалось объективно оконтуривать зоны с разным потенциальным уровнем сейсмической опасности, возникала возможность для «вольного» толкования исходного геологического материала при экстраполяции статистических данных в пространстве. Это было связано с рядом причин — в первую очередь с отсутствием строго определенных (даже в качественной форме) соотношений отдельных геологических критериев сейсмичности и особенно их комбинаций с уровнем сейсмической опасности.

В 1968 г. по заданию Европейской сейсмологической комиссии группа специалистов ИФЗ АН СССР на примере Кавказа разработала методику выделения зон с различной M_{\max} [1, 24, 139]. Этот цикл работ представляет, пожалуй, наиболее полное и детальное описание «традиционного» геологического обоснования карт сейсмического районирования.

Указанная методика является многоступенчатой и состоит из следующих основных стадий: 1) накопление исходных геологических данных в виде карт историко-тектонического районирования, новейших и современных тектонических движений, изостатических аномалий силы тяжести и их градиентов; 2) составление промежуточных карт геологических критериев сейсмичности и относительной сейсмической опасности (квазиоднородных зон с одинаковым уровнем сейсмической опасности) по геологическим данным; 3) сопоставление карты относительной сейсмической опасности с распределением очагов зарегистрированных землетрясений и составление итоговой карты зон возникновения возможных землетрясений с различной M_{\max} .

В дальнейшем эта же методика была использована группой специалистов ИФЗ АН СССР, Института геофизики АН Украинской ССР и его Львовского филиала и Института гео-

логии и геофизики АН Молдавской ССР для составления карты максимальных возможных сотрясений Юга европейской части СССР [27, 75].

Опыт методических работ по Кавказу и Югу европейской части СССР был использован впоследствии, когда в 1971—1975 гг. развернулась подготовка нового варианта нормативной карты сейсмического районирования территории СССР. Первым шагом на пути ее создания была разработка «Методических рекомендаций по сейсмическому районированию территории СССР» [75]. Этот документ существенно отличается от ранее существовавшего [74] следующими особенностями:

1. В отличие от всех предшествующих карт сейсмического районирования, на новой должны быть показаны зоны возможного возникновения очагов землетрясений с дифференциацией их по магнитуде (6,1—7,0; 7,1—8,0; >8,1).

2. Для составления итоговой карты зон возможного возникновения землетрясений с различной M_{\max} рекомендовано широкое привлечение данных об аномалиях силы тяжести; геофизических материалов о структуре фундамента и строении земной коры; геологических, геоморфологических и геодезических сведений в виде серии обязательных исходных (историко-тектонического районирования, новейших и современных движений, разломной тектоники) и промежуточных (геологических критериев сейсмичности, зон возникновения очагов землетрясений по геологическим данным) карт.

3. К методическим рекомендациям [75] в качестве примеров выполнения некоторых разделов исследований приложены работы коллективов авторов по составлению карты возможных максимальных сотрясений Юга европейской части СССР и оценка максимальных магнитуд землетрясений по комплексу геолого-геофизических данных с помощью одного из методов математического прогнозирования на примере Кавказа.

В 1973—1975 гг. группа специалистов ИФЗ АН СССР и Института геологии и геофизики АН Молдавской ССР приняли участие в контрактных (по договору с ЮНЕСКО) работах по «Балканскому сейсмическому проекту», а также в исследованиях по геологическому обоснованию карт сейсмического районирования стран-участниц КАПГ, при выполнении которых использовались модернизированные варианты «традиционной» методики выделения зон с различной M_{\max} [23, 154, 162, 164]. Результаты этих исследований ниже будут изложены подробнее.

Необходимо отметить еще одно направление прогнозирования потенциальной сейсмической опасности, развиваемое в работах Ю. В. Ризниченко. Первоначально определение K_{\max} основывалось в них только на сейсмологических данных [121, 123], а затем с использованием некоторых геологических па-

раметров [124, 125]. Этот метод подвергся справедливой критике ряда исследователей [90, 145, 164], указавших на использование в нем ложных корреляций, несправедливости некоторых исходных положений (о стационарности сейсмического режима во времени), слабой возможности использования метода при решении практических задач по определению степени потенциальной сейсмической опасности небольших по площади районов.

В начале 70-х годов в развитии сейсмогеологических исследований наметилась новая тенденция комплексного использования разнообразных геологических и геофизических данных с помощью их формализации и машинной обработки. В этом отношении показательна работа А. А. Борисова и Г. А. Шенкаревой [14], в которой высокосейсмичные области Кавказа и западной части Средней Азии разбиты на 52 структурных элемента по морфологическим и тектоническим признакам и каждый из них был описан 22 формализованными признаками*. Очевидно, опубликованная статья — начальный этап исследования, так как в ней еще не сформулированы практические результаты сравнения сейсмичности и геологических условий и не показано, как такие результаты можно было бы использовать для сейсмического районирования. Методические же выводы А. А. Борисова и Г. А. Шенкаревой, касающиеся необходимости комплексного учета геологических данных и выводы о частном характере сейсмогеологических связей, полностью отвечают взглядам автора настоящей работы. Работы этого направления отражены в другой публикации А. А. Борисова [13].

Примером исследования, где сейсмогеологическая экспериментальная задача поставлена и успешно решена, является совместная работа, выполненная ИФЗ АН СССР, Институтом прикладной математики АН СССР и Институтом географии АН СССР [32]. В ходе ее выяснено, в каких дизъюнктивных узлах на востоке Средней Азии могут возникать землетрясения с магнитудой около 7. При решении задачи были подвергнуты формализации и введены в решение главным образом геоморфологические признаки. В результате было выделено шесть неизвестных узлов высокой сейсмической опасности и установлено, что наиболее информативны данные о зонах пересекающихся разломов, об относительных превышениях и абсолютных высотах в пределах узлов, о типах рельефа, сочетающихся в одном узле, о характере распространения «рыхлых толщ».

Легко заметить, что перечисленные признаки — это те же характеристики, которые выделялись и в более ранних исследова-

* Примерно такой же подход использовала Г. А. Шенкарева [146] при изучении сейсмичности Италии.

дованиях. В частности, относительные превышения поверхности (сформировавшиеся в новейшее время) коррелируются с величиной градиента новейших движений, абсолютная высота — с амплитудой этих движений. Интересен признак, связанный с распространением рыхлых толщ. Авторы работы не дают геологического истолкования полученного ими результата: высокой сейсмичности соответствует большая или малая (но не средняя) площадь рыхлых толщ. Нам представляется, что этот признак также тесно коррелируется с интенсивностью новейших или четвертичных движений — опусканий (когда создаются условия для интенсивного накопления рыхлых толщ) или воздыманий (когда денудация приводит к выходу на дневную поверхность пород фундамента). Выводы, полученные на материале для Средней Азии, были распространены и на районы иного тектонического строения. Эти выводы однако не имеют столь большого значения для внешней зоны альпийской складчатой области из-за меньшей приуроченности очагов землетрясений к определенным морфоструктурным единицам.

В этом же направлении работает другая группа специалистов ИФЗ АН СССР совместно с сотрудниками Института проблем передачи информации (ИППИ) АН СССР. Результатом этих исследований явилось решение (на примере Кавказа) экспериментальной задачи по выделению зон возникновения землетрясений с различной M_{\max} . Этот цикл работ и дальнейшие разработки «формального» метода, сведения о которых частично опубликованы [16—22, 26, 28, 29, 150, 151], являются предметом специального обсуждения в данной работе и будут подробно рассмотрены в последующих главах.

Подведем некоторые итоги краткого исторического обзора развития методов выделения зон возникновения землетрясений с использованием геологических данных.

При составлении последних вариантов нормативной карты сейсмического районирования территории СССР геологические данные привлекаются во все большем объеме. Теперь уже ни у кого не вызывает сомнений, что эти данные необходимы для оценки на научной основе потенциальной сейсмической опасности в областях, подверженных землетрясениям.

Вместе с тем существующие традиционные методы перехода от исходной геологической информации к зонам возникновения землетрясений разработаны недостаточно полно, о чем свидетельствуют «неожиданные» сейсмические события, происходящие в местах, показанных на картах сейсмического районирования как «благополучные». Примером может служить Газлийское землетрясение в Узбекистане [104]. Более того, среди геологов, занимающихся вопросами сейсмотектоники, вплоть до настоящего времени нет единого мнения по таким кардинальным вопросам, как исходные данные, необхо-

димые для сейсмотектонического анализа, геологические критерии сейсмичности, их удельный вес при выделении зон возникновения землетрясений и т. д.

Все это требует более полной и всесторонней разработки традиционных методов геологического обоснования нормативных карт сейсмического районирования. Вместе с тем традиционные методы по своей природе ограничены. При интуитивном подходе нет возможности полностью использовать обширную и всестороннюю геологическую информацию для оценки потенциальной сейсмической опасности. Не случайно поэтому появление в сейсмотектонике нового направления, основанного на формализации геологических материалов.

Хотелось бы подчеркнуть, что и традиционные, и формальные методы выделения сейсмоопасных зон базируются на одной и той же основе — исходных геологических данных. Поэтому в последующем изложении следует в первую очередь остановиться на их характеристике, отметить способы и методы их накопления, а также определить необходимый и достаточный объем исходных геологических материалов для последующих стадий сейсмотектонического анализа.

Глава II

ИСХОДНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ СЕЙСМИЧНОСТИ

1. ИСХОДНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Достаточно определенно установлено [9], что регионы с различной в течение длительных промежутков времени (палеозой, мезозой, кайнозой) историей геологического развития, отличающиеся между собой глубинным строением и характером геофизических полей, в различной степени опасны в сейсмическом отношении. Областям альпийской складчатости свойственны, например, иные показатели сейсмического режима (меньшая максимальная энергия землетрясений, сейсмическая активность и т. д.), чем областям послеплатформенной активизации, или рифтовым системам. Однако до сих пор еще нет единого мнения о том, какие именно особенности геологического развития определяют фон сейсмичности, присущий различным тектоническим зонам.

Геологические критерии сейсмичности выявляются при сопоставлении исходных геологических данных, соответствующим образом обработанных и унифицированных, с материалами сейсмостатистики. Следовательно, вопрос об этих исходных данных является чрезвычайно важным во всех сейсмотектонических исследованиях. Вместе с тем литература по сейсмотектонике показывает, что этот вопрос является остро дискуссионным. В некоторых работах рекомендуется изучение современных и молодых (голоценовых, четвертичных) тектонических движений. Считается при этом, что они должны сопоставляться с данными по сейсмичности в первую очередь, поскольку наиболее близки к землетрясениям сегодняшнего дня по времени проявления [11, 51, 52, 92, 105—106]. Вряд ли вызывает сомнение необходимость изучения указанных движений. Однако они отражают только одну из сторон тектонической обстановки и должны дополняться другими данными.

Сложность часто заключается в том, что по ряду горных стран мы вообще не располагаем материалами о современных движениях, которые основаны на результатах повторных нивелировок. Это заставляет многих исследователей в своих работах делать ряд оговорок при сопоставлении геологических

материалов с сейсмологическими. Наиболее часто допускается, что современные и молодые движения близки новейшим по характеру и интенсивности проявления [51, 117]. Более подробно этот вопрос рассмотрен А. А. Никоновым [92].

Большинство исследователей не подчеркивает явно, какие именно особенности истории развития территории важны для сопоставления с сейсмичностью. Однако не трудно установить, что по большей части сейсмичность сопоставляют с молодыми и новейшими тектоническими движениями и новейшей структурой [51, 52, 55, 69, 71]. Также поступает большинство авторов сборника [132]: П. С. Кармазин, Р. А. Агамирзоев, Г. П. Симонян, Р. Н. Ибрагимов, О. К. Чедия и др. В противоположность этому Б. А. Петрушевский [95, 99, 100, 102, 103] развивает представление о необходимости тщательного анализа особенностей истории развития в течение длительных промежутков геологического времени — в палеозое, мезозое и кайнозое.

Опыт изучения сейсмогеологических условий ряда регионов СССР и зарубежных территорий показал, что основным исходным геологическим материалом для целей сейсмического районирования, является историко-тектонический анализ [9, 60]. При этом анализе используются существующие методы изучения вертикальных тектонических движений (например, анализа фаций и мощностей отложений) для разных отрезков геологической истории. Общие требования к исследованиям такого типа достаточно хорошо известны. Главное из них — необходимость выделения участков, различавшихся в течение определенных отрезков времени знаком и интенсивностью проявления вертикальных тектонических движений, определение границ таких участков, совпадающих большей частью с зонами длительно развивавшихся разломов в земной коре, выявление структурно-исторических элементов, характеризующих поперечную геотектоническую зональность различного ранга и т. д.

В настоящее время анализ связей геологических и сейсмических явлений немислим также без привлечения данных о новейших тектонических движениях, охватывающих неоген и четвертичное время. Изучение этих явлений проводится различными методами [81], а основным приемом изучения их суммарных проявлений до сих пор остается анализ современного положения различных геоморфологических уровней. Этот прием впервые в нашей стране применил Д. П. Резвой [115] при построении карты деформаций (в изолиниях) дотретичной поверхности выравнивания северного склона Туркестанского хребта и прилегающих районов Ферганской межгорной депрессии. Впоследствии этот метод использовался для изучения новейших деформаций дотретичной поверхности выравнивания Тянь-Шаня [48, 63], Средней Азии [42], ряда других

регионов и территории СССР в целом [85].

Карты новейших тектонических движений несут большое количество информации, необходимой для сопоставления геологических явлений с сейсмическими. Они позволяют оценить интенсивность и контрастность движений больших регионов и отдельных их частей, тектоническую активность разломов различного порядка и величину перемещения по ним в новейшее время, размеры блоков с разнонаправленными (контрастными) движениями и т. д. Однако этому направлению исследований присущ весьма существенный недостаток, чрезвычайно важный с точки зрения оценки сейсмической опасности: они характеризуют средние амплитуды тектонических движений за очень большие (даже в геологическом смысле) отрезки времени порядка 10^6 млн. лет. Тем самым вне поля зрения исследователя остаются такие важные вопросы геологической истории, как оценка периодичности проявления новейших движений, изменения их интенсивности во времени и, в конечном счете, их направленности. И если решение этих вопросов не так существенно для участков земной коры, которые на протяжении длительных периодов времени характеризуются постоянной тенденцией к воздыманию (или опусканию), то для промежуточных зон, которые как раз и характеризуются повышенной сейсмической опасностью, выяснение этих вопросов является важнейшей задачей, стоящей перед исследователем.

В связи с этим в настоящее время все большее число специалистов, занимающихся изучением связи геологических и сейсмических явлений, привлекают к анализу сведения о тектонических движениях за более короткие отрезки времени. Для этой цели составляются карты четвертичной тектоники (продолжительность четвертичного периода оценивается в 0,6—2 млн. лет), плейстоценовой тектоники (сотни тысяч лет), голоценовой тектоники (тысячи лет) и современных движений (от нескольких до десятков лет). В зависимости от степени изученности того или иного региона и подготовленности исследователей первые две из отмеченных карт могут составляться в изолиниях скоростей поднятий или опусканий отдельных участков, характеризовать количественно градиент скорости вертикальных тектонических движений территории или отражать ее подвижность в качественной форме.

Карты голоценовой тектоники обычно показывают проявление движений в качественной форме, поскольку их размах не настолько велик, чтобы эти движения можно было бы оценивать количественно геологическими методами. Следует, правда, отметить, что предпринимаются попытки количественной оценки и голоценовых тектонических движений [11, 61]. При проведении этих исследований большая роль отводится, помимо чисто геологических, геоморфологическим методам. В особенности это относится к областям поднятий, в пределах

которых молодые кайнозойские отложения развиты прерывисто или совсем отсутствуют, а также к самым молодым периодам этапа активизации, изучение которых основано на анализе террасовых рядов по долинам рек.

К настоящему времени достаточно определенно установлена связь пространственного распределения землетрясений с зонами высоких значений градиентов скорости новейших и четвертичных тектонических движений. Впервые на наличие такой связи обратил внимание М. В. Гзовский [33]. Методы определения градиента скорости новейших и четвертичных тектонических движений и составления карт их распределения в пространстве были разработаны М. В. Гзовским, В. Н. Крестниковым и автором [39, 40, 41, 116]. Сопоставление величин градиентов скорости новейших и четвертичных тектонических движений с распределением сейсмических явлений было проведено затем на примере многих регионов Советского Союза [1, 11, 24, 34, 36, 37, 38, 66, 70].

Можно даже сказать, что в сеймотектонике, особенно после работ М. В. Гзовского [33, 39], наступил период «градиентной моды». В указанных работах было высказано предположение о возможном существовании прямой связи между величиной градиента скорости тектонических движений и степенью потенциальной сейсмической опасности. Некоторые практические результаты исследований казалось бы подтверждали это предположение.

Более поздние работы того же авторского коллектива в Центральной части Тянь-Шаня [41] показали, однако, что эта связь далеко не однозначна. К аналогичному выводу пришли многие исследователи анализировавшие сеймотектонические условия ряда регионов [86, 87, 90, 141].

Тем не менее градиент скорости новейших, молодых и современных тектонических движений, остается важной характеристикой тектонических движений, определяя меру их контрастности. Эти характеристики часто используются в сеймотектоническом анализе наравне с другими исходными данными.

Карты историко-тектонического районирования являются тем итоговым документом, составление которого необходимо для всех последующих операций по выделению зон с различным уровнем сейсмической опасности.

Цель составления карт историко-тектонического районирования — показать современную структуру территории и историю ее формирования во времени. Это означает, что на таких картах выделяются участки земной коры различного ранга, характеризующиеся различной геометрией, морфологией, внутренним строением, временем и историей формирования. Это также означает, что на таких картах должны быть показаны и охарактеризованы границы между главнейшими структур-

ными элементами территории в зависимости от их протяженности, ширины, глубинности, активности в течение тех или иных отрезков геологической истории, степени выраженности в современной структуре, рельефе и т. д. Именно эти сведения являются необходимыми для дальнейшего сопоставления геологических данных с сейсмологическими и выявления геологических критериев сейсмичности.

Нетрудно заметить, что такие карты могут быть составлены только на основании совместного анализа всех исходных геологических материалов, в той или иной степени описанных ранее — карт, характеризующих историю развития того или иного региона на альпийском этапе, этапе активизации тектонических движений (орогенном этапе для зон альпийской складчатости) и в отдельные его периоды, в современную эпоху.

Ниже (в гл. III) на примере Кавказа показан весь цикл сейсмотектонических исследований — от исходной геологической информации до выделения зон возникновения землетрясений с различной магнитудой.

Здесь лишь отметим, что разработанные И. В. Кирилловой и А. А. Сорским принципы историко-тектонического районирования по типам тектонического развития (в «динамическом» ключе) нашли дальнейшее широкое применение при сейсмотектонических исследованиях. По этим принципам была построена, в частности, и Сейсмотектоническая карта Европы, созданная коллективом ИФЗ АН СССР [9].

Таким образом, совершенно очевидно, что при проведении всех сейсмотектонических исследований на первой стадии необходим сбор обширного и разнообразного исходного материала. Как уже отмечалось, он включает проведение анализа истории развития той или иной территории на различных этапах, в том числе альпийском, новейшем, современном; построение ряда карт, таких как историко-тектонического районирования, новейшей тектоники, градиентов вертикальных движений; сбор данных о четвертичной и голоценовой тектонике. Эти материалы должны быть дополнены сведениями о глубинном строении и характере различных геофизических полей*. Автор уже обращал внимание на то, что при таком подходе будет собрана наиболее полная геолого-геофизическая информация обо всех сейсмоопасных районах, что позволит исключить все случайности, связанные с субъективностью в выборе исходных данных для дальнейшего сейсмотектонического анализа [120, 161].

* Вопрос об исходной геофизической информации требует специального анализа и в данной работе не рассматривается.

2. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ СЕЙСМИЧНОСТИ

Подготовкой исходных геологических материалов завершается первая фаза любых сейсмогеологических работ. На следующей стадии эти исходные данные сопоставляются с собственно сейсмологическими материалами. Целью такого сопоставления является выделение геологических критериев сейсмичности, определение которых дано в работе М. В. Гзовского: «Геологическими критериями сейсмичности определенной территории называются геологические признаки степени ее сейсмической опасности, которая характеризуется наиболее вероятной максимальной силой будущих сейсмических толчков и ожидаемой повторяемостью их во времени» [36, с.260]*.

Выделение геологических критериев сейсмичности обычно проводится путем сравнительного анализа сейсмотектонических условий различных территорий. Главной задачей при этом является сопоставление таких объектов, которые различались бы как можно меньшим числом признаков. Только в этом случае окажется возможным выявить те из них, которые ответственны за увеличение или уменьшение степени сейсмической опасности, т.е. являются геологическими критериями сейсмичности или асейсмичности.

При таком анализе наиболее естественным путем является постепенное сужение рамок исследования и охват ими все меньших по площади объектов. При этом число геологических признаков, характеризующих ту или иную территорию, будет постепенно уменьшаться за счет тех из них, которые свойственны более крупному объекту в целом.

Методическая сложность выделения геологических критериев сейсмичности в первую очередь обусловлена тем, что сопоставляются процессы и явления, которые протекали (и протекают) в разных временных масштабах. Поэтому в ряде случаев нет никаких гарантий того, что фиксируемые на глазах человечества сейсмические явления в действительности отражают все особенности присущего данному месту долговременного тектонического процесса. Отсутствие стационарности в проявлении сейсмического режима во времени даже для коротких его интервалов на примере ряда регионов СССР убедительно показал П. Н. Николаев [90]. Именно поэтому в некоторых зонах современный уровень сейсмичности вроде бы не соответствует характеру их геологической обстановки; однако утверждать это категорически невозможно. Такая неуверенность не может не сказаться на правильности выделения некоторых геологических критериев сейсмичности.

При сравнительном анализе геологических и сейсмиче-

* В настоящей работе вопросы повторяемости возникновения землетрясений не рассматриваются.

ских явлений не всегда удается подобрать пары объектов таким образом, чтобы они различались между собой только по одному геологическому критерию сейсмичности (только в этом случае возможно определить его связь с сейсмичностью). Мы показали ранее [70, 117], что «чистое» выделение геологических критериев сейсмичности удается в очень редких случаях. Как правило, имеющиеся различия в сейсмичности между сравниваемыми объектами с равной вероятностью могут быть объяснены тем или другим геологическим критерием сейсмичности из имеющейся их совокупности.

Если говорить о высоко сейсмичных регионах СССР, то их объединяет такой признак, как большая интенсивность проявления новейших и современных тектонических движений. Этот признак в равной мере свойственен совершенно различным геотектоническим зонам, например, альпийской складчатой области, области послеплатформенной активизации, рифовым системам, области перехода от Азиатского материка к Тихому океану.

Совершенно очевидно, следовательно, что главным условием возможности возникновения сильных землетрясений является наличие активного тектонического процесса. В идеальном случае он может быть охарактеризован за различные промежутки времени — на альпийском, новейшем этапах, четвертичное время и современную эпоху, а также на отдельных более коротких по продолжительности стадиях развития той или иной территории. Однако реальная, существующая в настоящее время, степень изученности позволяет характеризовать активность тектонического процесса на обширных по площади регионах (Кавказа, Тянь-Шаня, Алтае-Саянской области и др.) только в целом за новейший тектонический этап. Поэтому геологические критерии сейсмичности, связанные с режимом неотектонических движений, являются в большинстве случаев решающими для оценки уровня сейсмичности, независимо от наличия или отсутствия любых других геологических критериев сейсмичности. Точнее было бы это положение сформулировать от обратного: наличие в каком-то регионе любых комбинаций геологических ситуаций при слабом проявлении или отсутствии признаков, характеризующих неотектонические движения означает, что данный регион практически асейсмичен.

Достаточно хорошо известно, что активные в сейсмическом отношении области характеризуются тем не менее разным уровнем сейсмической опасности. Если говорить, например, о максимальной магнитуде землетрясений, то в области альпийской складчатости на территории СССР она не больше 6,9—7,0 (Кавказ, Крым, данные нового каталога, [93]), тогда как в областях послеплатформенной активизации, например, в Тянь-Шане, она превышает 8,0. В то же время по максималь-

ным показателям интенсивности и контрастности тектонических движений на новейшем этапе отмеченные регионы близки между собой. Амплитуды новейших поднятий в Тянь-Шане достигают 6000 м, на Кавказе 5000 м; разности амплитуд положительных и отрицательных движений в обоих регионах превышают 10 000 м, а величины градиентов скорости вертикальных тектонических движений на Кавказе даже больше ($0,1 \cdot 10^{-7}$ год $^{-1}$ и $1,0 \cdot 10^{-7}$ год $^{-1}$ соответственно).

Хотелось бы еще раз подчеркнуть, что наличие геологических критериев сейсмичности, характеризующих определенную активность новейших тектонических процессов тех или иных регионов, предопределяет их принадлежность к категории практически сейсмичных. Однако уровень сейсмической опасности зависит также и от геологических критериев другой группы. Эта группа определяет свойства среды, т. е. определенным образом связана с историей развития региона на этапах, предшествовавших неотектоническому.

Принадлежность региона к области завершенной палеозойской складчатости (Тянь-Шань, Алтае-Саянская область), или к области альпийской складчатости (Кавказ и другие сегменты средиземноморского пояса) является важнейшим геологическим критерием сейсмичности. Он определяет степень «жесткости» среды, способность ее к накоплению больших или меньших напряжений при проявлении в земной коре неотектонических процессов, а, следовательно, и возможность реализации землетрясений с большей или меньшей энергией. Сравнение Кавказа, где максимальные магнитуды землетрясений не превышали 6,9 с Тянь-Шанем, где возникали землетрясения с $M \geq 8,0$ представляется достаточно убедительным для иллюстрации этого вывода.

До сих пор мы говорили о геологических критериях сейсмичности, характеризующих площадные участки земной коры различного размера (сейсмические пояса, области с различным геотектоническим режимом, регионы внутри них и т. д.). Вряд ли требует особых доказательств то положение, что уровень сейсмичности, в том числе максимальная магнитуда землетрясений различных областей и регионов связана с критериями, определяющими интенсивность тектонического процесса и особенности геологического развития до этапа неотектонической активизации («жесткость» среды).

Нам представляется, что совокупность геологических критериев сейсмичности двух отмеченных групп определяет «сейсмический потенциал» определенной территории по выражению В. П. Солоненко [133]*.

* По всей вероятности лучше говорить о «сеймотектоническом потенциале», имея в виду то обстоятельство, что сейсмичность все-таки лишь одно из проявлений тектонического процесса.

Нетрудно заметить, что геологические критерии, характеризующие особенности неотектонического процесса и свойства среды, на которую этот процесс воздействует, многочисленны. Если говорить о первой группе, то это скорости (или амплитуды) неотектонических движений, их градиенты (или другие производные), неравномерность проявления новейших тектонических движений во времени (периодичность) и в пространстве (степень дробности или дифференцированности), соотношение новейшего тектонического плана развития с более древним (степень переработки древнего тектонического плана или унаследованности развития).

Если говорить о второй группе, то это возраст завершения складчатости геосинклиналичного этапа развития, характер и степень подвижности на этапах, предшествовавших неотектоническому, т. е. все те же критерии первой группы по отношению к более древним этапам геологического развития.

В разных регионах, геотектонических зонах эти многочисленные геологические критерии сейсмичности выступают в различных комбинациях, с разной степенью проявления, что собственно и определяет разный сеймотектонический потенциал этих территорий. Именно поэтому геологические критерии сейсмичности, имеющие отношение к потенциалу, могут условно называться общими. Они дают обобщенную характеристику той или иной области и, как правило, описываются в максимальных проявлениях. Если мы в предыдущих разделах указывали, например, что амплитуды новейших тектонических движений в Тянь-Шане превышают 6000 м, то это означало, что лишь в некоторых, весьма незначительных по площади участках этого региона можно фиксировать эти значения. Следовательно, общие геологические критерии сейсмичности, определяя возможный сеймотектонический потенциал определенной территории, вовсе не являются свидетельством того, что этот потенциал может быть достигнут во всех ее частях.

Поэтому И. В. Кириллова и А. А. Сорский отмечают, что эти геологические критерии сейсмичности «в основном могут свидетельствовать о тектонических процессах, идущих на более или менее обширной территории и таким образом являются лишь общими критериями, указывающими на возможность общего повышения сейсмической активности данной области. При их помощи трудно выявить места локализации очагов землетрясений» [60, с. 281].

С точки зрения оценки сейсмической опасности и ее районирования не меньший интерес для исследователя представляют геологические критерии третьей группы, определяющие места локализации землетрясений, пространственное расположение зон их возникновения.

Б. А. Петрушевский [96, 98, 99, 102, 103] неоднократно подчеркивал, что сильнеешие землетрясения, как правило, возни-

кают в зонах сочленения крупных структурных комплексов. По большей части эти зоны представляют собой длительно живущие глубинные разломы, контролирующие распределение блоков земной коры с разнонаправленными движениями.

Можно привести некоторые примеры таких зон сочленения крупных структурных комплексов, в пределах которых происходили сильнейшие землетрясения в тех или иных регионах: 1) зона сочленения Южного склона Восточного Кавказа с Алазано-Агричайской и Куринской депрессиями, неоднократно являвшаяся зоной возникновения Шемахинских землетрясений с $M=6,9$; 2) зона сочленения Копет-Дага с Предкопетдагским прогибом, в которой произошло Ашхабадское землетрясение 1948 г. с $M=7,3$; 3) зона сочленения Памира и Тянь-Шаня с Гармским землетрясением 1941 г. с $M=6,4$, Хаитским 1949 г. с $M=7,4$, Каратагским 1907 г. с $M=7,4$ и т. д.

Однако выделением таких зон сочленения крупных структурных комплексов не исчерпывается задача поисков геологических критериев сейсмичности. Дело в том, что и сами такие зоны даже в пределах одного и того же региона чрезвычайно разнообразны и по своему структурному положению, и по размерам, и по степени подвижности на различных этапах развития (в том числе и новейшем), и по соотношению разновозрастных структурных планов. Следовательно, в пределах таких зон должны чередоваться участки с большей или меньшей потенциальной сейсмической опасностью, т. е. участки с различными геологическими критериями сейсмичности.

Практически группа геологических критериев сейсмичности, определяющая места возникновения сильных землетрясений, включает весь многочисленный класс продольных и поперечных разрывных нарушений в земной коре, а также признаки их присутствия — зоны контрастных сочленений крупных структурных комплексов различного ранга, выраженных в виде глубинных, региональных и прочих разрывов, флексур, зон контрастного сочленения, высоких градиентов скорости неотектонических движений, аномалий разных геофизических полей. К этой же группе относятся места пересечения зон разрывных нарушений — дизъюнктивные узлы различной категории. Входящие в эту группу геологические критерии сейсмичности могут быть (вслед за И. В. Кирилловой и А. А. Сорским) названы условно частными.

Потенциальная возможность возникновения землетрясений определенной магнитуды зависит, в первую очередь, от размеров данной зоны — ее протяженности и глубины заложения. Очевидно, что разрывное нарушение протяженностью в 5—10 км не сможет реализовать землетрясение с $M=7,5$, размеры очага которого составляют около 200×50 км. Поэтому главными частными геологическими критериями сейсмичности

являются зоны сочленения крупных структурных комплексов с протяженностью в сотни и тысячи километров и соответствующей глубиной заложения. В этих зонах возникают наиболее сильные землетрясения в различных регионах. В то же время, возможность достижения сеймотектонического потенциала, присущего в принципе данной территории, определяется индивидуальными особенностями блоков земной коры, разделенных данной зоной разрыва. В этом случае критерии первых двух групп, характеризующие конкретные условия данной зоны разрыва также будут являться частными.

Условность выделения общих и частных геологических критериев сейсмичности как раз в том и заключается, что одни и те же из их числа в каких-то случаях выступают как общие, в других — как частные.

Опыт сопоставления геологических и сейсмологических данных показывает, что для разных регионов характерны одни и те же общие и частные геологические критерии сейсмичности, относящиеся к рассмотренным трем группам. Различия между регионами (а внутри них — между тектоническими зонами и отдельными структурами) по сеймотектоническому потенциалу, а также закономерности пространственного распределения сейсмических явлений находятся, вероятно, в тесной зависимости от типа комбинаций этих критериев и степени их выражения.

Глава III

ТРАДИЦИОННЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

Под традиционными методами выделения зон возникновения землетрясений с использованием геологических данных понимаются те из них, которые основаны на интуитивной оценке влияния геологических критериев сейсмичности и их комбинаций на потенциальную сейсмическую опасность. Мы уже отмечали, что эти методы в настоящее время наиболее распространены при геологическом обосновании нормативных карт сейсмического районирования территории СССР и ряда других стран. Поэтому следует рассмотреть их подробнее для того, чтобы оценить сильные и слабые стороны.

При работе по традиционной методике исследование проводится в несколько этапов, часть из которых уже знакома читателю по предыдущим главам. Это — накопление исходных геологических данных и подготовка исходных карт историко-тектонического районирования, новейших и современных тектонических движений, геологических критериев сейсмичности. Следующей стадией работы является составление карты относительной сейсмической опасности по геологическим данным. Завершает весь цикл подготовка карты зон возникновения землетрясений с различной M_{\max} .

В настоящее время сложилось несколько модификаций традиционной методики, различающихся между собой по тому, какие из числа геологических критериев сейсмичности используются на последних двух стадиях в качестве опорных. Это модификация с использованием модели сочленения крупных структурных комплексов, дизъюнктивного узла, дизъюнктивного узла со скользящей шкалой тектонической активности, или из различных их сочетаний. Нам представляется целесообразным рассмотреть их на примере тех регионов и областей, для которых эти модификации были разработаны впервые.

Модель дизъюнктивного узла в сочетании с моделью зоны сочленения крупных структурных комплексов впервые была применена для выделения зон возникновения землетрясений на территории Кавказа. Модель дизъюнктивного узла со скользящей шкалой тектонической активности использовалась для районирования территории Юга европейской части СССР,

а в несколько трансформированном варианте — для Балканского региона. В каждом случае предварительно вкратце будут рассмотрены исходные геологические материалы.

2. ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ КАВКАЗА

Геотектонические элементы Кавказа, составляющего часть альпийской складчатой зоны, испытали в течение альпийского цикла сложную историю развития. И. В. Кириллова, А. А. Сорский [60] и В. Н. Шолпо [147] выделяют несколько крупных этапов на протяжении альпийского цикла — доинверсионный (ранняя — средняя юра); частной инверсии геотектонического режима и борьбы восходящих и нисходящих движений (поздняя юра — эоцен) и общей инверсии (орогенный) с преобладанием поднятий (олигоцен — антропоген). Последний этап в свою очередь подразделяется на раннеорогенный (олигоцен — средний сармат) и позднеорогенный, или новейший (поздний сармат — антропоген).

Первый, доинверсионный, этап характеризуется относительно простым расчленением Кавказской области на крупные продольные неотектонические зоны, интрагеоантиклинали и интрагеосинклинали, главнейшими из которых являлись Большекавказская и Малокавказская. В их пределах в лейасе шло непрерывное прогибание с накоплением мощных песчано-сланцевых толщ. Распределение мощностей отложений лейаса показывает, что в пределах Большого Кавказа наибольшие опускания происходили в его восточной части, а наименьшие — в районе Транскавказского поперечного поднятия. В догере общее распределение зон воздымания и прогибания сохранялось примерно таким же, как и в лейасе, и преобладало накопление терригенных осадков. Лишь в байосе отмечаются значительные проявления вулканизма и связанное с ним формирование вулканогенных образований. В конце этапа проявляются тенденции общего поднятия, отражающиеся в преобладающем накоплении лагунных и угленосных фаций, незначительных по мощности.

Для первого этапа наряду с продольной, характерно проявление поперечной тектонической зональности, устанавливаемой на основании распределения фаций и мощностей отложений. И. В. Кириллова и А. А. Сорский выделяют следующие крупные области поперечных поднятий, развивавшиеся на этом этапе: Ставропольско-Дзирульское, Каспийское и Черноморское, разделенные Восточно- и Западно-Кавказскими зонами поперечных прогибаний.

Второй, инверсионный, этап развития (поздняя юра — эоцен) отличается дробной и более резкой продольной тектонической дифференциацией, возникшей в результате проявления

предкелловейских тектонических движений. На Восточном Кавказе и в его крайней западной части в осевых частях прогибов более раннего этапа развития возникают центральные поднятия, фиксирующие проявления частной инверсии геотектонического режима. Этот процесс приводит к перестройке тектонического плана территории Кавказа и резкому изменению распределения фаций и мощностей отложений по сравнению с первым этапом. В разрезах областей прогибания Большого Кавказа в значительном количестве появляются карбонатные осадки и лишь в узком и протяженном прогибе вдоль его южного склона происходит накопление мощных флишевых отложений.

В нижнемеловое время достаточно отчетливо проявляется поперечная геотектоническая зональность, что связано с развитием трех поперечных зон прогибания, охватывавших, в частности, Восточный Кавказ, Дагестан и район Военно-Грузинской дороги. Зона поперечного поднятия располагалась в пределах центральной части Западного Кавказа.

В течение второго этапа происходит разрастание поднятий, которые уменьшались по площади только в периоды общих прогибаний всей территории в целом, отвечающих эпохам значительных трансгрессий. Одна из них происходила в верхнемеловое время и в этот период полностью погруженными оказались Предкавказская суша и ранее существовавшие Каспийское и Черноморское поднятия. Другая трансгрессия развивалась в эоцене. Регрессия палеоценового времени не отвечала перестройке верхнемелового плана развития Кавказа.

В. Н. Шолпо [147] считает, что в течение второго этапа развития Кавказа можно фиксировать два цикла проявления колебательных движений второго порядка. Первый — от начала поздней юры до альб-сеномана, второй — с середины позднего мела до конца эоцена. Для начала каждого цикла характерно накопление трансгрессивной серии отложений, а иногда и формаций, свидетельствующих о некомпенсированности прогибаний. Завершается каждый цикл накоплением регрессивных серий с лагунными и угленосными осадками, свидетельствующими о «перекompенсации».

Третий этап начинается в олигоцене, когда происходит дальнейшее нарастание восходящих движений на всей территории Кавказа. Центральное поднятие на Большом Кавказе впервые за весь альпийский цикл развития стало единой в орографическом выражении зоной, которая постепенно захватывала прилежащие прогибы. Состав накапливавшихся в передовом и межгорном прогибах отложений показывает, что Кавказ в это время был еще довольно низкой сухой. Характерен тонкодисперсный обломочный материал, типичный для нижней молассовой формации. Наибольшее воздымание испытал блок Центрального Кавказа с обрамляющими частями

эпигерцинской платформы и Закавказского срединного массива. Области прогибания сосредоточились в основном в передовых прогибах (наложившихся частично на край платформы) и межгорных впадинах, хотя уже в миоцене развивающиеся поднятия захватывают краевые части этих молодых прогибов, вовлекая их в процесс поднятия. В это же время начинает развиваться складчатость в наиболее прогнутых частях Куринской впадины, в результате вторичной инверсии здесь также начинают формироваться поднятия, а область прогибания смещается к востоку; начинает оформляться и поднятие Терского и Сунженского хребтов в Терской депрессии, отесняя область прогибания к северу. Основная часть территории Кубанской депрессии остается областью прогибания.

На протяжении всего альпийского цикла отчетливо проявляется продольная зональность Кавказа. При этом окраины региона (южная часть эпигерцинской Скифской плиты и северная периферия Закавказского массива) испытывали колебательные движения меньшей амплитуды, чем внутренняя, собственно геосинклинальная зона Большого Кавказа. Эта продольная зональность отражается и в формациях, характерных для каждой зоны. Для внутренней зоны типичны геосинклинальные формации (аспидно-сланцевая, флишевая), а для окраинной — субплатформенные терригенные и карбонатные [147].

На протяжении всего рассматриваемого времени отчетливо выражена и поперечная геотектоническая зональность Кавказа. Западный Кавказ на всех этапах альпийского цикла прогибался относительно меньше, чем Восточный, что соответствует в современной структуре Транскавказскому поперечному поднятию. Как отмечает В. Н. Шолпо, поперечное расчленение Большого Кавказа наложено на преобладающую продольную зональность и как бы «просвечивает» сквозь нее. Причем на разных стадиях развития поперечная зональность проявляется то сильнее, то слабее. Так, четкое проявление поперечной зональности отмечается в тоаре-аалене, в неокоме и т. д. Следует однако отметить, что если границы между продольными геотектоническими зонами часто фиксируются как зоны длительно живущих глубинных разломов, поперечные зоны при всей беспорядочности их существования проявляются гораздо менее четко и в истории развития, и в структуре. Иногда они устанавливаются по максимальным воздыманиям осей продольных структур, подъему фундамента и т. п. Значительно реже удается установить поперечные глубинные разломы или флексуры, осложняющие крылья поперечных поднятий, хотя они имеют большое значение для формирования современной структуры.

Новейший тектонический этап характеризуется резким усилением интенсивности тектонических движений. Начало этих

движений в пределах Кавказа в целом датируется концом миоцена (позднесарматское время), а для последующего времени намечается несколько стадий (позднесарматско-среднемиоценовая, антропогеновая).

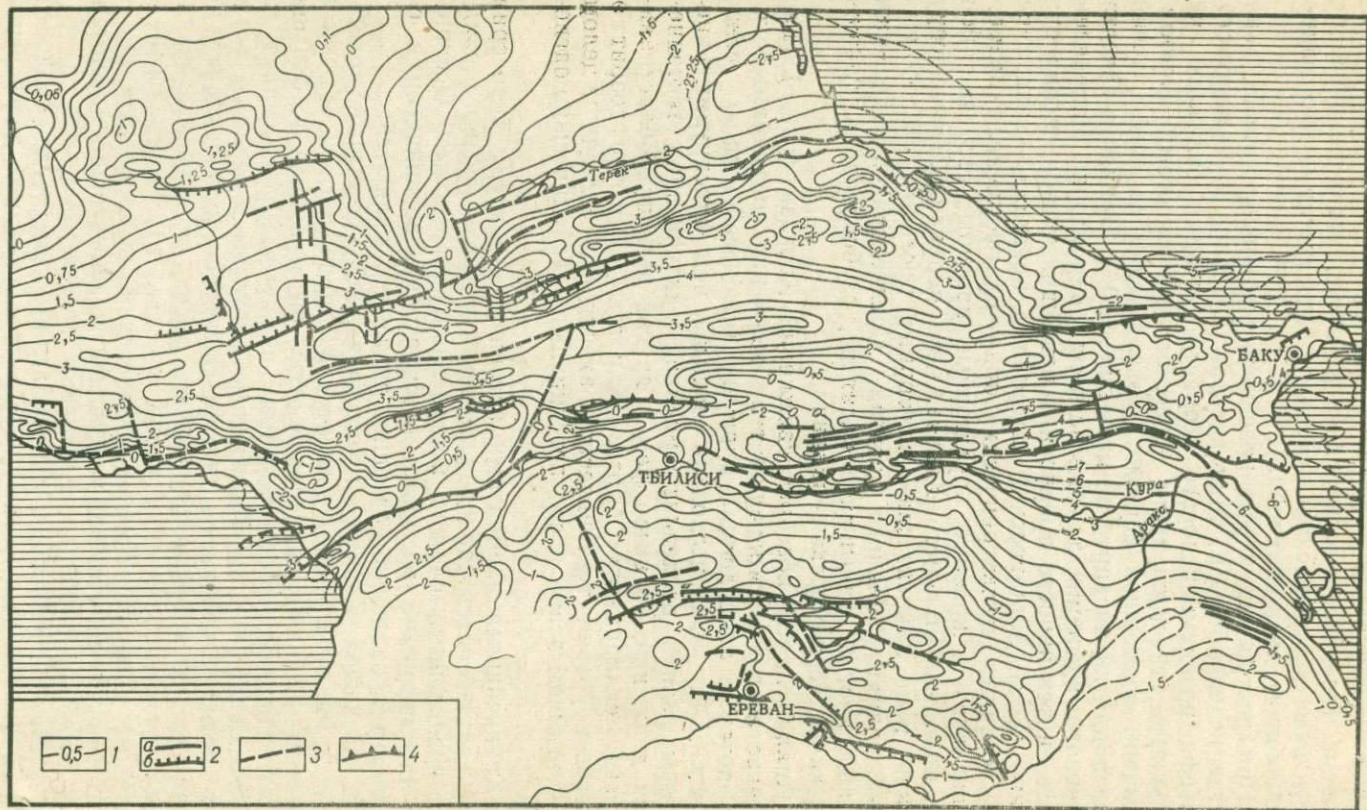
При построении карты новейшей тектоники региона в качестве исходной Е. Е. Милановский [76] принял поверхность рельефа позднемиоценового возраста, который отличался небольшими относительными абсолютными высотами. Поэтому величина возможной ошибки в определении амплитуд новейших поднятий на карте не превышает 10%. Приняв в качестве основного критерия для разделения территории направленность и интенсивность проявления новейших тектонических движений, Е. Е. Милановский выделил в пределах Кавказа девять главных неотектонических зон — платформенная область Предкавказья, краевые предгорные прогибы, сводово-глыбовое поднятие Большого Кавказа, его периклинальные погружения, пояс Закавказских межгорных прогибов, сводово-глыбовое поднятие Малого Кавказа, Средне-Араксинский межгорный прогиб, Талышское поднятие, глубоководная субокеаническая Черноморская впадина.

Анализ карты новейших движений Кавказа (рис. 1) свидетельствует что амплитуды этих движений соизмеримы с теми, которые отмечаются в других высокосейсмичных регионах СССР. Они несколько меньше, чем фиксируемые в некоторых зонах послеплатформенной активизации тектонических движений, но выше, чем в других регионах области альпийской складчатости (Крым, Карпаты). Все это говорит о высоком уровне тектонической активности региона в целом на новейшем этапе и его потенциальной сейсмической опасности.

Крупнейшими элементами новейшей структуры территории Кавказа являются сводово-глыбовые поднятия разного порядка, разделенные сложно построенными прогибами. Основными структурными элементами территории, возникшими в результате проявления новейших движений, являются:

1. Большой Кавказ, представляющий огромный пологий свод с максимальной амплитудой поднятия до +5 км (в среднем +2,5 км). С севера и с юга он ограничен по большей части продольными флексурами и разломами с амплитудой перемещения до 4 км. Поперечные флексуры и разломы разделяют Большой Кавказ на четыре сегмента (различающихся интенсивностью новейших движений, ролью складкообразования, разломов, магматических процессов и т. д.): Центральный (с древним ядром), Восточно-Кавказский, Северо-Западный и Юго-Восточный. Первые два сегмента, испытывающие максимальное новейшее поднятие, разделены пережимом.

2. Малый Кавказ с максимальной амплитудой поднятия 3,5 км (в среднем 1,8 км), с резко выраженной дифференци-



рованностью новейших движений и огромной интенсивностью молодого вулканизма. В конце этапа характерны перестройки с увеличением роли поперечных и субмеридиональных структурных элементов. В новейшей структуре выделяется несколько сегментов (Талышский и др.), аналогичные существующим на Большом Кавказе.

3. Предкавказская зона краевых прогибов четко разделяется на три сегмента, общих для самой зоны и эпигерцинской платформы: Кубанская и Терская впадины, разделенные Ставропольским сводом, сохранявшим на новейшем этапе тенденцию к относительному поднятию.

4. Закавказская межгорная депрессия делится поперечным Дзирульским массивом на два обширных и глубоких межгорных прогиба — Куринский и Рионский. Отмеченные прогибы в свою очередь разделяются на сегменты меньшего масштаба.

Более детальное рассмотрение показывает, что крупнейшие элементы новейшей структуры осложнены многочисленными флексуобразными перегибами, отраженными на рис. 1 ступенями изолиний, и молодыми разломами разной амплитуды. Последние по большей части унаследованы от предшествовавших этапов развития Кавказа.

Наиболее значительные по протяженности и амплитуде новейшего перемещения разрывы имеют продольное расположение и служат границами неотектонических элементов, таких как Большой и Малый Кавказ, или разделяют блоки внутри областей поднятий и прогибаний. В структуре они нередко находят выражение в виде крупных региональных флексур, над-и приразломных антиклиналей, систем мелких разрывов, грабенов и горстов. Большая часть продольных разломов, активных в новейшее время, относится к типу сбросов и взбросо-надвигов.

Среди поперечных нарушений подавляющее большинство представлено крутыми и вертикальными разрывами типа сбросов. Наиболее крупные и протяженные из них пересекают несколько неотектонических зон продольного простирания, другие не выходят за пределы Большого и Малого Кавказа, или отдельных зон внутри них. Зоны поперечных нарушений играют ведущую роль в расчленении новейшей структуры на поперечные сегменты.

Е. Е. Милановский [76] выделяет несколько фаз проявле-

Рис. 1. Карта новейшей тектоники Кавказа. По Е. Е. Милановскому [76] с упрощениями.

1 — изолинии новейшего поднятия и прогибания (предполагаемые — пунктиром); 2 — крупные разломы (а) и флексуры (б); установленные на поверхности; 3 — предполагаемые разломы в фундаменте; 4 — надвиги

ния новейших тектонических движений. Первая из них охватывала период времени с позднего сармата по средний плиоцен. Для нее характерно резкое усиление воздыманий Большого Кавказа, северной и восточной зон Малого Кавказа, возрастание интенсивности погружения зон краевых и межгорных прогибов. Важнейшим событием истории развития Малого Кавказа в этот период было мощное проявление субэральных извержений.

Вторая фаза проявления новейших тектонических движений приходилась на поздний плиоцен. Главными событиями этого времени были трансгрессии Каспийского бассейна, продолжающееся погружение западных и восточных поясов краевых и межгорных прогибов и складкообразование в некоторых зонах, интенсивное сводово-глыбовое воздымание и эрозивное расчленение Большого Кавказа, проявление в его пределах мощных вспышек наземного вулканизма.

Третья фаза новейшего этапа развития отмечалась в антропогене и отличалась наименьшей продолжительностью. Большой и Малый Кавказ в это время продолжали интенсивно воздыматься, разрастаясь на ряде участков в ширину и по простиранию, в соответствии с чем зоны интенсивных погружений смещались к периферии; вулканическая деятельность ослабла.

По мнению Е. Е. Милановского, основной тенденцией развития региона на новейшем этапе тектонического развития было последовательное ослабление роли продольной и усиление роли поперечной геотектонической зональности; при развитии этого процесса движения положительного знака концентрировались в области Транскавказского поперечного поднятия, а отрицательного — в поперечных Каспийской и Азово-Черноморской впадинах. В течение первой фазы проявления новейших тектонических движений расширилось Ставропольское поперечное поднятие, прекратилось осадконакопление в Восточно-Кубанском прогибе и Верхне-Куринской впадине. Дзирульское поднятие сочленилось с Окрибо-Сачхерским и с поднятием Большого Кавказа. Одновременно усилились опускания в наиболее удаленных от центральной части Кавказской области зонах Предкавказья и Закавказья. К концу второй фазы опускания прекратились на большей части Кубанской, Западно-Терской и Рюнской впадин и в осевой части Средне-Куринской впадины. К концу третьей фазы зона Транскавказского поднятия охватывала по существу большую часть региона, а прогибания продолжались лишь в периферических частях акваторий Черного и Каспийского морей.

Одновременно с этим в течение всего новейшего этапа последовательно расширялись поднятия Большого и Малого Кавказа. Лишь в пределах некоторых участков имел место обратный процесс — вовлечение районов поднятий в опускание.

Иногда это явление отмечается во внутренних частях Большого и Малого Кавказа, чаще же оно проявляется в захвате опусканиями их периферических зон.

Интересны закономерности размещения зон проявления на Кавказе новейшего вулканизма. Как показал Е. Е. Милановский, молодой вулканизм присущ всем продольным зонам Кавказа, причем в их пределах он приурочен к областям положительных тектонических движений. Особенно тесная связь молодого вулканизма отмечается с зоной поперечного Транскавказского поднятия: в ней наблюдаются все проявления вулканизма на Большом Кавказе, в Грузинском срединном массиве, в Ахалкалакской и большей части Центрально-Армянской областей.

Сопоставление неотектонического и более раннего этапа развития Кавказа позволило Е. Е. Милановскому [76] отметить унаследованность развития ряда структурных элементов разного порядка и выявить существование новейшей перестройки древнего структурного плана. Зонами унаследованного поднятия на новейшем этапе были Большой и Малый Кавказ, а унаследованного прогибания — периферические участки Азовской, Черноморской и Каспийской депрессий. Области унаследованного развития характеризовались на новейшем этапе наибольшими средними амплитудами и скоростями новейших тектонических движений. Остальная часть территории Кавказа испытывала на новейшем этапе изменение направленности тектонических движений, поэтому для нее характерны меньшие средние амплитуды и скорости движений.

Сопоставление тектонического развития Большого Кавказа с данными о современных движениях земной коры этого региона показывает, что основная тенденция современной перестройки тектонического плана заключается в разрастании областей современного прогибания, развивающихся на месте существовавших на новейшем этапе зон поднятия. Наиболее обширные области такой переработки выделяются в северо-западной части Большого Кавказа (западнее меридиана г. Сочи), в прилежащей части Прикубанья, на территории низовьев бассейна р. Терек, по периферии Куринской впадины и ряде участков на Малом Кавказе.

Описанные представления об истории развития Кавказа суммированы на карте историко-тектонического районирования этой территории, один из вариантов которой представлен на рис. 2. Он был подготовлен для геологического обоснования карты сейсмического районирования этого региона [1, 21]. Легенда этой карты составлена в «динамическом ключе» и отражает характер развития отдельных участков Кавказа в течение альпийского, новейшего этапов развития, а также современную структуру региона. Легенда карты представляет

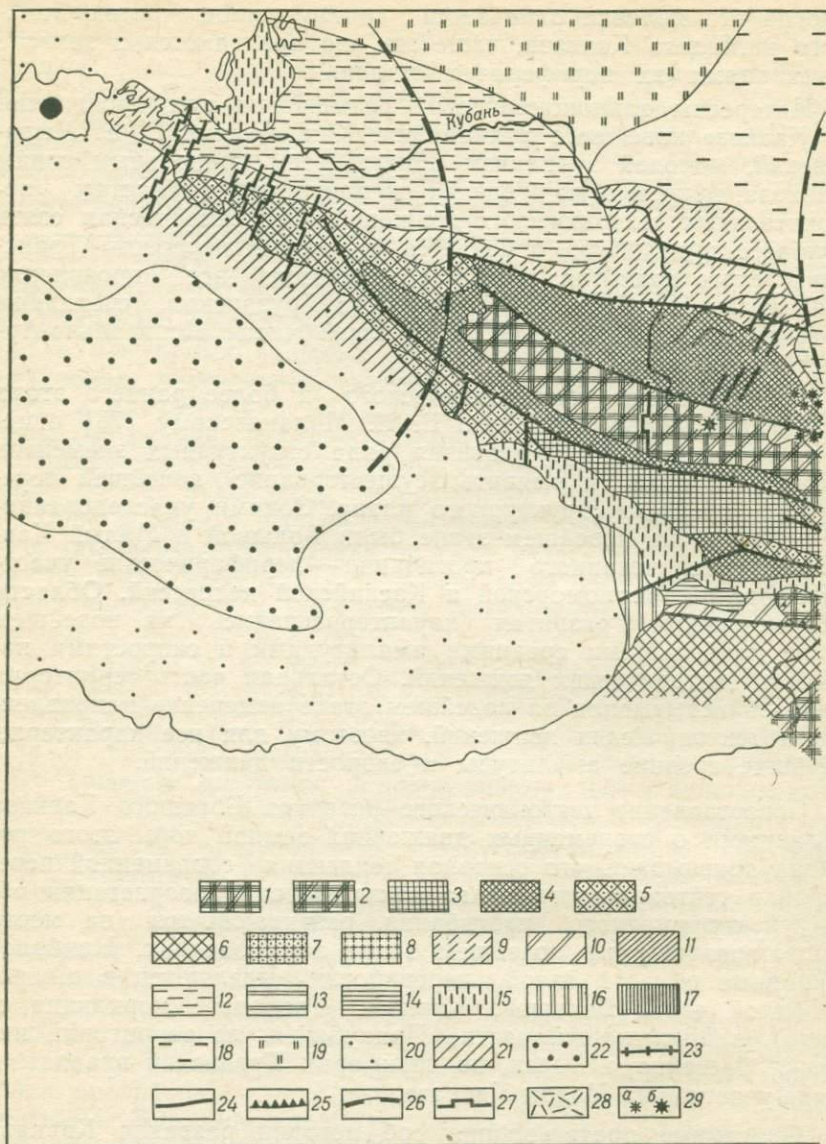
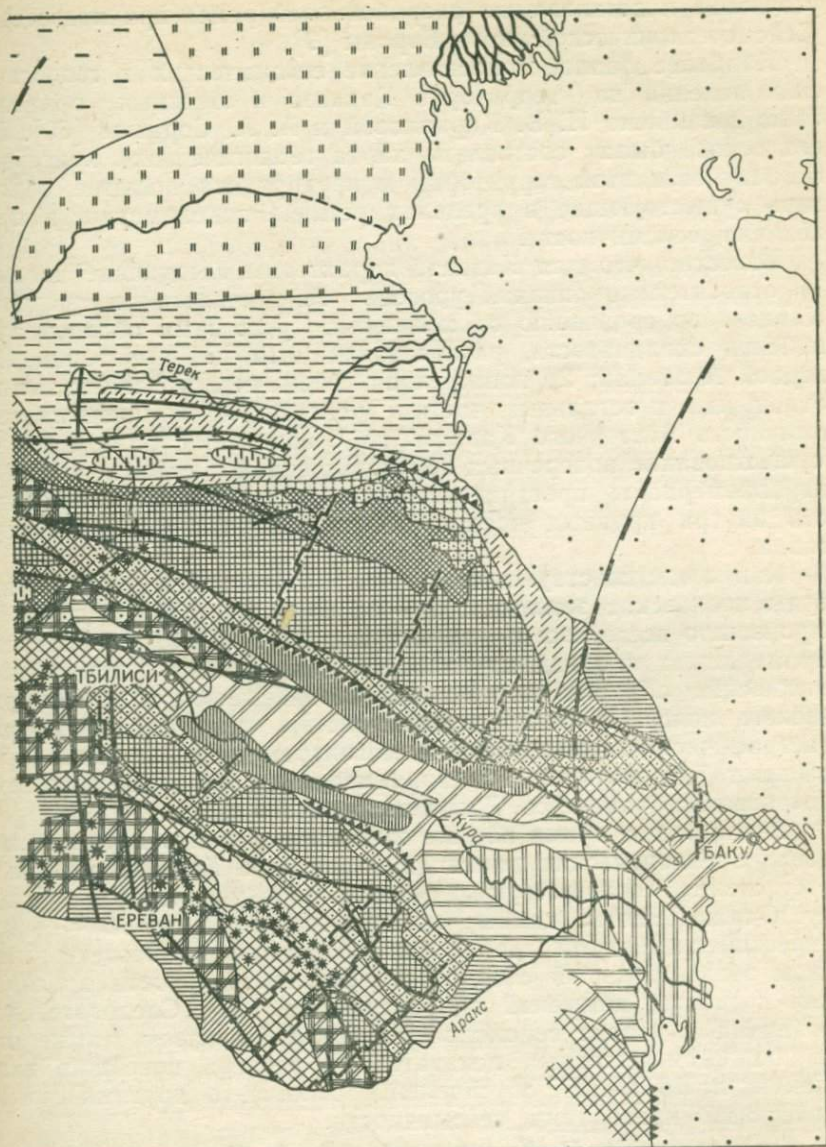


Рис. 2. Схема историко-тектонического районирования Кавказа [21]. Области устойчивые поднятия:

1 — испытывавшие дифференцированные глыбовые движения в неоген-четвертичное время; (3 — в пределах собственно геосинклинали, 4 — в пределах парагеосинклинали); 5—8 — со второй половины кайнозоя, 7 — в пределах парагеосинклинали с начала кайнозоя, пределах передовых прогибов; 10 — в межгорных впадинах; 11 — в наложенных впадинах; 13 — в межгорных прогибах; 14 — в наложенных впадинах; молодые интенсивно-наложенных впадинах. Альпийская платформа: 18 — опускания на герцинском складчатом Области на океанической коре: 20 — участки шельфа и континентального склона; 21 — ное время; 22 — глубоководные впадины внутренних морей с океанической и переход-Структурные элементы: 23 — крупные региональные разломы типа глубинных; 24 — ластей поднятий и прогибаний в неоген-четвертичное время; 26 — глубинные флексуры, нальную зону и затрагивающие смежные платформенные области; 27 — то же более широкого развития эффузивов неоген-четвертичного возраста; 29 — вулканы (а — нео-



ти на континентальной коре. Альпийская геосинклиналь:

2 — испытывавшие опускания в неогене; *новообразованные поднятия*: 3—4 — мезозойские кайнозойские (5 — в пределах собственно геосинклинали с начала кайнозоя, 6 — то же 8 — то же со второй половины кайнозоя); *опускания, закончившиеся в миоцене*: 9 — в нах; *опускания, происходившие в миоцен-четвертичное время*: 12 — в передовых пронах; *опускания*: 15 — в передовых прогибах; 16 — в межгорных прогибах; 17 — в основании в мезозое и палеогене; 19 — то же в неоген-четвертичное время. то же, испытывавшие резко дифференцированные глыбовые движения в неоген-четвертичной корой.

крупные разрывы, активные в новейшее время; 25 — зоны контрастного сочленения ограничивающие поперечные поднятия первого порядка, пересекающие всю геосинклиналь-высокого порядка, пересекающие две или более геотектонические зоны; 28 — области геновые и четвертичные; 6 — действовавшие в историческое время)

уточнение и детализацию разработанной ранее при подготовке Сейсмотектонической карты Европы [9].

Наиболее полное сопоставление сейсмических и геологических явлений на территории Кавказа и смежных областей было выполнено И. В. Кирилловой и А. А. Сорским [60]. На его основе была составлена карта геологических критериев сейсмичности этой территории и предпринята попытка объяснить существующие в пределах региона закономерности проявления сейсмичности.

Известно, что для Кавказа характерны следующие из них: 1) относительно низкий уровень сейсмичности в пределах Кавказа по сравнению со смежными участками области альпийской складчатости, располагающимися на территории Северной Анатолии; 2) повышенная сейсмичность Закавказья по отношению к остальным частям региона; 3) повышенная сейсмичность Восточного Кавказа по сравнению с Западным; 4) существование поперечных зон повышенной сейсмичности; 5) неравномерность пространственного распределения сейсмичности внутри крупных продольных структурных элементов региона.

Как свидетельствуют данные нового каталога [93], магнитуды кавказских землетрясений не превышают 6,9, а в XX в. произошло всего восемь землетрясений с $M \geq 6,0$. Анатолия принадлежит к одной из наиболее активных в сейсмическом отношении областей в пределах средиземноморского сейсмического пояса. В ее пределах известны многочисленные катастрофические землетрясения, магнитуды которых часто превышают 7,0, достигая 8,0 (например, одно из последних землетрясений в районе оз. Ван в ноябре 1976 г.).

В настоящее время нет возможности сравнить характер новейших тектонических движений Анатолии и Кавказа в связи с отсутствием соответствующих материалов по первому региону. Однако многие данные свидетельствуют о высокой тектонической активности территории Анатолии на неотектоническом этапе, большой степени дифференцированности проявления новейших движений в пространстве [60]. Следовательно, различия в уровне сейсмичности между Кавказом, также отличающимся высокими показателями режима новейших движений, и Анатолией обусловлены какими-то другими геологическими критериями сейсмичности.

По мнению И. В. Кирилловой и А. А. Сорского, одним из важнейших среди них является изменение направленности тектонических движений, перестройка более древнего тектонического плана на новейшем этапе развития. Однако этот геологический критерий сейсмичности в равной мере свойственен обоим сравниваемым областям в целом.

Единственное различие между ними состоит в том, что Большой Кавказ, с одной стороны, и Малый Кавказ со смеж-

ными частями Анатолии, — с другой, принадлежат различным геотектоническим зонам области альпийской складчатости — внешней и внутренней. Эти зоны отличались на альпийском этапе развития различной степенью подвижности и характером проявления вулканизма, разным типом соотношений новейшего и более древнего тектонического планов, степенью переработки последнего. В противоположность Большому Кавказу, который в целом отличался унаследованным характером развития на новейшем этапе, на территории Анатолии значительные площади занимают зоны устойчивых поднятий, испытывавшие в новейшее время раздробление с образованием систем грабен и горстов, геоантиклинальные поднятия с резко дифференцированным характером проявления новейших и более ранних движений, с неоднократной сменой их знака. Следовательно, высокий уровень сейсмичности Анатолии может быть обусловлен не только высокой степенью подвижности этой территории на новейшем этапе, но и характером ее геологического развития на более ранних этапах альпийского цикла.

По мнению И. В. Кирилловой и А. А. Сорского, всем зонам повышенной сейсмической активности Кавказа свойственна одна общая особенность, отличающая их от остальных частей региона. Все они в конце альпийского этапа развития испытали резкое изменение направленности тектонических движений. Так, в конце цикла прекратилось, сменившись поднятием, прогибание нагорного Дагестана и флишевой зоны южного склона Большого Кавказа, начала вновь подниматься Мисхано-Зангезурская зона, зародились и стали развиваться поднятия в пределах Рионо-Куринской депрессии.

Примерно в это же время прогибанием захватываются Араратская и Нахичеванская депрессии, Кусаро-Дербентское побережье и вся западная часть Каспийского моря; в самом конце цикла (в четвертичное время) южный край только что поднявшейся флишевой зоны Большого Кавказа был вовлечен в прогибание молодой Алазано-Агричайской депрессии. Следует заметить, что некоторые из упомянутых зон испытывали и в более ранние этапы альпийского цикла аналогичную перестройку тектонического плана. Так, например, Мисхано-Зангезурская зона в начале альпийского тектонического цикла являлась областью поднятия. Последовавшее в верхнем мелу дифференцированное прогибание привело к расчленению первичной геоантиклинальной зоны на поднятия и прогибы. В палеогене зоны прогибания несколько смещаются, интенсивность прогибания увеличивается, одновременно усиливается и дифференциация зон поднятия и прогибания. Происшедшее в неогене поднятие вновь превратило всю территорию Малого Кавказа в геоантиклинальную зону, однако мозаичность стро-

ения и разделение на отдельные блоки с дифференцированным характером движения сохранились и до сих пор.

Интрагеоатиклиналью являлась в начале альпийского цикла и Рионо-Куринаская зона, охваченная интенсивным прогибанием с конца мела — начала палеогена.

Следовательно, и в пределах Кавказа главное различие между его сейсмичными зонами определяется наличием или отсутствием зон перестройки древнего тектонического плана на новейшем этапе.

Вместе с тем зоны высокого проявления сейсмичности на Кавказе имеют и некоторые другие различия. Если сравнивать Восточный Кавказ с Западным, то они явно отличаются некоторыми параметрами режима новейших тектонических движений. Так, по И. В. Кирилловой и А. А. Сорскому, при примерно равных амплитудах этих движений, Западная часть Большого Кавказа начала подниматься раньше, чем Восточная и, следовательно, в пределах последней новейшие тектонические движения характеризовались большими скоростями. Этот геологический критерий может обуславливать более высокую сейсмичность Восточного Кавказа.

Далее И. В. Кириллова и А. А. Сорский еще более сужают рамки исследования, рассматривая все более и более однородные в тектоническом отношении (и все меньшие по площади) зоны Восточного и Западного Кавказа. Этот прием позволяет выделять более конкретные геологические критерии сейсмичности, с которыми связана пространственная локализация землетрясений.

На Восточном Кавказе наиболее сейсмична полоса вдоль его южного склона, отличающаяся активной тектонической перестройкой в четвертичное время. Косвенным ее отражением является наблюдаемый перехват долин ряда рек и различия в абсолютных высотах Главного и Бокового хребтов на участке между горами Казбек и Базар-Бюзи. Такая же перестройка характерна и для другой сейсмичной полосы в Сомхетском и Муровдагском хребтах Малого Кавказа. Однако степень ее контрастности здесь значительно меньше, что обуславливает, вероятно, относительно низкий уровень сейсмичности этой зоны по сравнению с южным склоном Восточного Кавказа.

Аналогично по степени контрастности проявления новейших тектонических движений (величине градиента их скорости) различаются например районы Шемахи и Северного Дагестана. В соответствии с этим Шемахинский район с высокой контрастностью движений, является и более сейсмичным.

Вместе с тем на Кавказе отмечается четкая приуроченность зон возникновения землетрясений к границам крупных геотектонических элементов региона. Некоторые из них развивались на протяжении всего альпийского цикла, другие проявляли повышенную тектоническую активность только на новей-

шем этапе. Одна из таких древних зон располагается вдоль Южного склона Восточного Кавказа, другая — по северному борту Ринской депрессии; обе отличаются скоплением очагов землетрясений.

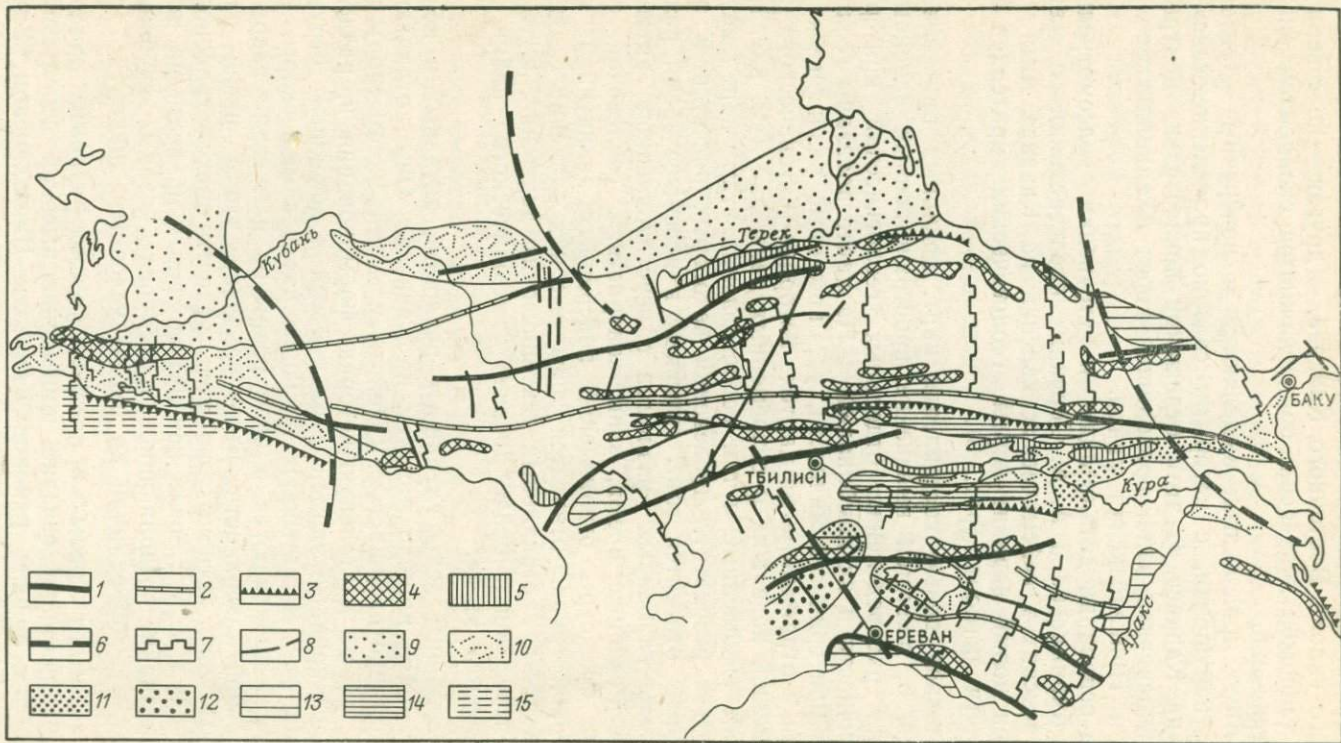
Помимо продольных, выделяются и поперечные тектонические нарушения, с которыми связано проявление сейсмичности на Кавказе. В этом отношении показательна центральная поперечная зона, проходящая через Ахалкалакское нагорье и Приказбекский район.

На основании детализации и уточнения рассмотренных И. В. Кирилловой и А. А. Сорским представлений о связи геологических и сейсмических явлений на Кавказе был составлен новый вариант карты геологических критериев сейсмичности региона (рис. 3).

Основной целью составления карт, подобных приведенной на рис. 3, является выяснение пространственных закономерностей распределения отдельных геологических критериев сейсмичности и их комбинаций. На карте показаны геологические критерии сейсмичности, установленные различными методами и отраженные на картах историко-тектонического районирования, новейших и современных движений (см. рис. 1,2), а также выявленные путем сопоставления этих карт между собой и в результате проведения некоторых расчетов. К числу первых относятся зоны активных в новейшее время разломов, зоны глубинных разломов с неустановленной активностью в новейшее время, зоны контрастных сочленений, глубинные флексуры ограничений поперечных поднятий и т. д. Ко второй группе относятся зоны высоких значений градиентов скорости вертикальных тектонических движений, а также зоны перестройки более древнего тектонического плана на современном этапе.

Продольные зоны глубинных разломов, активных в новейшее время, широко развиты на Кавказе. Они отличаются большой протяженностью (десятки и сотни километров) шириной, имеют длительную историю формирования и, разделяя наиболее крупные элементы альпийской и новейшей структуры Кавказа, захватывают большую часть земной коры. Они не всегда проявляются в виде разрывов или серии разрывов на дневной поверхности. Было показано, что с ними часто связаны зоны активных флексур, развивающихся грабенов и горстов и т. д. Мы сочли нецелесообразным привести на карте эти признаки, позволяющие трассировать зоны глубинных разломов, а объединили их одним условным знаком.

С зонами активных в новейшее время разломов продольного направления связано проявление высокой сейсмической активности в ряде районов Кавказа — Шемахинском, Зангезурском, Горийском, Ленинанском и др.



Особым знаком на рис. 3 выделены зоны контрастных сочленений различно движущихся блоков земной коры. Они отображают участки, в пределах которых в новейшее время и, особенно в четвертичное, формировались уступы в рельефе и участки, характеризующиеся большим перепадом высот на коротких расстояниях по заложению. Такие зоны контрастных сочленений располагаются в северном Дагестане, по южному обрамлению Среднекуринской низменности, по сочленению южного склона Восточного Кавказа с Алазано-Агричайской депрессией и в ряде других мест. С зонами контрастных сочленений часто связано проявление сильных землетрясений, таких как Дагестанское, Варташено-Нухинские, Кировабадские.

На первый взгляд кажется странным выделение на карте геологических критериев сейсмичности зон глубинных разломов, активность которых в новейшее время не установлена. Такой подход обусловлен двумя причинами. Во-первых, он отражает неуверенность в том, что эти разломы действительно пассивны на новейшем этапе — в горных областях установление новейшей активности разломов представляет труднейшую задачу, решаемую подчас только при комплексном подходе с использованием методов геологии, геоморфологии, геофизики и т. д. С этой точки зрения изученность многих горных районов Кавказа все еще остается недостаточной, а детальные работы в некоторых из них все время пополняют наши знания об активности тех или иных зон [108]. Во-вторых, даже пассивные зоны глубинных разломов в сочетании с другими геологическими критериями сейсмичности (например, зонами активных поперечных нарушений) часто могут быть потенциально опасными в сейсмическом отношении. Опыт сейсмогеологических исследований на Кавказе и в других сейсмоактивных районах показывает, что пассивные зоны глубинных разломов могут неожиданно «оживляться» [144].

Зоны нарушений, ограничивающих поперечные поднятия

Рис. 3. Геологические критерии сейсмической опасности Кавказа [21, 27].
 1 — зоны активных в новейшее время глубинных разломов; 2 — зоны глубинных разломов, активность которых в новейшее время не установлена; 3—5 — зоны контрастных сочленений (3 — крупные флексуры, 4 — зоны высоких (1×10^{-7} год⁻¹) значений градиента скорости новейших тектонических движений, 5 — то же в областях интенсивного проявления складчатости в кайнозойских отложениях); 6 — глубинные флексуры, ограничивающие в новейшее время поперечные поднятия первого порядка, пересекающие всю геосинклинальную область и затрагивающие смежные платформенные области; 7 — границы поперечных поднятий второго порядка; 8 — активные в новейшее время разломы; 9—12 — области современной перестройки новейшего тектонического плана, в которых опускания развиваются на месте поднятий (9 — раннечетвертичных, 10 — кайнозойских, 11 — мезозойских, 12 — устойчивых на протяжении всего альпийского цикла); 13—15 — опускания в плиоцен-четвертичное время (13 — в наложенных впадинах, 14 — в межгорных прогибах, 15 — в краевых частях акваторий)

различного порядка, также широко развиты на Кавказе. Как было показано, роль этих нарушений в современной структуре чрезвычайно велика. Многие из них имеют древнее заложение, другие проявляли активность только на новейшем этапе. Крупнейшие из них связаны с Транскавказским поперечным поднятием или с поднятиями отдельных крупных сегментов Большого и Малого Кавказа. Эти разломы отражаются на поверхности в виде широких ступеней и их систем, флексур разного порядка. Поперечные сбросы и флексуры часто контролируют распределение локальных структур новейшего этапа развития, таких как поперечные грабены и горсты. На Кавказе связь поперечных нарушений с проявлением сейсмичности сомнений не вызывает: в узлах их пересечения с продольными тектоническими нарушениями концентрируются наиболее опасные в сейсмическом отношении районы, к числу которых относятся, например, Ахалкалакский и Шемахинский.

Поперечные линейные трещины растяжения на Большом Кавказе и в западной части Малого Кавказа фиксируются во многих местах линейно вытянутыми цепочками вулканов, проявлявших активность в новейшее время, а также расположением вулcano-тектонических депрессий; Верхнечегемской, Эльбрусской, Верхнетерекской.

Показателем высокой тектонической активности отдельных районов являются зоны высоких значений градиента скорости новейших тектонических движений. Они фиксируют полосы большой контрастности проявления вертикальных движений, протягивающихся вдоль восточной части Большого Кавказа (по его северному и южному склонам, в районе перемычки между Центральной и Восточной частями Большого Кавказа), вдоль южной части Западного Кавказа, северной части Северо-Западного Кавказа и отчасти прослеживаются по ограничению Малого Кавказа. В основном они отображают зоны разломов на глубине, лишь частично проявившиеся в верхних этажах земной коры в виде разрывов, флексур и т. д. Исключение представляют, по-видимому, только некоторые зоны высоких значений градиента скорости новейших тектонических движений, связанные с массовым ростом складок с крутым наклоном крыльев. Возможно такова природа высокоградиентных полос в южной части Терской впадины, Северной и Центральной частях Нижнекуринской, в некоторых частях Рионской и в других местах. На необходимость дифференцированного подхода к оценке амплитуд и скоростей тектонических движений во впадинах, захваченных процессом молодого складкообразования указывал и Е. Е. Милановский [76].

Важным фактором, связанным с сейсмичностью, являются зоны перестройки древнего тектонического плана современ-

ными движениями. На карте геологических критериев сейсмичности выделены по этому признаку районы разных категорий. При их оконтуривании мы сравнивали карту современных тектонических движений [72] с картой историко-тектонического районирования (см. рис. 2). В соответствии с этим были приняты следующие градации: 1) зоны, в которых опускания развиваются на месте поднятий, существовавших с позднечетвертичного времени; 2) зоны, где такая же смена знака движений отмечается с кайнозоя и 3) то же с мезозоя; 4) опускания захватывают поднятия, устойчивые на протяжении всего альпийского этапа. В силу разной изученности современных тектонических движений в различных районах Кавказа, сведения о современной переработке древнего структурного плана неравноценны: они наиболее точны для зон обрамления Большого и Малого Кавказа, несколько хуже для внутренних частей поднятий, особенно Большого Кавказа. Смысл выделения разных категорий зон переработки основан на предположении, что наиболее опасными в сейсмическом отношении являются те из них, которые в течение длительных промежутков времени испытывали устойчивые движения одного знака, а на современном этапе — противоположного.

В зонах переработки древнего структурного плана повышение сейсмичности проявляется не вполне отчетливо. Возможно, это обусловлено недостаточной изученностью современных тектонических движений зон поднятий, в пределах которых располагаются наиболее активные сейсмические районы Кавказа. Возможно также, что зоны прогибаний, в которых участки переработки структур занимают наибольшие площади, вообще имеют более низкий уровень сейсмической активности по сравнению с поднятиями. Тем не менее с зонами переработки древнего тектонического плана на современном этапе можно связывать проявление сейсмичности в пределах Таманской периклинальной области Большого Кавказа, г. Кировабада, отдельные землетрясения в районе среднего течения р. Кубань и в других местах.

На карте геологических критериев сейсмичности выделены также районы интенсивных опусканий плиоцен-антропогенового возраста, происходившие в межгорных прогибах, наложенных впадинах и краевых частях акваторий Каспийского и Азово-Черноморского бассейнов.

После того, как выявлены геологические критерии сейсмичности, найден обучающий материал в виде геологического описания очаговых зон землетрясений с различной магнитудой, встает задача прогнозирования потенциальной сейсмической опасности с использованием геологических данных.

Внешне задача прогноза мест возникновения землетрясений выглядит чрезвычайно просто: необходимо в пределах

определенной территории отыскать участки, аналогичные по своим описаниям эталонным, т. е. тем, в пределах которых уже произошли землетрясения с той или иной магнитудой. На деле эта простота оказывается иллюзорной и выбор оптимальной методики прогноза был всегда и остается до сих пор самой тяжелой проблемой при выделении сейсмоопасных зон с использованием данных о геологических критериях сейсмичности. Это обусловлено многими причинами, например невозможностью найти в природе двух мест, являющихся копией одно другого, даже если ограничить их описание минимальным набором геологических критериев сейсмичности. Имеющиеся же эталонные описания включают большое число геологических критериев сейсмичности, каждый из которых имеет большое число градаций между крайними значениями. Другая причина — неизвестна информативность тех или иных геологических параметров и, соответственно, весомость отдельных критериев и их сочетаний при прогнозировании магнитуды ожидаемых землетрясений.

Отмеченная сложность перехода от геологических критериев сейсмичности и эталонных описаний мест возникновения землетрясений различной магнитуды к прогнозированию потенциальной сейсмической опасности порождает большое число подходов к этой проблеме и методов прогноза, лишь в большей или меньшей мере приближающихся к оптимальному.

Ниже рассмотрены некоторые традиционные методы прогноза, под которыми понимаются методы с использованием геологических данных без их формализации. В разработке этих методов, являющихся и поныне господствующими при проведении работ по сейсмическому районированию, автор принимал непосредственное участие.

Все традиционные методы прогнозирования сейсмической опасности многоступенчаты. Первая стадия сеймотектонических исследований была рассмотрена нами в предыдущей главе. На второй стадии выделяются зоны относительной сейсмической опасности по геологическим данным (квазиоднородные зоны по степени их сейсмической опасности.). И только на третьей стадии оценивается потенциальная сейсмическая опасность, исходя из максимального ее уровня, известного по данным сейсмостатистики лишь в отдельных участках той или иной квазиоднородной зоны.

Нетрудно заметить, что задача выделения квазиоднородных зон в качественной, традиционной форме практически трудно выполнима, если учесть большое число геологических критериев сейсмичности, учитывать которые необходимо при решении этой задачи.

Поэтому авторы различных методов прогноза делают попытки уменьшить число параметров геологического описания,

задаваясь заранее определенной моделью геологической ситуации, свойственной зонам возникновения землетрясений с определенной магнитудой. Само собой разумеется, что эти модели основаны на тех реальных соотношениях между геологическими условиями и сейсмичностью, которые выявляются в том или ином регионе после проведения специальных сеймотектонических исследований.

При использовании традиционной методики выделения зон возникновения землетрясений с различной магнитудой модель дизъюнктивного узла является наиболее популярной и чаще всего используется. Опыт сеймотектонических исследований в различных регионах показал, что наиболее часто сильные землетрясения происходят в узлах пересечения крупных разломов различного простирания. При составлении карты зон относительной сейсмической опасности Кавказа по геологическим данным (рис. 4) мы также исходили из представления о наибольшей опасности в сейсмическом отношении дизъюнктивных узлов, в которых пересекаются разломы различного направления — продольные, ориентированные в направлении простирания основных структурных элементов и поперечные, ориентированные по отношению к первым под некоторым углом.

К первой категории отнесены узлы пересечения активных в новейшее время продольных глубинных разломов с флексурами первого порядка, ограничивающими наиболее крупные поперечные поднятия. При построении карты ширина продольных и поперечных нарушений принималась равной 20 км, что примерно соответствует реальной ширине некоторых из таких зон, в которых проводились специальные исследования [21]. Зоны первой категории приурочены к Транскавказскому поперечному поднятию, остальные располагаются на границах крупных сегментов Большого Кавказа. Наибольшая полоса зоны (первый участок) протягивается в субмеридиональном направлении, пересекая поперечно новейшее поднятие Малого Кавказа: она представляет собой систему слившихся отдельных узлов вдоль Транскавказского поперечника. На северном его продолжении находится второй участок зоны, приуроченный к сочленению поднятия Большого Кавказа с Предкавказьем. Третий участок отвечает Шемахинскому району Большого Кавказа, а четвертый расположен на его Черноморском побережье.

Узлы пересечения продольных глубинных разломов с поперечными флексурами первого порядка считаются наиболее опасными, так как здесь как бы утраивается возможность возникновения землетрясений [60]. Может возникнуть подвижка по продольному шву, связанная с глубинными движениями, обуславливающими продольную геотектоническую зональность и развитие зон продольных разломов; такая же

подвижка может быть спровоцирована движением в более глубоком этаже, «управляющем» развитием поперечной геотектонической зональности; в этих же участках могут возникнуть подвижки по швам поперечного нарушения. По всей вероятности разный порядок поперечных зон может соответствовать и различной потенциальной сейсмической опасности узлов их пересечения с продольными элементами новейшей структуры. Поэтому на карте относительной сейсмической опасности выделены зоны второй категории, характеризующиеся наличием узлов пересечения активных в новейшее время поперечных ограничений поднятий второго порядка с глубинными разломами различного типа (активными в новейшее время и теми, активность которых в новейшее время не установлена). К этой же категории отнесены контрастные сочленения блоков, испытывающих на новейшем этапе движения разного знака.

Зоны второй категории занимают на Кавказе гораздо большие площади, чем первой. Во многих местах отдельные узлы слились между собой и образуют в плане вытянутые полосы значительной протяженности. Наиболее крупные из них располагаются в восточной части Малого Кавказа, по южному обрамлению Восточного Кавказа и на его северном склоне. Изолированные узлы имеются на Западном Кавказе, а более протяженная полоса отмечает область сочленения Кавказской суши с акваторией Черного моря.

Меньшей потенциальной сейсмической опасностью характеризуются зоны третьей категории. К ним отнесены участки активных в новейшее время продольных и поперечных тектонических нарушений разного порядка, располагающиеся вне узлов их пересечения. Такие зоны выделены на северо-западе Кавказа, в различных частях его северного склона, на поперечной перемычке между поднятиями Большого и Малого Кавказа, а также в субмеридионально вытянутой полосе центральной части последнего. Отдельные участки зоны третьей категории располагаются по обрамлению Верхнекуринской впадины, внутри Нижнекуринской, на участках поперечных флексур, разделяющих крупные сегменты Большого Кавказа.

Нетрудно заметить, что выделение зон третьей категории относительной сейсмической опасности по геологическим данным использует другую модель — сочленения крупных структурных комплексов.

Зоны четвертой категории относительной сейсмической опасности, охватывают участки Кавказа, в пределах которых геологические критерии сейсмической опасности не зафиксированы достаточно четко. Это не означает, что в их пределах по геологическим данным невозможно проявление сейсмических явлений. Высокая степень тектонической активности

всей территории Кавказа на новейшем тектоническом этапе (в четвертичное время, современную эпоху), наличие в ряде мест современной переработки древнего тектонического плана, активное развитие ряда локальных структур — все эти признаки позволяют заключить, что в пределах многих участков, отнесенных к четвертой категории, возможно возникновение землетрясений. Мы допускаем, правда, что максимальная магнитуда их будет значительно ниже той, которая характеризует зоны первых трех категорий и вряд ли превысит 4.

Зоны четвертой категории приурочены главным образом к районам, испытавшим на новейшем этапе абсолютные и относительные прогибания: они располагаются в Восточном Предкавказье, охватывают большие площади Куринской, Рионской и часть Среднеараксинской впадин. Кроме того, эти зоны выделены в сводовых частях Восточного Кавказа, характеризующихся относительно слабо дифференцированными новейшими движениями, и на отдельных участках Северо-Западного Кавказа, где общая интенсивность новейших поднятий была сравнительно невелика.

К пятой категории по степени относительной сейсмической опасности отнесены зоны платформенного развития на альпийском этапе, обрамляющие Кавказскую сейсмическую область с севера. Оценка их потенциальной сейсмической опасности требует проведения специальных сейсмогеологических, в том числе и геофизических исследований. Однако, исходя из самых общих соображений, можно предполагать, что в зонах пятой категории уровень сейсмической активности будет значительно меньшим, чем на Кавказе. Это предположение не исключает возможности возникновения в ее пределах землетрясений различного энергетического уровня. Такие проявления сейсмичности известны в зоне платформенной области Предкавказья. Самой собой разумеется, что большей опасностью будут отличаться те районы зоны пятой категории, в пределах которых уже в настоящее время установлены некоторые геологические критерии сейсмичности (зоны поперечных разломов разного порядка, зоны переработки современными движениями древнего структурного плана и т. д.). Эти районы на карте относительной сейсмической опасности показаны особым знаком.

При выделении зон разной категории относительной сейсмической опасности не все геологические данные были использованы полностью. Главное внимание было уделено установлению узлов пересечения зон продольных и поперечных нарушений разного порядка, а также активных в новейшее время зон разломов разного простирания. Сведения о новейших и современных тектонических движениях использованы нами в качестве дополнительного материала только в качественной форме.

При выделении зон разной категории по относительной сейсмической опасности принималось, что они являются квазиоднородными, т. е. характеризуются одинаковым максимальным уровнем сейсмичности независимо от того, что отдельные детали их строения и истории развития на различных этапах могут кое-где существенно отличаться. Иными словами, если в пределах какого-то участка данной квазиоднородной зоны определенной категории к настоящему времени зарегистрированы землетрясения с $M=6$, мы допускаем возможность возникновения землетрясений такого же класса и в остальных частях этой зоны, даже если в них максимальный уровень зарегистрированной сейсмичности не превышает $M=4$ или $M=5$. Только при этом допущении появляется возможность прогнозирования сейсмической опасности с использованием геологических данных.

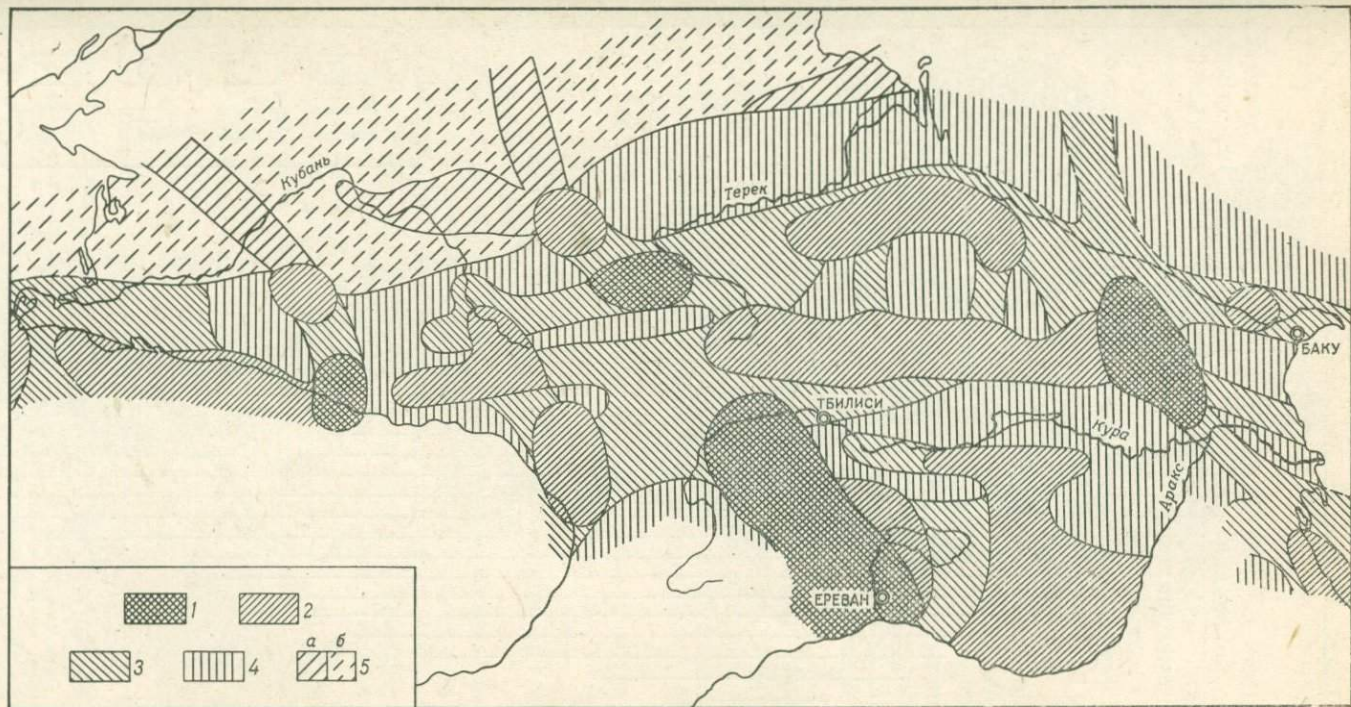
Принятая методика геологического обоснования прогнозного выделения зон различной максимальной энергии возможных землетрясений опирается на данные сейсмостатистики. Это означает, что при прогнозе на геологической основе могут сильно увеличиться области разной, в том числе максимальной известной для данного региона сейсмической опасности, но ее уровень не может превышать значения, зарегистрированного в данном регионе. На Кавказе этот уровень составляет $M=6,9$ (такую магнитуду имеют сильнейшие землетрясения Кавказа — Шемахинские 1667 и 1902 г., Кировабадское 1139 г. [93]). Следовательно, при таком подходе максимально возможный уровень сейсмичности не может быть установлен так как ясно, что зарегистрированный ее уровень с известными допущениями может приниматься в качестве максимального для данного региона. Мы не исключаем возможности того, что на Кавказе могут возникать землетрясения и с большей магнитудой, чем 6,9, однако для окончательного решения этого вопроса необходимо проведение сопоставлений свойственной этому региону геологической обстановки с той, которая характеризует внутренние зоны области альпийской складчатости, где землетрясения с $M \geq 7,0$ имеют место (Иран, Турция, Греция). Причем более детальных по сравнению с теми сопоставлениями, которые ранее проводили И. В. Кириллова и А. А. Сорский [60].

Карта зон возникновения сильных землетрясений Кавказа является следующим шагом по пути прогнозирования потенциальной сейсмической опасности этой территории (рис. 5). При ее составлении учтены, помимо геологических, также собственно сейсмологические и некоторые другие геофизические

Рис. 4. Квазиоднородные зоны Кавказа различной категории относительной сейсмической опасности (в порядке ее уменьшения [21]).

Категория зоны:

1 — первая; 2 — вторая; 3 — третья; 4 — четвертая; 5 — пятая (а — с геологическими признаками сейсмической опасности, б — без таких признаков)



материалы, в первую очередь сведения об изостатических аномалиях силы тяжести и их горизонтальных градиентах [3, 4, 25].

Определение магнитуды землетрясений, которые возможны в выделенных на карте (см. рис. 4) зонах различной относительной сейсмической опасности по геологическим данным, проводилось путем ее сопоставления с картой эпицентров землетрясений Кавказа. Это сопоставление показало, что в зонах первой категории относительной сейсмической опасности к настоящему времени зарегистрированы землетрясения с максимальной известной на Кавказе магнитудой равной 6,9. Так, в Шемахинском районе происходили упоминавшиеся выше землетрясения 1667 и 1902 гг. В других районах первой категории отмечаются менее сильные землетрясения. Например, в Ахалкалакском происходят землетрясения с $M=6$ и интенсивностью сотрясений VIII баллов; уровень сейсмической активности $A_{10}=0,32$. В других участках первой категории к настоящему времени зарегистрированы гораздо менее сильные землетрясения; в районе северного склона Большого Кавказа магнитуда землетрясений составляет 4,5, а в районе Черноморского побережья — 5,5 (сейсмическая активность равна соответственно 0,11 и 0,09). В зонах второй категории относительной сейсмической опасности по геологическим данным зарегистрированы землетрясения с $M>6,0$ (Чхалтинское 1963 г. $M=6,4$; Дагестанское 1970 г. $M=6,6$).

Уровень сейсмической активности во многих участках зон второй категории достигает значений, близких к величинам, характеризующим зоны первой категории. На южном склоне Восточного Кавказа, например в зонах второй категории, сейсмическая активность A_{10} составляет 0,28.

На современном уровне изученности сейсмического режима и сейсмогеологии Кавказа нет достаточного основания для уверенной оценки удельной значимости того или иного геологического критерия сейсмической опасности и, следовательно, для более детальной дифференциации зон возникновения сильных землетрясений. Это обстоятельство, а также тот факт, что в пределах отдельных участков зон первой и второй категорий относительной сейсмической опасности по геологическим данным к настоящему времени зарегистрированы землетрясения с $M \geq 6,0$, позволяют объединить эти зоны в одну категорию, в пределах которой считается возможным возникновение землетрясений с $M \geq 5\frac{3}{4}$ (см. рис. 5). Большие пло-

Рис. 5. Зоны возникновения сильных землетрясений Кавказа [21, 25].
1 — $M \geq 5\frac{3}{4}$ (по совокупности сейсмологических и геологических данных); 2 — $4\frac{3}{4} \leq M < 5\frac{3}{4}$; 3 — зоны повышенной сейсмической опасности по гравиметрическим данным; 4 — $M < 4\frac{3}{4}$; 5 — граница южной части территории, для которой анализ гравиметрических данных не проведен; эпицентры сильнейших землетрясений по инструментальным данным: 6 — $M=5,7-6,2$; 7 — $M=6,3-6,7$; 8 — эпицентры восьмибалльных землетрясений до 1920 г. (в кружках указан год возникновения землетрясений)

щади этой зоны охарактеризованы к настоящему времени землетрясениями отмеченного энергетического уровня, особенно в восточной половине Кавказа. Для многих участков западной его половины такая сейсмическая опасность прогнозируется по геологическим данным, поскольку уровень зарегистрированной сейсмичности здесь намного ниже предполагаемого. На карте зон возникновения землетрясений различной магнитуды (см. рис. 5) выделены также зоны первой категории (с возможной магнитудой землетрясений $M \geq 5^{3/4}$), возможность которых допускается на основании анализа геофизических данных. Ко второй категории на этой карте отнесены зоны возникновения землетрясений с $M \leq 5^{1/2}$. Она соответствует зоне третьей категории (см. рис. 4). В ее пределах неоднократно происходили землетрясения с $4^{1/2} < M \leq 5^{1/2}$.

2. ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ БАЛКАНСКОГО РЕГИОНА

Модель дизъюнктивного узла оказывается вполне приемлемой, когда исследуется относительно небольшой по размерам, достаточно однородный в геотектоническом отношении регион, например Кавказ. Однако значительно затруднена эксплуатация этой модели при выделении зон возникновения землетрясений для группы регионов, характеризующихся различным уровнем тектонической подвижности на новейшем тектоническом этапе. Впервые мы столкнулись с этой трудностью при подготовке макета сейсмического районирования юга европейской территории СССР для «Методических рекомендаций по сейсмическому районированию территории СССР» [75]. Для того чтобы ее избежать, была разработана модернизированная модель дизъюнктивного узла со скользящей шкалой тектонической активности.

Анализ сейсмогеологической обстановки в ряде областей показывает, что одни и те же геологические критерии сейсмичности в разных областях как будто бы по-разному подтверждены проявлениями сейсмической активности. Например, зоны глубинных разломов, характеризующихся высоким сейсмическим потенциалом в альпийских складчатых поясах и областях послеплатформенной активизации, на платформах оказываются практически асейсмичными. В связи с этим во избежание чрезмерного завышения потенциальной сейсмической опасности по некоторым регионам мы попытались подойти дифференцированно к ее оценке по геологическим данным и ввели «поправку» за степень общей тектонической активности региона (за разный сеймотектонический потенциал).

Вся территория юга европейской части СССР была разбита на две крупные области: высокой тектонической активности на новейшем и современном этапах (альпийский складчатый

пояс) и низкой тектонической активности на новейшем и современном этапах (альпийская платформа). Первая область, в свою очередь, разделена на две подобласти, в одной из которых (Кавказ) тектоническая активность выше, чем в другой (Крым, Карпаты).

В соответствии с этим при составлении карты относительной сейсмической опасности геологические критерии сейсмичности оценивались по-разному в зависимости от того, в какой тектонической зоне они представлены. Например, степень потенциальной сейсмической опасности дизъюнктивных узлов первой категории в пределах Кавказа считалась более высокой, чем в пределах Крыма и т. д.

Дальнейшая разработка этих представлений была реализована в работах по Балканскому сейсмическому проекту ЮНЕСКО. Они выполнялись по контракту между В/О Технопромэкспорт и ЮНЕСКО силами сотрудников ИФЗ АН СССР и Института геологии и геофизики АН Молдавской ССР в течение 1973—1975 гг. [161, 164].

Выбор метода выделения сейсмоопасных зон в пределах Балканского региона диктовался следующими соображениями:

1) большой площадью Балканского региона и, как следствие, разнообразной геологической и сейсмической ситуацией: регион включает различные по истории развития и тектонической активности на альпийском и новейшем этапе участки, отличающиеся разнообразной и контрастной сейсмичностью; в его пределах районы, в которых происходили землетрясения с $M \geq 7,5$, близко соседствуют с практически асейсмичными участками;

2) неравномерной геологической изученностью территории Балканского региона, отраженной в неравноценности тектонических, неотектонических и других исходных материалов, полученных исполнителями из стран-участниц проекта;

3) отсутствием среди исходных материалов некоторых необходимых сводных карт для всей территории Балканского региона (новейшей тектоники в изолиниях, основных линейментов и т. д.).

В этих условиях трудно было воспользоваться каким-либо из применявшихся ранее универсальных методов выделения зон с различной ожидаемой M_{\max} по комплексу геологических и сейсмологических данных, поскольку эти методы разрабатывались для более однородных в геологическом отношении регионов. Из-за неравномерной геологической изученности, например, было нецелесообразно использовать разработанные в Институте физики Земли АН СССР методы количественного анализа геологических данных для выделения зон возникновения землетрясений с различной M_{\max} , базирующихся на приемах распознавания [21, 26, 156].

Вместе с тем было бы неправильно ограничиться только

традиционными методами выделения зон с различной M_{\max} , основанными на геологических критериях сейсмичности [1, 24, 27, 130], так как в этих методах для прогноза мест ожидаемого возникновения землетрясений используются практически лишь геологические критерии. Кроме того, наиболее полно и последовательно эти методы были разработаны для территории Кавказа, где землетрясения с $M_{\max} > 6,9$ не ожидаются и где, следовательно, в первом приближении можно пренебречь размерами их очагов; на Балканах, где известны землетрясения с $M \geq 7,5$, эти методы нуждаются в модификации.

Можно было бы использовать готовое решение в виде так называемой карты K_{\max} , построенной по методу Ю. В. Ризниченко [122]. Эта карта была составлена для данного региона в двух вариантах. Первый вариант — для нормальных очагов — был опубликован [126]. Второй вариант рассчитан (в пересчете на M_{\max}) с уменьшенными радиусами ответственности. Однако оба варианта карты дают чрезмерно обобщенное, недифференцированное и преувеличенное представление о размещении зон возможного возникновения будущих землетрясений. Даже более осторожная из двух оценок допускает возникновение землетрясений с $M \geq 7$ в любой точке территории Албании, Греции (кроме малой зоны в районе Эдесса-Кочани), Западной Турции и Южной Болгарии, а землетрясения с $M = 6,5$ — в любой точке территории Балкан к югу от 43° с. ш. и, кроме того, более чем на $1/3$ всей территории Югославии. Иными словами карта дает места возможного возникновения землетрясений с большим запасом (т. е. с большой ошибкой типа «ложная тревога») и не отражает сложной картины соотношения геологических и сейсмических явлений региона.

Для получения более дифференцированной и отвечающей реальным природным соотношениям карты зон возникновения землетрясений с различной магнитудой было решено использовать разновидность традиционной методики: модель дизъюнктивного узла со скользящей шкалой тектонической активности, несколько модифицированную по сравнению с описанной в методических рекомендациях [75]. Модификация касалась в основном сейсмологического цикла работ и заключалась в том, что, во-первых, предусматривала эффективное использование представлений о размерах очагов и очаговых зон, и, во-вторых, в этой модификации прогноз мест ожидаемого возникновения землетрясений по геологическим данным контролировался аналогичным прогнозом по сейсмологическим данным на основании представлений о мощности сейсмоактивного слоя [145].

Тем самым представилась возможность сопоставлять результаты, получаемые различными способами, определять причины расхождений и контролировать все этапы составления

итоговой прогнозной карты распределения зон возникновения землетрясений с различной M_{\max} .

Ниже мы рассмотрим подробнее методику проведения работ геологического цикла исследований по Балканскому региону, предпослав ему краткую характеристику исходного геологического материала.

Как уже отмечалось, исходными геологическими данными для всех последующих операций по прогнозированию сейсмической опасности Балканского региона послужили карты историко-тектонического районирования и новейшей тектоники. При построении первой из них использовались карты тектонического районирования, составленные в странах — участницах «Балканского проекта», сводная карта тектонической зональности Балканского региона (карты 49—51, [160]), а также тектоническая карта Карпато-Балканского региона [158].

В основу легенды историко-тектонической карты положен динамический принцип, подобно тому, как это было при составлении сеймотектонической карты Европы [9]. Различные тектонические зоны выделялись по характеру режима вертикальных движений в альпийском геотектоническом цикле развития. Отмечалась относительная стабильность или устойчивость движений, однонаправленность и смена знака движений, возраст перестроек.

На территории Балканского полуострова, пережившего весьма сложную историю геологического развития в течение альпийского цикла, выделяется несколько зон или областей, каждая из которых может быть относительно неоднородной, причем отдельные их участки хотя и могут различаться по своему внутреннему геологическому строению, типу и характеру деформаций горных пород, магматизму, но связаны общностью режима движений. Прежде всего вся территория разделяется на поднятия и прогибы, образовавшиеся в течение альпийского цикла развития. Среди поднятий выделены: устойчивые, относительно стабильные, испытавшие блоковые движения по разрывам (сюда относятся значительные части Родопского и Пелагонийского массивов, срединные массивы в дуге Карпат и Трансильванских Альпах); устойчивые поднятия, испытавшие незначительные опускания в конце альпийского цикла. Кроме того, выделяются новообразованные поднятия, которые разделяются по возрасту: 1) образовавшиеся в мезозое, в первой или во второй половине мезозоя и 2) в первой половине кайнозоя — до миоцена. Последние подразделены на поднятия, возникшие во внутренней и внешней зонах геосинклинали. К этим поднятиям относится значительная часть складчатых горных систем Динарид, Эллинид, Карпат и Стара Планины. Кроме того, в Стара Планине выделена область (прилегающая к равнине Мизийской плиты), охарактеризованная как поднятие в парагеосинклинали, новообразованное с середины кайнозоя.

Области опускания — прогибы также разделены по возрасту и по своему структурному положению. Выделяются: внутренние впадины — Паннонская и Трансильванская; передовые прогибы — Предкарпатский и фрагменты Преддинарского по берегу Адриатики; межгорные наложенные впадины внутри складчатых горных систем. По таким впадинам трассируется так называемая Вардарская зона, основание которой составляет Сербско-Македонский срединный массив. Вардарская зона образует как бы коридор, соединяющий Паннонский прогиб с впадиной Эгейского моря. Наложенными впадинами переработана часть Карпатской складчатой дуги в месте ее наибольшего изгиба, и система впадин образует почти сплошную зону прогибания от Паннонского бассейна до Черного моря.

Кроме того, выделены крупные разрывы, которые разделены на субвертикальные — сбросы, взбросы и сдвиги, и субгоризонтальные — надвиги и покровы; сеть разрывных дислокаций сгущается на границах выделенных тектонических зон. Надвиговые дислокации наибольшее развитие имеют во внешних зонах Карпат и Динарид.

Намеченное тектоническое подразделение области позволяет выделить в ее пределах крупные блоки, характеризующиеся различной степенью подвижности на протяжении альпийского тектонического цикла. Границы между этими блоками, как правило, оказываются разрывами глубокого заложения и значительной протяженности, что заставляет считать их линейными первого порядка. Однако по степени подвижности и в зависимости того, какие блоки они разделяют, эти зоны разрывов в свою очередь поставлены в определенный ряд по возрастанию контрастности и интенсивности движений вдоль них. Более полно можно это рассмотреть при сравнении альпийской истории с новейшим (неоген-четвертичным) этапом развития. Однако уже и сейчас можно отметить одну закономерность — в направлении с севера на юг возрастает интенсивность и контрастность движений по этим зонам разрывов.

Карта новейших тектонических движений составлена с использованием следующих исходных материалов: 1) макетов карт новейшей тектоники по странам — Албания, Болгария, Югославия [160]; 2) макета карты четвертичной тектоники территории Румынии [160]; 3) карт рельефа всех стран.

Разнородность исходного материала отразилась и на самой карте: если для большинства стран поднятия и прогибания отображены в изолиниях, то для Греции и Турции, по которым мы не располагали информацией о мощностях неоген-четвертичных отложений в зонах прогибания, по итоговой карте можно лишь приблизительно оценить интенсивность поднятия.

Смысл построения карты новейшей тектоники заключается в выяснении интенсивности и контрастности проявления тектонических движений в течение наиболее близких к современному

этапов геологического развития территории. Карта отображает в изогониях суммарные деформации за новейший этап определенной поверхности, бывшей до начала проявления этого этапа субгоризонтальной.

В целом картина распределения новейших тектонических движений такова. В южной части территории, охватывающей Эгейский блок, на новейшем этапе произошла резкая перестройка древнего тектонического плана. Она выразилась в проявлении интенсивных опусканий, которые охватили обширную территорию, независимо от того, каков был характер предшествующих движений в отдельных ее зонах. Опусканиями были охвачены и срединные массивы, и внутренняя и внешняя зоны. По всей вероятности, такая перестройка в пределах Эгейского блока захватывает глубокие горизонты земной коры и верхнюю мантию и приводит к перестройке всей коры континентального типа с образованием внутренних морей. Эта область представляется наиболее активной в тектоническом отношении на новейшем этапе.

Интенсивная переработка древнего плана отличает также и Адриатическое побережье на территории Греции и Албании.

К северу и к востоку от южной зоны коренной переработки древнего тектонического плана происходит постепенное ослабление интенсивности тектонических процессов. Однако оно проявляется в новейших движениях и в новейшей структуре неравномерно в пространстве. Наибольшей активностью в новейшее время отличается непосредственно примыкающая к Эгейскому блоку зона, охватывающая Западную Турцию и Грецию. Здесь интенсивное раздробление территории ярко проявляется зонами интенсивного опускания в виде систем грабенов и отдельных грабенов значительной протяженности, обрамленных системами активных в новейшее время разрывов, ярко выраженных в структуре и рельефе.

Это заключение подтверждается и тем, что, по данным Ж. Борноваса [161], основные движения на новейшем этапе в пределах Греции происходили в четвертичное время, т. е. за промежуток времени, охватывающий только самый последний период новейшего этапа.

Наличие интенсивной перестройки тектонического плана отмечается и севернее, уже в пределах Югославии, Албании и Болгарии, однако здесь процессы новейшей перестройки проявляются в виде линейных зон значительной протяженности. К их числу в первую очередь должна быть отнесена Вардарская продольная зона, протягивающаяся от Эгейской впадины на юге до Паннонской депрессии на севере. Он прекрасно выражен в новейшей структуре и рельефе в виде области относительного прогибания, охватывающей значительную по ширине полосу.

Другой ярко выраженной в рельефе и структуре зоной пере-

работки древнего структурного плана является поперечная полоса, протягивающаяся от Адриатического побережья в район землетрясения Берово и далее в Болгарию, где отделяет Стару Планину от более южных горных цепей.

В целом для новейшего этапа здесь характерно проявление поперечной (по отношению к альпийскому плану) геотектонической зональности, унаследованной, по данным Б. Сикошека [165], от герцинского геотектонического цикла.

Гораздо более спокойная тектоническая обстановка характеризует на новейшем этапе северные и западные части территории в целом. Это выражается в меньшей тектонической раздробленности территории северо-западных республик Югославии, а также Румынии; здесь нет такой яркой переработки древнего тектонического плана на новейшем этапе; здесь активные в тектоническом отношении структуры не являются площадными, как в Эгейском блоке, или протяженными зонами, как в средней части региона, а выступают в виде изолированных участков, иногда, правда, больших по размерам. Примером может служить зона прогибания, протягивающаяся от Добруджи через Трансильванскую к Паннонской депрессии, северная часть Вардарской зоны и т. д.

На новейшем этапе продолжали развиваться крупные зоны тектонических нарушений, проявляющиеся и в альпийское время. Вместе с тем очень существенно отметить проявление поперечной геотектонической зональности с образованием отдельных разрывов и их систем, секущих древний структурный план.

Следует подчеркнуть, что не все ограничения выделенных блоков являются равноценными по интенсивности и контрастности проявления новейших движений, по степени выраженности в рельефе и структуре. Нам представляется, например, что в этом смысле неравноценны восточное и западное обрамления Вардарской зоны. Если восточное интенсивно проявляется в структуре (ограничивает в южной части Эгейский блок в целом, севернее отделяет наиболее приподнятые части горных систем Болгарии), то западное выглядит более спокойно — оно теряется на юге в пределах Эгейского блока, а на севере отмечено менее контрастными сочленениями систем поднятий и прогибов. Это замечание относится и к другим крупным зонам тектонических нарушений, которые возможно дифференцировать по степени контрастности и интенсивности движений разделяемых ими блоков.

Кроме наиболее крупных элементов новейшей структуры, могут быть показаны тектонические нарушения более высокого порядка, которые проявляли активность в новейшее время. При этом некоторые из них отличались в новейшее время очень высокой тектонической активностью. В частности, обращает на себя внимание диагональная зона разрывных на-

рушений, начинающаяся от Вардарской зоны (ее восточного фланга) и секущая под острым углом структуры северо-западного простирания в Болгарии.

На рис. 6 показано распределение основных линеаментов Балканского региона. Наибольший интерес, с точки зрения сейсмичности, представляет этап неотектонической активизации, поэтому при построении рис. 6 главным образом анализировались данные по новейшей тектонике, в меньшей степени сведения об истории развития на альпийском этапе, а также карта неотектонического районирования Балканского региона, сведенная Г. П. Горшковым и М. Арсовски по национальным макетам стран — участниц Балканского проекта, ([160], карта 51).

В основу построения карты линеаментов (см. рис. 6) положено представление о наличии крупных блоков земной коры — Эгейского, Анатолийского, Адриатического, Центрального, Северо-Западного и Северо-Восточного, испытавших в альпийское и новейшее время разную историю развития и ограниченных зонами тектонических нарушений разного порядка (линеаментами разного порядка).

Линеаменты первого порядка, например, отвечают крупным зонам глубинных разломов (Анатолийская, Вардарская), системам глубинных и региональных разломов (по побережью Адриатического моря), крупным флексурам, активным в новейшее время (южное и восточное ограничение Паннонской впадины), системам грабенов, горстов и разрывов.

Проведенный анализ показал, что наиболее крупные линеаменты (первого порядка на рис. 6) четко выделены в структуре и рельефе Балканского региона, обрамляя наибольшие по размерам блоки земной коры, отличающиеся историей развития на альпийском и новейшем этапах: Эгейский, Адриатический, Вардарский, Паннонский и т. д.

При составлении карты очаговых зон ожидаемых землетрясений по геологическим данным (см. рис. 6) исходными материалами послужили карта наблюдаемых зон очагов землетрясений с различной M_{\max} ([164], карта 8), карта главных линеаментов региона (см. рис. 6), а также материалы по истории его развития и подвижности на альпийском и новейшем этапах.

Как уже отмечалось в начале раздела, для выделения очаговых зон ожидаемых землетрясений в пределах Балканского региона по геологическим данным нами использовалась модель дизъюнктивного узла со скользящей шкалой тектонической активности.

Поясним это положение подробнее.

Прогноз мест возникновения очагов землетрясений с различной магнитудой по геологическим данным заключался в

отыскании на территории Балканского региона геологических условий, аналогичных тем, в пределах которых уже зарегистрированы землетрясения определенной магнитуды. В данном случае наиболее опасными в сейсмическом отношении считались узлы пересечения линеаментов различного порядка, в пределах которых уже возникали очаги землетрясений с большой магнитудой.

Наибольшей опасностью характеризуются узлы первого порядка (пересечение линеаментов первого порядка), меньшей — узлы второго порядка (пересечение линеаментов первого и второго порядков) и т. д. Распределение узлов различной категории показано на рис. 7. Общее число узлов и их распределение по категориям показано в табл. 1; на всей территории Балканского региона 211 узлов, из них 29 первой категории, 88 второй и 94 третьей. Обучение проводилось на основании карты наблюдаемых очагов землетрясений региона ([164], карта 8). В качестве примера можно привести Ионический тектонический узел первого порядка, в пределах которого наблюдались очаги землетрясений с $M > 7,0$, в районе пересечения линеаментов первого порядка. По аналогии с этой геологической ситуацией севернее указанного узла в других таких же узлах пересечения тектонических линеаментов первого порядка выделена по геологическим данным зона возникновения очагов землетрясений с $M > 7,0$. По сейсмологическим данным землетрясения с такой магнитудой в ней не отмечались.

Следует заметить, что не всем узлам пересечения линеаментов первого порядка мы приписывали возможность возникновения очагов землетрясений с $M > 7,0$. Это связано с тем, что геологическая ситуация не исчерпывается только наличием или отсутствием тектонических узлов, а характеризуется и другими признаками, совокупность которых не остается везде постоянной, а меняется от места к месту. Уже было показано, что интенсивность и контрастность альпийских и новейших движений, а также интенсивность новейшей перестройки древнего плана на новейшем этапе возрастает с севера в южном направлении. Поэтому узлы пересечения линеаментов первого порядка в разных частях региона должны характеризоваться разным уровнем потенциальной сейсмической опасности. В связи с этим прогноз по геологическим данным осуществлялся отдельно для южной, средней и северной частей территории; узлам одного и того же порядка в разных частях региона приписывалась разная потенциальная сейсмическая опасность (вводилась скользящая шкала тектонической активности).

Мы разделили всю территорию Балканского региона на пять мегаблоков (табл. 2): 1 — Эгейский, 2 — Восточной Турции, 3 — средней части региона (на территории Болгарии, се-

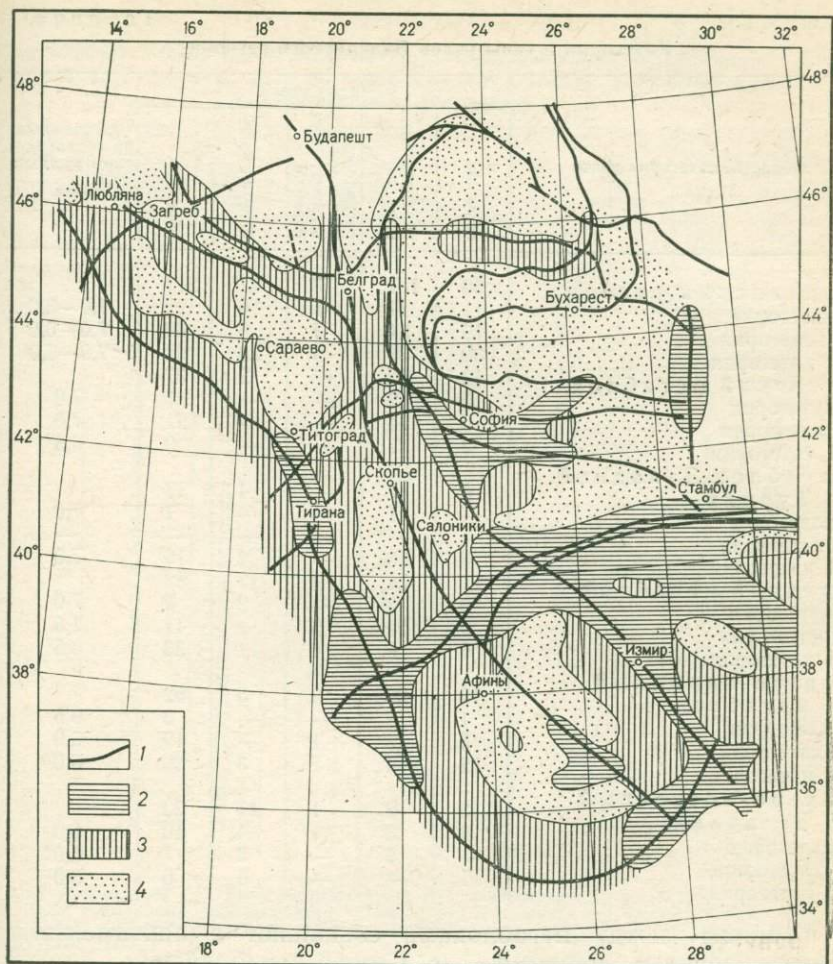


Рис. 6. Совмещенная карта главных линейментов Балканского региона и зон возникновения очагов землетрясений по геологическим данным. 1 — линейменты первого порядка; зоны возникновения очагов землетрясений с магнитудой: 2 — 7,0; 3 — 6,5 и 6,0; 4 — 5,5 и 5,0

верной части Турции и Греции, части Македонии, Черногории, Боснии и Хорватии в Югославии и Албании), 4 — Северо-Западный (на остальной части Югославии) и 5 — Северо-Восточный (на территории Румынии)*.

* Приведенные в табл. 2 данные охватывают только часть всего Балканского региона.

Категории и типы узлов Балканского региона

Область, категория узлов	Число узлов					Ожидаемые по геологическим данным M_{max}
	обучения	экстраполя- ции	расположен- ных в зонах высшей кате- гории М	экзотических	общее	
Балканский регион	60	101	13	37	211	
I категория	11	11	1	6	29	7,0—6,0
II категория	19	54	7	8	88	7,0—6,0
III категория	30	36	5	23	94	7,0—6,0
Эгейский мегаблок	12	23	—	2	37	
I категория	5	2	—	—	7	7,0
II категория	5	14	—	2	21	7,0
III категория	2	7	—	—	9	6,5
Мегаблок Западной Турции	6	7	—	4	17	
I категория	—	1	—	—	1	7,0
II категория	—	—	—	—	—	—
III категория	6	6	—	4	16	7,0
Средний мегаблок	21	34	10	17	82	
I категория	3	3	—	2	8	7,0
II категория	9	22	6	4	41	7,0
III категория	9	9	4	11	33	6,5
Северо-западный мегаблок	18	29	2	3	52	
I категория	1	2	—	—	3	6,5
II категория	5	13	1	—	19	6,0
III категория	12	14	1	3	30	6,0
Северо-восточный мегаблок	3	8	1	11	23	
I категория	2	3	1	4	10	6,0
II категория	—	5	—	2	7	6,0
III категория	1	—	—	5	6	6,0

Границы между мегаблоками совпадают с линейными элементами первого порядка, например, с Северо-Анатолийским, линией Шкодер-Печ и т. д.

После этого для территории каждого мегаблока решались следующие задачи: 1) установить, какими значениями наблюдаемых магнитуд характеризуются узлы каждой категории (стадия обучения); 2) распространить полученные результаты обучения на все узлы каждой категории, в пределах которых зарегистрированы меньшие значения наблюдаемых магнитуд (стадия экстраполяции) и 3) проконтролировать полученные результаты. Последняя стадия необходима, поскольку территория каждого мегаблока достаточно обширна для того, чтобы не ожидать в ее пределах сохранения одинаковых геологических условий.

Рассмотрим сейсмогеологические условия в пределах одного из мегаблоков (см. рис. 7 и табл. 2). На территории

Таблица 2

Соотношение между категорияй, типом узла, наблюдаемой M_{\max} , M_{\max} , ожидаемой по геологическим и по геологическим и сейсмологическим данным и геологическими условиями

Мегаблок	Номер узла с карты рис. 7	Категория узла	Тип узла*	M_{\max} с карты наблюдаемых очаговых зон	M_{\max} с карты рис. 6	M_{\max} с карты рис. 10	Геологические условия**	
							геологические	неотектонические
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	1	I	+	7,0	7,0	7,0	+	+
	2	I	—	6,5	7,0	7,0	+	0
	3	I	—	6,0	7,0	7,0	+	0
	4	I	+	7,0	7,0	7,0	a	a
	5	I	+	7,0	7,0	7,0	a	a
	6	I	+	7,0	7,0	7,0	a	a
	7	I	+	7,0	7,0	7,0	+	+
	1	II	—	6,5	7,0	7,0	0	+
	2	II	—	6,5	7,0	7,0	+	0
	3	II	—	6,5	7,0	7,0	+	0
	4	II	—	6,5	7,0	7,0	+	0
	5	II	=	4,0	6,5	6,5	0	—
	6	II	=	4,0	6,5	6,0	0	—
	7	II	—	4,0	7,0	7,0	a	a
	8	II	+	7,0	7,0	7,0	a	a
9	II	+	7,0	7,0	7,0	a	a	
10	II	+	7,0	7,0	7,0	—	+	
11	II	—	6,5	7,0	7,0	+	+	
12	II	—	6,0	7,0	7,0	—	+	
13	II	—	5,5	7,0	6,5	+	—	
14	II	—	5,0	7,0	7,0	+	0	
15	II	—	6,5	7,0	7,0	+	0	

* Обучающие узлы (+), узлы экстраполяции (—), экзотические узлы (=).

** Зоны возможного возникновения сильных (+) и средних (0) землетрясений, зоны, в которых сильные и средние землетрясения не ожидаются (—) ([160], карта 56), а — отсутствие данных

Эгейского мегаблока расположено пять узлов I категории, в пределах которых известны очаги с магнитудой более 7,0 (обучающие узлы). Аналогичные значения магнитуды распространены на два узла той же категории, в пределах которых указанные значения магнитуды не были зарегистрированы (узлы экстраполяции).

Из 21 узла второй категории в пяти наблюдались землетрясения с магнитудами более 7,0. Эти узлы отнесены к категории обучающих. Аналогичные значения магнитуд были распространены на 14 узлов той же категории (узлы экстраполяции).

Из девяти узлов III категории в двух известны зарегистрированные значения магнитуд $M=6,5$. Эти значения были распространены на семь узлов той же III категории.

Как видно из табл. 2, мы не распространили значения $M > 7,0$ на два узла второй категории, хотя того требовала избранная методика экстраполяции. На участках указанных узлов, названных нами «экзотическими» (II—5 и II—6 в табл. 2) были уменьшены значения магнитуд до соответствующих более низкой третьей категории ($M=6,5$). Первой причиной было то обстоятельство, что в их пределах зарегистрирован чрезвычайно низкий уровень магнитуды (4,0). Однако для этого было и другие, чисто геологические причины (см. табл. 2). Геологические условия в пределах этих узлов сильно отличаются от существующих во всей остальной части Эгейского мегаблока. Из сейсмогенетической карты ([160], карта 56) следует, что сейсмическая опасность и по геологическим и по неотектоническим критериям здесь очень невелика.

Результаты проведенной по Эгейскому и другим мегаблокам работы (обучение, экстраполяция, контроль) наносились на карту (см. рис. 6). Хотелось бы подчеркнуть, что вне узлов разного порядка степень опасности не определялась. Лишь в некоторых случаях уровень опасности повышался вдоль линеаментов различного порядка.

Распределение различных типов узлов показано на рис. 8. Анализ рис. 8 показывает, что наибольшие области развития экзотических узлов принадлежат Северо-Восточному мегаблоку, болгарской и греческой частям Среднего мегаблока и юго-восточной части Западной Турции. Такое распределение не случайно.

По всей вероятности, для северо-восточной части Балканского региона выбранная методика оценки потенциальной сейсмической опасности по геологическим данным оказалась не совсем удачной. Главной причиной этого является относительно низкая тектоническая и неотектоническая активность этой части региона по отношению к остальным его частям. Экзотические узлы в Болгарии и Румынии располагаются по большей части в пределах районов с резко выраженной тенденцией к опусканию в течение неотектонической стадии развития. По-видимому, для таких районов следует избирать иной метод сеймотектонических исследований.

После составления по геологическим данным карты очаговых зон ожидаемых землетрясений (см. рис. 6) была подготовлена карта по сейсмологическим данным на основе представлений о мощностях сейсмоактивного слоя [145]*.

Предполагалось, что верхний предел возможной магнитуды зависит от двух причин. Во-первых, от мощности активного слоя, которая контролирует размер очага в вертикальной

* Под сейсмоактивным понимается слой земной коры, содержащий гипоцентры землетрясений независимо от их магнитуды. Способ построения карт мощностей активного слоя описан в работе [164].

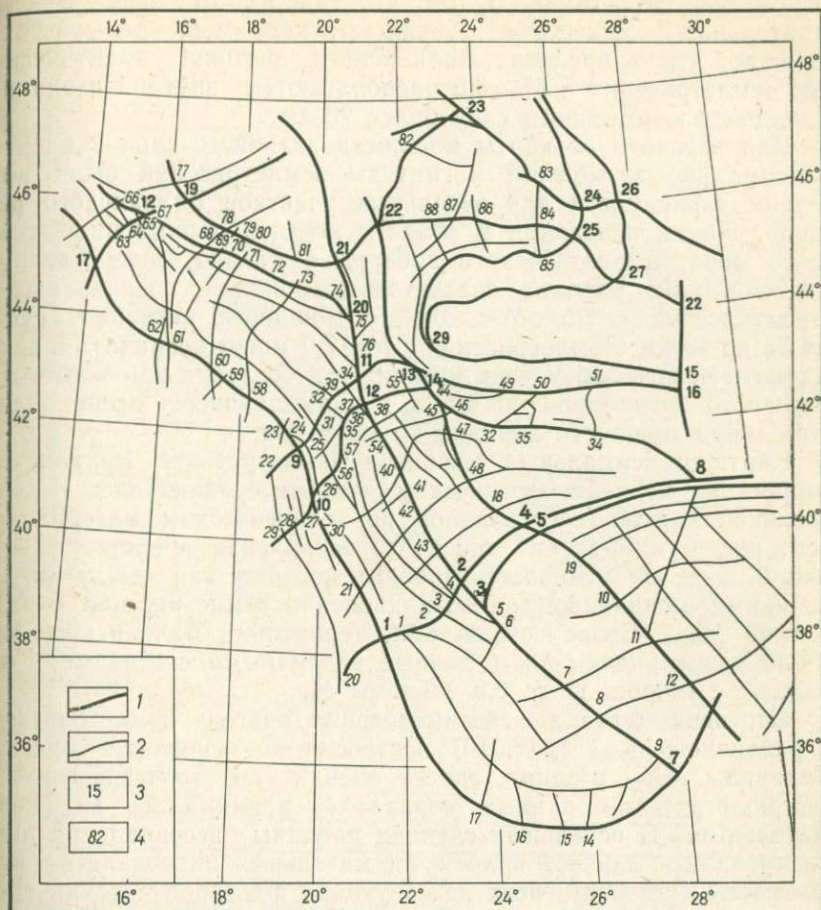


Рис. 7. Схема распределения главных линейментов Балканского региона и дизъюнктивных узлов различной категории потенциальной сейсмической опасности.

1 — линейменты первого порядка; 2 — линейменты второго порядка; 3 — узлы первой категории; 4 — узлы второй категории

плоскости: он не может превышать мощности активного слоя. Во-вторых, от протяженности активной зоны в горизонтальной плоскости, от чего зависит величина энергии, которая может быть накоплена в данной области.

Балканский регион характеризуется сложной блоковой структурой. В связи с этим здесь трудно установить истинную протяженность активных зон, состоящих из большого числа индивидуальных нарушений, которые можно фиксировать геологическими и сейсмологическими методами. В этих условиях оказалось необходимым установить соотношения между мощностью активного слоя и верхним пределом магнитуды для

разных частей региона. В том, что такие соотношения в действительности существуют, убеждает, например, то обстоятельство, что в пределах Балканского региона практически все землетрясения с $M \geq 6,5$ располагаются внутри изолинии с мощностью активного слоя более 20 км.

Для перехода от карты мощности активного слоя к оценке максимально возможной магнитуды землетрясений были выведены зависимости для отдельных участков Балканского региона. На их основании в области южного обрамления Эгейского моря, Адриатического побережья Греции, зоны Северо-Анатолийского разлома считается возможным возникновение землетрясений с $7,5 < M < 8,0$ при мощности активного слоя от 35 до 40 км. Землетрясения с $M = 7,0$ могут возникать в зоне Адриатического побережья Албании и Югославии при мощности активного слоя около 40 км, а в упоминавшихся выше областях — при мощности порядка 25 км и т. д.

Карта максимальных магнитуд землетрясений Балканского региона по сейсмологическим данным сравнивалась с аналогичной картой, составленной по геологическим материалам (см. рис. 6). Фрагмент такого сопоставления представлен на рис. 9. В целом отмечается хорошее соответствие между двумя оценками ожидаемых зон возникновения землетрясений с различной M_{\max} . Более чем на 80% территории Балканского региона такие оценки M_{\max} данные различными способами, совпадают с точностью до 0,5 единицы M .

Итоговая карта зон возникновения очагов землетрясений с различной M_{\max} (рис. 10) построена на основании рис. 9. Величины M_{\max} в зонах, где ее оценки по геологическим и сейсмологическим данным совпадали, принимались за окончательные. В остальных случаях причины несовпадения анализировались заново, причем внимательно оценивалась надежность и точность всех действующих факторов с точки зрения предпочтительности сейсмологических, геологических и промежуточных оценок.

Одним из примеров несовпадения оценок является часть Эгейского моря в районе Киклад, где по геологическим данным возможно возникновение весьма сильных землетрясений, но нет никаких сейсмологических признаков такой опасности. Было невозможно снизить уровень ожидаемой M_{\max} для расположенного здесь тектонического узла, так как в этом случае было бы необходимо автоматически сделать то же самое для всех подобных узлов Эгейского бассейна, в которых, однако, регистрировались сильные землетрясения.

Другим примером является Южная Болгария, где сейсмологические оценки весьма высокого уровня ожидаемых M_{\max} очень плохо подтверждаются геологическими данными. Решающим фактом для данной области было возникновение исключительно сильных землетрясений с M от 7,0 до 7,8 в

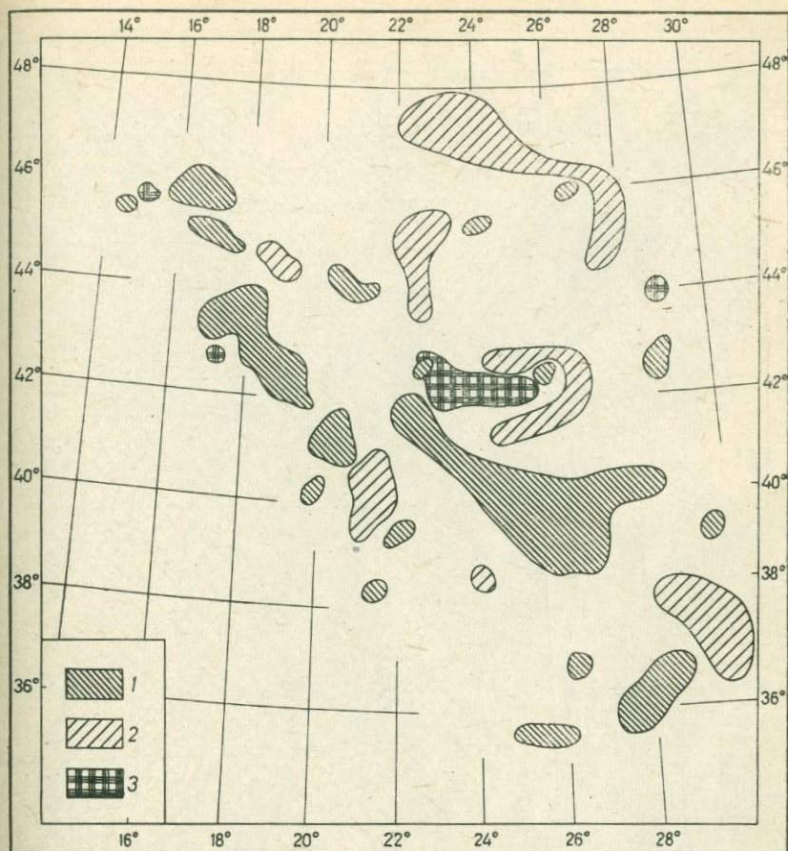


Рис. 8. Схема распределения участков Балканского региона с различными типами дизъюнктивных узлов.

1 — узлы обучающие; 2 — узлы экзотические; 3 — узлы, располагающиеся в зонах с очагами землетрясений большей магнитуды

основе представлений о мощностях сейсмоактивного слоя

4—5 местах в пределах диагональной зоны, где активный слой очень сильно развит в глубину. При составлении каталога балканских землетрясений [163] было замечено, что здесь наблюдается появление даже слабых промежуточных землетрясений. По этой причине вся зона с активным слоем толщиной около 60 км должна рассматриваться как зона с верхним уровнем магнитуды 7,5 или даже выше.

Результаты более детального рассмотрения и контроля соответствия геологических и сейсмологических оценок значений ожидаемой магнитуды при составлении рис. 10 показаны в табл. 3 и на карте рис. 11.

Из общего числа рассмотренных случаев (211) число совпадений составляет 159 (75%), соответственно 89% для пер-

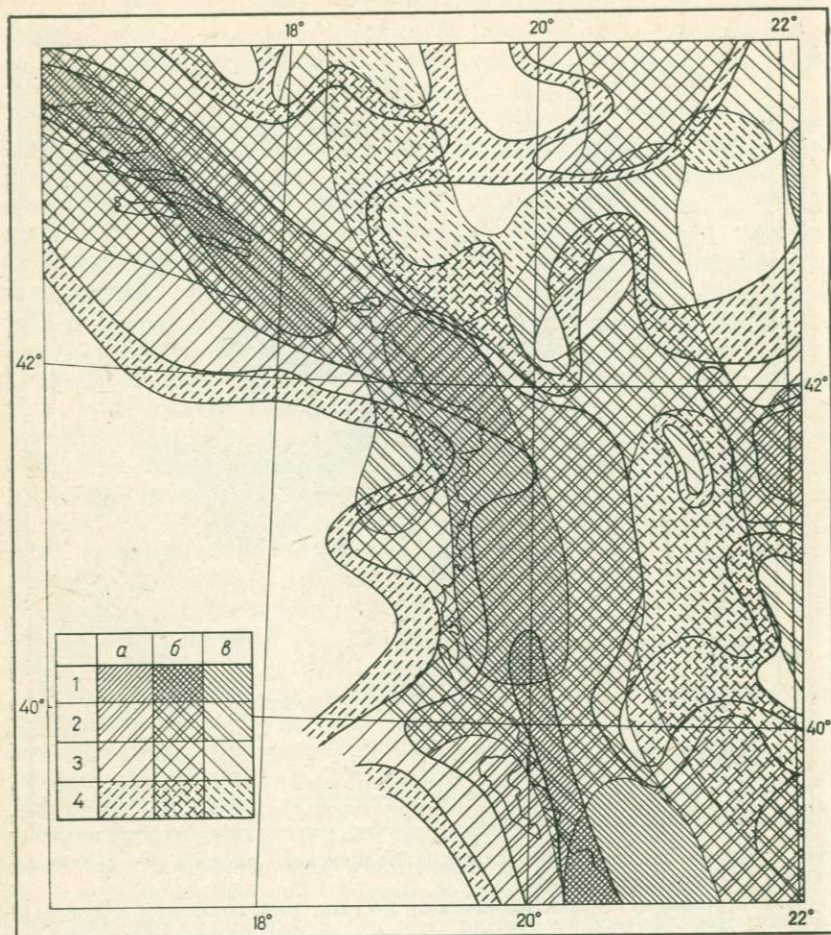


Рис. 9. Карта сопоставления прогнозных оценок зон возникновения землетрясений Балканского региона по геологическим (см. рис. 6) и сейсмологическим [164] данным (фрагмент).

Значения магнитуды по сейсмологическим (а), по геологическим и сейсмологическим (б) и геологическим (в) данным: 1 — 7.0; 2 — 6.5; 3 — 6.0; 4 — 5.5

вой, 78% для второй и 68% для третьей категории узлов. Результаты несколько ухудшаются, если принять во внимание не все типы узлов, а только узлы экстраполяции и экзотические.

Данные табл. 3 указывают на то, что неуверенность в оценках M_{\max} особенно велика для узлов низших категорий. Иными словами, избранный метод составления карты рис. 11 имеет наиболее хорошее применение для участков Балканского региона, характеризующихся высоким уровнем тектониче-

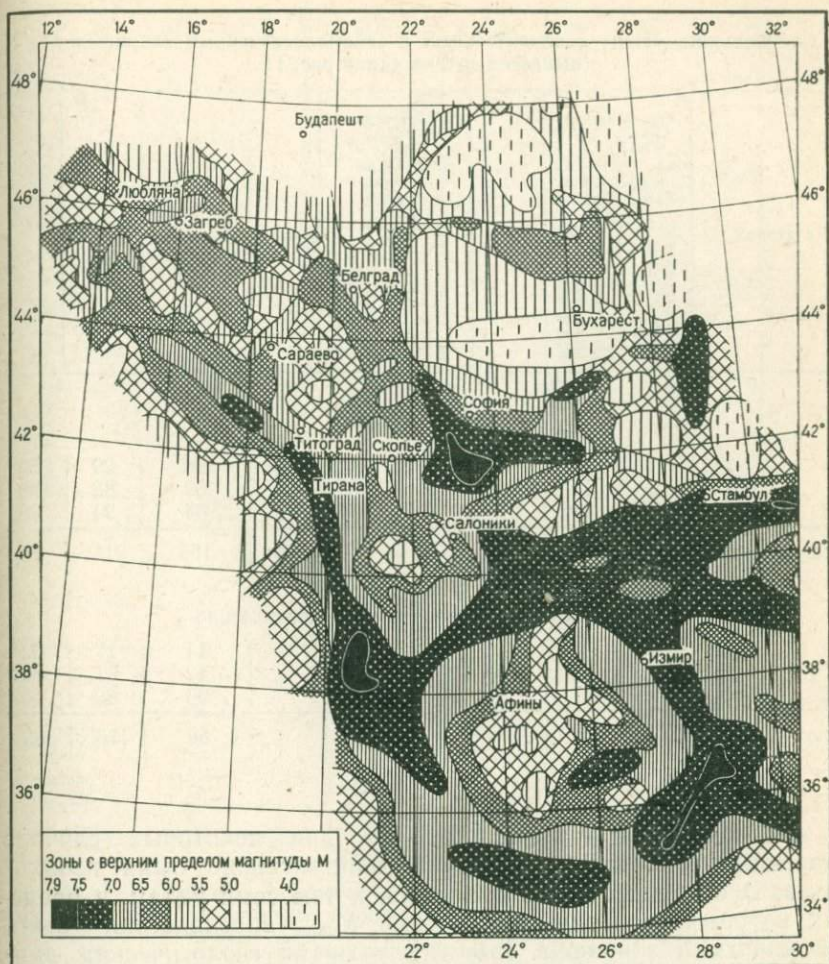


Рис. 10. Карта зон возникновения очагов землетрясений Балканского региона по геологическим и сейсмологическим данным [164]

ской активности, и хуже применим в относительно слабо подвижных районах. Это означает, что избранный метод составления карты рис. 11 успешно решает главную задачу — установление наиболее опасных в сейсмическом отношении участков Балканского региона с наибольшими значениями ожидаемой магнитуды.

Из табл. 3 следует также, что увеличение геологической оценки M_{\max} по сейсмологическим данным было проведено для 14 узлов (5 — второй и 9 — третьей категории) и уменьшение геологической оценки по сейсмологическим данным — в 37 случаях (3 — первой, 14 — второй и 21 — третьей категории).

Соотношение между геологическими и сейсмологическими оценками M_{\max} , вынесенными на карту рис. 11

Категории	Уменьшение M_{\max} на рис. 11 по сравнению с картой рис. 6		Всего	Увеличение M_{\max} на рис. 11 по сравнению с картой рис. 6		Всего	Совпадение геологической и сейсмологической оценок	Всего	%
	по геологическим данным возможно	по геологическим данным невозможно		по геологическим данным возможно	по геологическим данным невозможно				

Все типы узлов

I	1	2	3	—	—	—	26	29	89
II	1	13	14	2	3	5	69	88	78
III	5	16	21	6	3	9	64	94	68
Всего	7	31	38	8	6	14	159	211	75

Только узлы экстраполяции и экзотические

I							14	17	82
II							42	61	69
III							30	60	50
Всего							86	138	62

В этой связи следует заметить, что для некоторых случаев коррекция геологических оценок действительно была необходима. В особенности это относится к тем семи узлам, в пределах которых геологическая оценка M_{\max} впоследствии была сейсмологами занижена (все эти узлы по геологическим данным проходили как экзотические). В связи с этим в табл. 3 эти случаи показаны в графе «по геологическим данным возможно».

Анализ табл. 3 и всей процедуры составления итоговой карты рис. 11 дает возможность сделать следующие выводы:

1) геологические данные, как правило, дают завышение оценок значений M_{\max} . Это вполне объяснимо — геологические методы исследований рассматривают особенности тектонического процесса за весьма длительный промежуток времени;

2) при составлении карты рис. 11 в случае расхождений сейсмологические данные принимались во внимание с большим весом, чем геологические.

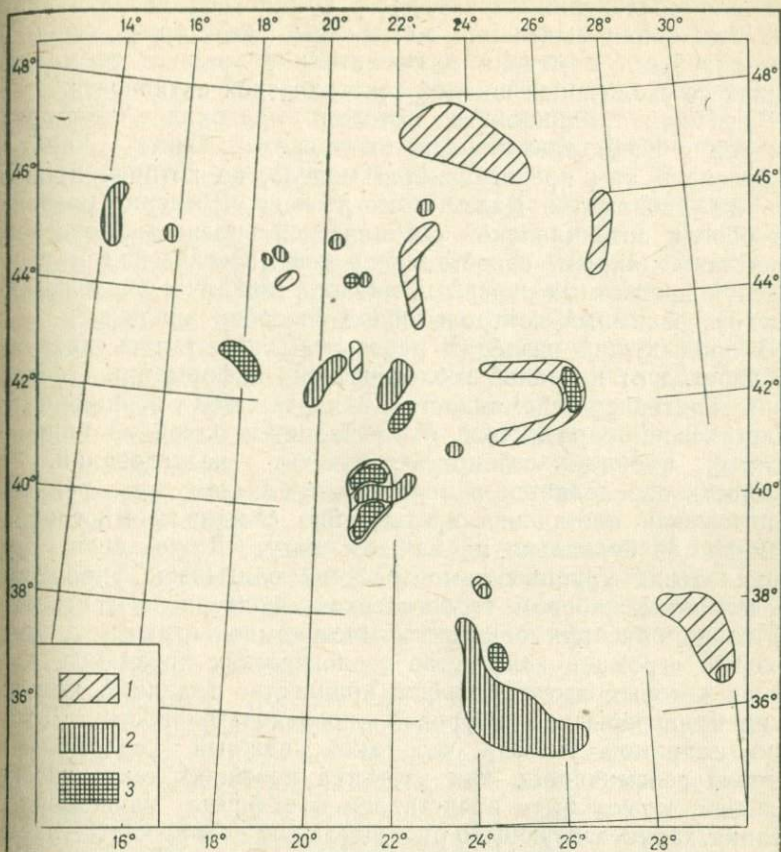


Рис. 11. Распределение зон с различной оценкой ожидаемой магнитуды по геологическим и сейсмологическим данным.

1 — зоны развития экзотических, по геологическим данным, узлов; 2 — зоны, в пределах которых геологические оценки сейсмической опасности приняты с большим весом; 3 — зоны, в пределах которых сейсмологические оценки сейсмической опасности приняты с большим весом

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящей главе мы рассмотрели некоторые наиболее типичные модели геологической ситуации в зонах возникновения землетрясений, на основе которых развивались традиционные методы прогнозирования сейсмической опасности. Мы придерживались при этом, намеренно, хронологического порядка, который позволил проследить определенную эволюцию методов разработки указанных моделей во времени и показать их постепенное усложнение. Нетрудно заметить в этом развитии и определенную преемственность — положительные особенности ранних моделей использовались при создании более сложных последующих. Так, наиболее простая мо-

дель зон сочленения структурных комплексов эксплуатировалась позже при выделении зон низшей категории сейсмической опасности в модели дизъюнктивных узлов и ее модификациях со скользящей шкалой тектонической активности.

В рамках традиционных методов выделения сейсмоопасных зон с использованием геологических данных, наиболее законченной нам представляется модель, по которой проводились исследования в Балканском регионе. Введение независимой оценки потенциальной сейсмической опасности по сейсмологическим данным, сопоставление сейсмологической и геологической прогнозных версий позволило, пожалуй, впервые, осуществить взаимный контроль обоих способов анализа.

В предыдущих разделах работы мы попытались показать, что переход от исходной геологической информации (геологических критериев сейсмичности) к картам зон возникновения землетрясений с различной M_{\max} является одной из наиболее сложных проблем сеймотектонических исследований. Ее сложность определяется в первую очередь тем, что реальная геологическая обстановка чрезвычайно сложна и многообразна, меняется буквально на каждом шагу. Даже если зоны возникновения крупных землетрясений описывать упрощенно-определенным набором геологических критериев сейсмичности, такие описания остаются многокомпонентными и могут включать огромное количество геологических признаков, каждый из которых имеет большое количество градаций или выражен в непрерывной цифровой последовательности. Достаточно, например, указать, что такой важный геологический критерий сейсмичности, как характер новейших тектонических движений, может быть представлен и в форме качественного описания, характеризующего относительную подвижность участка территории на новейшем этапе, в четвертичное время, на современном этапе, и в непрерывной количественной шкале амплитуд движений, градиентов, скоростей и т. д.

В этих условиях найти геологическую обстановку, совершенно аналогичную реально существующей в зоне возникновения землетрясения, невозможно; невозможно даже найти хотя бы в какой-то мере подобную этой зоне по описанию.

Разумеется, что при такой обширной исходной информации направить ее без потерь в нужное русло в рамках традиционных (без формализации исходных данных) методов сеймотектонического анализа было невозможно. Естественным выходом из создавшегося положения является сознательное (или бессознательное) упрощение реальных соотношений между геологическими и сейсмическими явлениями путем выбора определенной модели зон возникновения землетрясений различного энергетического класса. В соответствии с этим вся остальная (вне рамок данной модели) исходная геологическая информация, накопленная на ранних стадиях сеймотек-

тонических исследований, остается за пределами ведущегося анализа. Достаточно сопоставить исходные (см. рис. 1—3) и конечную (см. рис. 5) карту зон возникновения землетрясений Кавказа, чтобы убедиться в правильности сказанного. В неполном использовании исходной геологической информации заключается одно из главных ограничений традиционных методов сейсмотектонических исследований.

Выбирая ту или иную модель геологической ситуации в зонах возникновения землетрясений определенной магнитуды, мы тем самым игнорируем один из важнейших вопросов сейсмотектоники — каков удельный вес определенных геологических критериев сейсмичности и как он меняется при наличии большого числа их комбинаций. Попытки обойти эту проблему путем введения скользящих шкал тектонической активности являются по существу половинчатыми: кроме критериев этой группы (которые оцениваются в качественной форме) остаются вне внимания исследователя геологические критерии сейсмичности, относящиеся к другим группам (например, историко-тектонические). Иными словами, даже использование самых сложных моделей в рамках традиционной методики оставляют исследователю большие возможности для субъективных оценок, что снижает ценность этого направления в целом. В этом другой недостаток традиционных методов сейсмотектонического анализа.

Мы отмечали, что уже сам выбор определенной модели ведет к потере первичной информации, необходимой для объективного выделения зон относительной сейсмической опасности по геологическим данным. На следующей стадии происходит еще большая генерализация исходных данных. При выделении зон возникновения землетрясений определенной магнитуды проводится часто объединение участков, принадлежащих разным зонам по степени относительной сейсмической опасности, как это было описано, например, в разделе 1 гл. III. При этом с одной стороны частично «нивелируются» некоторые субъективные оценки более ранней стадии анализа, и это, безусловно, положительный фактор, но с другой еще больше огрубляется реальная геологическая обстановка.

Все традиционные методы являются многоступенчатыми. Сопоставление исходных геологических данных с сейсмическими ведет к составлению карты геологических критериев сейсмичности и выбору модели строения зон возникновения землетрясений. На следующей стадии в соответствии с принятой моделью производится построение карты относительной сейсмической опасности по геологическим данным. Сопоставление последней с распределением зарегистрированной сейсмичности позволяет, наконец, подготовить прогнозную карту зон возникновения землетрясений с различной магнитудой.

Потери исходной информации на этом многоступенчатом

пути очень велики. К тому же по итоговой карте невозможно установить, какие именно исходные данные послужили в результате основанием для отнесения определенных районов к той или иной категории по степени их потенциальной опасности. В этом еще одно крупное ограничение рассмотренных традиционных методов.

Выявление перечисленных недостатков традиционных методов прогнозирования сейсмической опасности позволяет наметить определенные пути их усовершенствования, разработанные автором совместно с сотрудниками ИФЗ АН СССР В. И. Бунэ, Н. В. Шебалиным и В. Н. Шолпо.

Как уже неоднократно отмечалось, сильные землетрясения обычно приурочены к дизъюнктивным узлам и к зонам глубоких разломов большой протяженности. Выше было показано, что для составления карт разломной тектоники обычно используется информация об истории развития территории за альпийский и новейший этапы. Вместе с тем существует возможность резкого увеличения надежности и детальности таких карт при условии привлечения к анализу дополнительной информации, а именно: данных о современных движениях, линеаментах, дешифрируемых по космическим снимкам, о градиентах и ступенях различных геофизических полей и т. д. Разумеется, что для целей определения степени сейсмической опасности информативность карт разломной тектоники, составленных различными методами, будет разная. Нас в первую очередь интересуют зоны разломов, активных в новейшее время, в четвертичном периоде и в современную эпоху. Однако достаточно хорошо известно, что карты современных движений для горных стран не очень надежны ввиду того, что очень разрежена наблюдательная сеть. Карты линеаментов, подготовленные на основе дешифрирования космических снимков, очень насыщены, но не всегда ясно, чему в природе отвечают эти линеаменты. Карты разломной тектоники, составленные на основе историко-структурного анализа, наиболее точны в смысле их географической привязки и ранжирования на категории, но не все «геологические» разломы были активны в новейшее время. Линеаменты, выделяемые по сейсмологическим данным (как правило, на основании экспертных оценок), в некоторых случаях могут иметь случайный характер и т. д. Иными словами, карты разломной тектоники, построенные с использованием разных методов, всегда будут отличаться между собой разной степенью информативности, надежности и детальности. Использовать все эту разнородную информацию тем не менее возможно и необходимо для составления сводной комплексной карты разломной тектоники. Однако строить такую карту нужно обязательно с учетом идеальных и реальных возможностей каждого индивидуального метода, привлекаемого к совместному анализу.

Такая оценка методов может быть осуществлена достаточно объективно группой экспертов путем голосования. В соответствии с его результатами карты разломной тектоники, составленные разными методами, будут учитываться при подготовке сводной комплексной карты с разным весом.

Возможно предвидеть, что сведения о разломной тектонике, полученные на основании анализа данных о неотектонике, будут иметь максимальный вес; с большим весом необходимо учитывать материалы о сейсмологических линейментах; с меньшим весом могут приниматься собственно геологические и геофизические данные и т. д.

При таком подходе сводная карта разломной тектоники может и должна не только показывать пространственное распределение тектонических нарушений разного порядка (как продольных, так и поперечных). В ее легенде обязательно найдет отражение степень надежности, уверенности проведения тех или иных разломов в зависимости от того, какие методы подтверждают их существование, т. е. какой они имеют вес. Такая оценка чрезвычайно важна для целей сеймотектонического анализа.

На основании сводной комплексной карты разломной тектоники достаточно просто перейти к составлению карты дизъюнктивных узлов описанными выше способами. Ее отличие от обычных карт этого типа будет заключаться в том, что дизъюнктивные узлы могут теперь быть дифференцированы не только на различные ранги, но и на определенные категории по степени надежности их выделения.

Следует отметить, что карты разломной тектоники и дизъюнктивных узлов в масштабе порядка 1:2 500 000 составляются в региональном плане достаточно уверенно. Поэтому высказанные положения направлены только на то, чтобы эти карты были еще более детальны и надежны.

Гораздо хуже, как было показано, обстоит дело с остальной исходной информацией, которая в рамках традиционной методики используется очень мало. Для того чтобы преодолеть эту трудность, предлагается перейти к составлению сводных «синтетических» карт сеймотектонического потенциала. Разъясним это предложение подробнее.

Сеймотектонический потенциал, как было показано в главе II, определяется двумя группами факторов — активностью тектонического процесса и свойствами среды, в которой этот процесс протекает. Таким образом, для построения сводной карты сеймотектонического потенциала необходимо иметь в качестве исходных серию карт, отражающих обе отмеченные группы данных. Может быть предложен следующий список таких исходных карт: 1) современных тектонических движений; 2) четвертичных тектонических движений; 3) новейших тектонических движений; 4) изостатических аномалий; 5) градиентов

изостатических аномалий; 6) мощности земной коры; 7) мощности сейсмоактивного слоя; 8) сейсмической активности (A_{10} , A_{13} и т. д.); 9) историко-тектонического районирования; 10) зон перестроек тектонического плана.

Конечно, разделить эти данные по их принадлежности к группе «тектоническая активность» (№ 1—8) или «свойства среды» (№ 9, 10) можно с известной условностью. Важнее другое — все материалы, представленные на перечисленных картах, имеют прямое отношение к сеймотектоническому потенциалу. По этому признаку возможно некоторое расширение приведенного списка.

Дальнейшая процедура составления синтетической карты сеймотектонического потенциала должна включать несколько операций.

А. Выделение нескольких (4—5) градаций признака сеймотектонического потенциала, отраженного на одной из перечисленных карт, привлекаемых к анализу. Градации должны отражать разную степень интенсивности тектонического процесса или жесткости среды, в которой он развивается. Например, по рис. 2 (новейшая тектоника) могут быть выбраны такие градации: >5000 м, $3000—5000$ м, $2000—3000$ м, $1000—2000$ м, $0—1000$ м; аналогично по карте современных движений: >5 мм/год, $2—5$ мм/год, $0—1$ мм/год; для карты мощности сейсмоактивного слоя: >50 км; $30—50$ км; $10—30$ км; $0—10$ км и так по всем картам. Выбор градаций, как будет показано ниже (раздел 4 гл. V) — весьма ответственная операция, рассмотренная в методическом плане Н. И. Николаевым и П. Н. Николаевым [84, 91]. Здесь лишь отметим, что для получения оптимального решения значениями градаций можно в некоторой степени варьировать.

Б. Определение степени надежности и информативности каждого признака, привлекаемого к анализу. Такая оценка данных перечисленных выше исходных карт может быть осуществлена (как и при составлении сводной карты разломной тектоники) путем голосования группой экспертов. В соответствии с результатами голосования каждый признак в дальнейшем, при подготовке карты сеймотектонического потенциала, будет учитываться с разным индивидуальным весом. Шкалу весов, однако, следует избирать в соизмеримых значениях, чтобы ни один из признаков, привлекаемых к анализу, не оказался доминирующим.

В. Построение сводной карты сеймотектонического потенциала при проведении указанных подготовительных операций становится чисто технической задачей. Может быть предложен следующий способ проведения этой процедуры. Исследуемая территория разбивается на равноплощадные участки (ячейки) определенного размера, например $10' \times 15'$ градусной сетки. Размеры площадки не должны быть значительными по площади, с тем чтобы не допускать чрезмерного осреднения исходной информации. В этом случае и итоговая карта сеймотектонического потенциала будет достаточно дробно дифференцирована. Да-

лее с перечисленных исходных карт в закодированном виде последовательно снимается информация, относящаяся к каждой из выбранных ячеек. Допустим, по результатам голосования неотектонические данные должны быть приняты с наибольшим весом и имеют для соответствующих градаций такие условные значения: 10, 8, 4 и 2. Данные о современных движениях, принятые с меньшим весом, — 4, 3, 2, 1; сведения о мощностях сейсмоактивного слоя соответственно 6, 5, 4, 3 и т. д.

В результате каждая элементарная ячейка всей рассматриваемой территории будет охарактеризована определенной суммой условных единиц, соответствующих разному уровню сейсмотектонического потенциала. При этом в зависимости от размеров выбранной ячейки такое картирование всей территории в изолиниях может быть сделано с большей или меньшей детальностью. Сходная методика оценки потенциальной сейсмической опасности более крупных участков земной коры (новейших поднятий и прогибов разного порядка) использовалась ранее применительно к территории Западного Саяна и Западной Тувы [70].

После подготовки комплексных карт разломной тектоники и сейсмотектонического потенциала путем их совмещения составляется карта относительной сейсмической опасности по геологическим данным. При этом в зависимости от расположения в районах с различным сейсмотектоническим потенциалом могут быть расставлены в определенной иерархической последовательности по степени относительной опасности узлы и разломы разного порядка, а также участки территории, расположенные вне этих структурных элементов.

Дальнейшая экстраполяция сейсмологических данных и составление карты зон возникновения землетрясений с различной M_{\max} осуществляется обычным путем сопоставления карты относительной сейсмической опасности по геологическим данным с картой эпицентров (см. раздел 1 гл. III) или наблюдаемых очагов или очаговых зон (см. раздел 2 гл. III).

Приложенная схема намечает возможности если не преодоления полностью, то в значительной степени устранения ряда недостатков, свойственных традиционной методике. Ее использование позволяет резко уменьшить потери исходной геологической информации, усилить комплексирование различных методов при оценке потенциальной сейсмической опасности, более строго проходить различные стадии построения карты зон возникновения землетрясений с различной M_{\max} и тем самым увеличить объективность, детальность и надежность этой карты.

Тем не менее в современном виде описанные традиционные методы анализа исчерпали свои возможности к середине 70-х годов. Получаемые с их использованием результаты не удовлетворяли уже ни исследователей, ни практиков. Необходимо было разрабатывать новые методы более объективного подхода к выделению зон возникновения землетрясений с различной M_{\max} .

Глава IV

ФОРМАЛЬНЫЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

В предыдущих главах было показано, что с сейсмичностью связано большое количество разнообразных по своему содержанию геологических критериев сейсмичности. Было также отмечено, что, используя традиционные методы анализа исходной геологической информации, невозможно достаточно надежно выделять зоны возникновения землетрясений с различной M_{\max} .

Это заставило разрабатывать новые методы анализа геологических данных, основанные на их формализации. Преимущества формализации первичных данных очевидны — она позволяет в компактной форме представлять большие массивы исходной информации, легко проводить суммарный учет и сопоставление многих характеристик, а также привлекать к анализу математические методы исследования.

Ниже мы рассмотрим один из формальных геологических методов выделения зон возникновения землетрясений с различной M_{\max} , разработанный на примере Кавказа группой сотрудников ИФЗ АН СССР (Б. А. Борисов, В. И. Бунэ, Г. И. Рейснер) совместно с коллективом Института проблем передачи информации (ИППИ) АН СССР (И. Т. Турбович, В. Г. Гитис, Е. Ф. Юрков). Данные о разработке метода к настоящему времени опубликованы в ряде работ [21, 26, 28, 29].

После решения задачи по выделению зон возникновения землетрясений с различной M_{\max} был проведен цикл работ по эксплуатации решения в различных регионах альпийского складчатого пояса — на Кавказе, в Крыму, на Карпатах в пределах СССР, на Карпатах и Балканах в пределах Болгарии, Югославии, Румынии, Польши, Венгрии и Чехословакии, а также в Альпах и Апеннинах Северной Италии.

Материалы этого цикла работ также частично опубликованы [10, 18, 19, 21, 22, 151, 152].

1. О СЕЙМОТЕКТОНИЧЕСКОМ КАТАЛОГЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ

Анализ сейсмогеологической литературы показывает, что при геологическом изучении мест возникновения землетрясений разные исследователи привлекают различный исходный мате

риал, который, по тем или иным соображениям, кажется наиболее интересным и важным. Не умаляя значения проведенных и проводимых работ, укажем, что выводы о геологических критериях сейсмичности, получаемые разными исследователями, носят, по необходимости, чересчур общий характер, так как для сравнительного анализа используется только малая часть имеющихся данных. Это связано как с различиями в характере и терминологии геологических описаний, так и со сложностью учета совместного влияния многих геологических признаков.

Упорядочение накопленных геологических материалов, их унификация, выявление пробелов, имеющих в изучении тех или иных районов, — все это способствовало бы более полному использованию геологических данных при выделении сейсмоопасных зон. Наиболее удобной формой проведения такой работы является, очевидно, составление сейсмотектонического каталога, под которым понимается унифицированное описание тектонических особенностей участков территории, где происходили землетрясения определенного энергетического уровня.

Сходная мысль была высказана И. Е. Губиным, указывавшим на необходимость «создания набора эталонных сейсмогенных зон в виде ключа для прогноза магнитуды и интенсивности по геологическим и геофизическим данным» ([55], с. 24).

Анализ материалов, помещаемых в сейсмотектонических каталогах, даст возможность обнаружить черты сходства и различия сейсмических районов и в конечном счете поможет разработать более объективную и универсальную методику оценки потенциальной сейсмической опасности по геологическим данным. Чтобы избежать недоразумения, заметим, что составление сейсмотектонического каталога — не начало и не конечный результат сейсмотектонического исследования. Составлению каталога предшествует всестороннее геологическое и сейсмологическое изучение территории. После составления каталога становится яснее, какие исследования надо провести в том или ином районе. Материалы каталога кладутся в основу изучения информативности различных признаков, используемых в качестве геологических критериев сейсмичности. Таким образом, сейсмотектонический каталог — это техническое подспорье, которое может быть полезным на различных стадиях сейсмотектонических исследований.

Автором совместно с Б. А. Борисовым составлен вариант сейсмотектонического каталога землетрясений Кавказа с магнитудой $M \geq 5$ [17]. Он выполнен в виде анкеты, в которой различаются две части: первая содержит сведения, имеющиеся в опубликованных каталогах землетрясений (название и координаты местности, дата землетрясения, магнитуда, глубина очага, интенсивность в эпицентре, класс точности определения (эпи-

центра), вторая часть — геолого-геофизическое описание рассматриваемого участка территории.

Размер участка, к которому относится описание, должен быть соизмерим с точностью определения географического положения очага землетрясения. Иначе говоря, размер участка должен быть таким, чтобы очаг с большой вероятностью располагался в его пределах. Наибольшая точность определения координат эпицентров землетрясений, указываемая в каталогах по Кавказу [24] составляет ± 15 км (класс АА), ± 25 км (класс А). Другие землетрясения определены с точностью ± 50 км (класс В) и с точностью ± 100 км (класс С)*.

Землетрясения, отнесенные в каталоге землетрясений Кавказа к классу С, не могут быть рассмотрены в сейсмотектоническом каталоге. Действительно, если, например, в каталоге землетрясений Кавказа указывается землетрясение с эпицентром на Таманском полуострове (63 г. до н. э.), а точность определения его координат соответствует классу С, то на самом деле очаг землетрясения может располагаться и на Керченском полуострове, и в акваториях Азовского и Черного морей, и в низовьях Кубани, и на обоих склонах Большого Кавказа (до района Новороссийска включительно). Описание геологической обстановки для каждого из перечисленных районов будет совершенно различным, и будет неясно, с какой же именно обстановкой связано возникновение землетрясения.

Землетрясения, относящиеся к классу В, также мало пригодны для сейсмогеологического изучения. Например, землетрясение 1908 г., ощущавшееся в Кутаиси, могло возникнуть и на южном склоне Большого Кавказа (в Раче), и в Рионской низменности, и на северных склонах Аджаро-Триалетского хребта, относящегося уже к Малому Кавказу.

В нашем варианте сейсмотектонического каталога землетрясений Кавказа дается описание геологических условий возникновения землетрясений, отнесенных к классам АА и А. Предметом описания являются равноплощадные участки территории (ячейки), имеющие вид кругов с радиусом 15 км. Центры ячеек помещены на пересечениях параллелей, проведенных через $10'$, с меридианами, проведенными через $15'$ (т. е. координаты эпицентров округлены до $10'$ по широте и до $15'$ по долготе). Диаметр ячейки приблизительно равен диагонали трапеции, ограниченной проведенными таким образом параллелями и меридианами. Выбранный размер ячейки соответствует точ-

* К классам В и С относятся в основном землетрясения далекого прошлого. Положение их эпицентров устанавливается по отрывочным макросейсмическим данным и по скурым сообщениям древних хроник. Большинство землетрясений, происшедших за последнее столетие, относится к классам А и АА. В новом каталоге [93] даны иные оценки точности определения координат эпицентров землетрясений по классам от 1 ($\pm 0,1^\circ$) до 6 ($\pm 1,0^\circ$). Большинство землетрясений классов В и С имеют точность определения координат эпицентров по новому каталогу [93] классов 5 и 6 ($\pm 30'$; $\pm 1,0^\circ$).

части определения координат землетрясений класса АА, с большой вероятностью он соответствует классу А. Размер ячейки соизмерим с размерами очагов большинства сильных кавказских землетрясений (с магнитудой 5—6).

В представляемом варианте сеймотектонического каталога помещено геологическое описание районов Кавказа, в которых произошли землетрясения с магнитудой $M \geq 5$. Рассматриваются землетрясения с очагами в пределах земной коры (т. е. не глубже 40—50 км). Для изучения землетрясений, возникающих в мантии, нужен, вероятно, иной набор параметров и больший размер ячейки, чем для землетрясений, происходящих в коре. В каталоге не рассмотрены (из-за недостаточной изученности) геологические условия возникновения землетрясений, эпицентры которых расположены в акваториях Черного и Каспийского морей, а также на территории, находящейся за границей Советского Союза.

Одной из важнейших характеристик землетрясения является показатель выделившейся при его возникновении энергии (магнитуда). Геологический прогноз максимальной магнитуды возможных в будущем землетрясений (в каждом конкретном районе) должен быть первой задачей, решаемой при сейсмическом районировании.

По существующим представлениям, частота (вероятность) возникновения землетрясений и величина их энергии зависят от интенсивности проявления тектонических процессов и от свойств среды, в которой эти процессы развиваются. Недостаток достоверных сведений о свойствах внутренних частей земной коры и о происходящих там процессах заставляет привлекать в описание сейсмичных районов комплекс геолого-геофизических данных, косвенно характеризующих условия в глубоких частях земной коры.

Какие же геологические данные необходимо использовать при сеймотектонических исследованиях? Очевидно, такие, которые уверенно коррелируются с сейсмичностью, хотя бы и не повсеместно. В процессе работ по составлению сеймотектонического каталога землетрясений Кавказа было проанализировано, насколько те или иные признаки, обсуждавшиеся в литературе, применимы для описания кавказских землетрясений. Внимание обращалось также на то, чтобы привлекаемые в каталог характеристики были достаточно хорошо изучены на всей территории Кавказа (или чтобы можно было надеяться, что они будут изучены в ближайшем будущем).

В первую очередь были собраны сведения, отражающие характер и интенсивность тектонических процессов, развивающихся в современную эпоху. Такие сведения можно почерпнуть из материалов геолого-геоморфологического, геодезического и геофизического изучения. Были также использованы данные о направленности и интенсивности геологических про-

цессов за более длительные промежутки времени, включающие разные периоды формирования складчатой области.

Свойства среды, в которой развиваются процессы, вызывающие землетрясения, формировались в течение длительного геологического времени, поэтому в сеймотектоническом каталоге необходимо было дать сведения, отражающие особенности тектонического режима на разных этапах развития (от раннеальпийского до современного) и современное структурное положение района. Представляют интерес как сами тенденции тектонического развития на каждом из этапов, так и изменение этих тенденций от одного этапа к другому (перестройка тектонического режима).

Землетрясения с очагами в земной коре связаны с подвижками, по разрывам. Известно, что магнитуда землетрясения зависит от объема очага, а эта характеристика связана с линейными размерами зоны разрыва. Разрывы по-разному выражены в современной структуре: одни непосредственно устанавливаются по геологическим и геофизическим данным, другие выражены в виде флексур; геоморфологический анализ позволяет выделить границы или зоны контрастного сочленения областей с различными тенденциями геологического развития.

Таков в самом общем виде круг сведений, которые надо было отразить в сеймотектоническом каталоге. При этом не следует пытаться строго различить сведения, относящиеся только к «тектоническому процессу» или только к «свойствам среды». Тектонические движения, изменяя структуру коры, определяют ее консолидированность, «жесткость», способность к аккумуляции или, напротив, к быстрой релаксации напряжений. С другой стороны, свойства среды влияют на характер и интенсивность тектонических движений в каждом конкретном районе.

Ниже перечисляются геолого-геофизические характеристики и другие сведения, которые были включены в сеймотектонический каталог землетрясений Кавказа. Порядковые номера пунктов этого перечисления соответствуют номерам граф представляемого варианта каталога (табл. 4).

1. Порядковые номера описываемых ячеек. Материал в сеймотектоническом каталоге расположен в хронологическом порядке.

2. Название местности, в которой ощущалось сильнейшее для данной ячейки землетрясение. Иногда эпицентр землетрясения и населенный пункт, в котором отмечено землетрясение, не совпадают.

3. Координаты эпицентра землетрясения, сильнейшего из зарегистрированных в данной ячейке. Центры ячеек располагаются на пересечениях параллелей, проведенных через 10', с меридианами, проведенными через 15'.

4. Год, в котором произошло землетрясение.

5. Класс точности определения координат эпицентра.
6. Глубина очага землетрясения в километрах.
7. Магнитуда сильнейшего землетрясения (с точностью до 1/4).
8. Интенсивность сильнейшего из отмеченных землетрясений в эпицентре (в баллах по шкале MSK—64).

Сведения, помещенные в графах 2—8, даны по каталогу землетрясений Кавказа [24]. В соответствии с новым каталогом [93] данные, помещенные в графах 2—8 сеймотектонического каталога, несколько изменились. Характер этих изменений рассмотрен в табл. 7.

9. Принадлежность к определенной геотектонической зоне [138]. Код: 1—эпигерцинская платформа; 2—эпигерцинская платформа, подвергшаяся частичной переработке на альпийском этапе; 3 и 4—альпийская складчатая область (3—внешняя зона, 4—внутренняя зона).

10. Структурные этажи, обнажающиеся на дневной поверхности [138]. Код: 1—верхний структурный этаж (от верхнемиоценовых до четвертичных отложений); 2—средний этаж (от верхнего мела до среднего миоцена); 3—нижний этаж (от триаса до нижнего мела); 4—доальпийский этаж (палеозойские отложения).

11. Преобладающая тенденция тектонического развития на раннеальпийском этапе: триас—средняя юра [60]. Код: 1—интенсивные опускания; 2—опускания; 3—неустойчивый режим; 4—поднятия.

12. Преобладающая тенденция тектонического развития на альпийском этапе: верхняя юра—палеоген [60]. Кодовые обозначения те же, что в графе 11.

13. Суммарное выражение новейших (неоген-четвертичных) движений [76], качественная характеристика. Код: 1—интенсивные опускания, более 4 км; 2—опускания, от 1 до 4 км; 3—небольшие опускания и поднятия с амплитудой движений в пределах ± 1 км; 4—поднятия, от 1 до 4 км; 5—интенсивные поднятия, более 4 км.

14. Скорость современных вертикальных движений [72], качественная характеристика. Код: 1—интенсивные опускания, более 4 мм/год; 2—опускания, от 1 до 4 мм/год; 3—небольшие скорости вертикальных движений, в пределах ± 1 мм/год; 4—поднятия, от 1 до 4 мм/год; 5—интенсивные поднятия, более 4 мм/год; «?»—скорость неизвестна.

Графы 11—14 характеризуют основные черты тектонического развития территории на различных этапах. Кодовые обозначения составлены таким образом, что можно сравнивать тенденции развития от одного этапа к другому. Если смежные обозначения различаются на 1, то это означает ускорение или замедление происходящего процесса. Если же разница превышает 1 (составляет 2 или больше), то это означает существ-

Сейсмотектонический каталог землетрясений Кавказа с магнитудой $M \geq 5$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1. Сикух	41,9	47,8	1885	A						
2. Ахалкалаки	41,6	43,5	1899	A				3	3	1
3. Шемаха	40,7	48,6	1902	A	30	5,6*	VIII	4	1-2	4
4. Дарьял	42,8	44,7	1915	A	20	5 1/4-6 1/4	VIII	3	1-2	2
5. Гори	42,0	44,1	1920	A		5 1/2	VII	3	3-4	2
6. Кубань	45,6	39,3	1926	A		6	VIII	4	1-2	4
7. Ленинкакан	40,7	43,8	1926	AA		5	VII	1	1	4
8. Зангезур	39,3	46,0	1931	A	15**	5 1/2	VIII	4	1	3
9. Закавказье	41,6	46,6	1936	A	20	6 1/2	VIII	4	1-2-4	4
10. Табацкури	41,7	43,8	1940	A		5	VII	3	1-3	2
11. Гудамакари	42,5	45,0	1947	A	20	5 3/4	VIII	4	1-2	4
12. Барбало	42,3	45,3	1951	A		5 1/2	VII	3	3	1
13. Гегечкори	42,5	42,4	1957	A		5	VII	3	3	1
14. Степанаван	41,2	43,9	1959	A		5 1/4	VII-VIII	3	1-2-3	2
15. Поти	41,8	42,0	1959	A		5	VII-VIII	4	1-2-3-4	4
16. Чхалта	43,2	41,8	1963	A	10	5	VII-VIII	4	2	4
17. Аргун	42,9	45,7	1966	A	10	6 1/2	VIII-IX	3	1-3-4	1
18. Касумкент	41,6	48,1	1966	A		5	VII	3	1-2-3	1
19. Анапа	44,8	37,3	1966	A	36	5 1/2	VIII	3	1-2-3	1
20. Спитак	40,9	44,3	1967	A		5 1/4-5 1/2	VI	3	2-3	2
21. Зангезур	39,2	46,1	1968	A		5	VI-VII	4	1-2-4	4
22. Ачхой — Мартан**	43,3	45,2	1969	A		5	VIII	4	1-2-4	4
23. Боржоми**	41,8	43,3	1970	A		5		2	1	2
24. Дагестан**	43,0	47,1	1970	A		5		4	2	4
25. Бабадаг**	41,2	48,3	1971	A		6 1/2	VIII	3	1-2-3	2
						5 1/4		3	2-3	1

1	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1. Сикух	3	4	5	0	2,25	1,5	7	2	2	240	2	2	2	0,2
2. Ахалкалаки	2	4	?	3	1,75	0,5	?	?	0	0	1	2	1	0,6
3. Шемаха	1	3	5	0	0,5	2,0	6	4	3	910	3	2	4	0,6—2,0
4. Дарьял	3	3	5	1	1,0	6,0	5	2	0	0	2	3	2	0,2—0,6
5. Гори	3	3	4	0	0,5	4,0	3	0	3	330	3	2	1	0,2—0,6
6. Кубань	3	3	?	0	-1,0	0	?	?	0	0	3	1	1	0,06—0,2
7. Ленинакан	3	4	?	3	1,75	0,5	?	?	0	0	0	2	1	0,06—0,2
8. Зангезур	3	4	?	3	3,0	1,0	?	?	3	>200***	2	1	5	0,6—2,0
9. Закаталы	1	4	5	0	1,2	1,5	7	2	3	200	2	2	4	0,2—0,6
10. Табацкури	3	4	?	3	1,8	1,0	?	?	0	0	1	2	2	0,06—0,2
11. Гудамакари	3	4	5	0	3,25	0,5	8	0	3	80	2	3	2	0,2—0,6
12. Барбало	3	4	5	0	2,75	1,5	8	0	1	910	2	3	3	0,2—0,6
13. Гегечкори	3	3	4	0	1,0	2,0	3	0	3	330	2	2	1	0,2—0,6
14. Степанаван	3	4	?	3	2,0	1,0	?	?	3	30	1	2	1	0,06—0,2
15. Поти	2	4	4	0	1,75	1,5	2	0	0	0	0	2	4	0,06—0,2
16. Чхалта	3	4	5	0	3,5	1,0	7	2	1	910	2	3	3	0,2
17. Аргун	3	4	5	0	2,75	1,5	6	2	3	120	1	2	5	0,6
18. Касумкент	3	4	5	0	1,25	2,5	6	4	2	240	2	2	2	0,2
19. Аната	1	3	3	0	0,5	0,5	0	0	2	230	2	3	2	0,06—0,2
20. Спитак	2	4	?	3	2,25	0,5	?	?	3	280	3	2	1	0,06—0,2
21. Зангезур	3	4	?	3	2,5	2,0	?	?	0	0	2	1	5	0,2—0,6
22. Ачхой — Мартан**	1	4	4	0	1,5	4,0	2	0	3	400	0	1	2	0,2
23. Боржоми**	2	4	?	0	1,75	0,5	?	?	3	330	0	2	2	0,2—0,6
24. Дагестан**	2	4	4	0	1,25	0,5	2	0	2	240	0	1	3	0,2—0,6
25. Бабадаг**	3	4	5	0	1,75	3,5	7	2	0	0	3	3	4	0,2

* По В. Карник [157];

** По В. И. Бунэ [24].

*** Указана протяженность разрыва до границы СССР.

венную перестройку тектонического режима. Кодовое обозначение «5» (интенсивное поднятие) не использовано в графах 11 и 12 потому, что авторы не располагают материалами, которые позволяли бы судить об интенсивности процессов воздымания на альпийском этапе развития Кавказа.

15. Проявления вулканизма в новейшее время. По схеме историко-тектонического районирования Кавказа (см. рис. 2). Код: 0 — отсутствие проявлений; 1 — единичные вулканы; 2 — вулканотектонические депрессии; 3 — сплошное развитие эффузивов.

16. Суммарная амплитуда новейших движений (в км) [76]. Даются средние значения для описываемых ячеек. Положительные значения — поднятия, отрицательные — опускания.

17. Разность (размах) экстремальных значений суммарной амплитуды новейших движений в пределах ячейки (в км) [76]. Эта характеристика больше соответствует точности построения карт новейших движений, чем горизонтальный градиент скорости новейших движений, использовавшийся в предшествующих сеймотектонических исследованиях.

18. Скорость современных вертикальных движений (в мм/год) [72]. Даются средние значения для ячейки. Положительные значения — поднятие, отрицательные — опускание. Значения скорости современных движений известны не для всех районов Кавказа.

19. Разность (размах) экстремальных значений скорости современных вертикальных движений в пределах ячейки (в мм/год) [72].

20. Тип продольного (имеющего «кавказское» простирание) разрыва (по схеме историко-тектонического районирования Кавказа, см. рис. 2). Код: 0 — отсутствие; 1 — глубинный разлом, активность которого в новейшее время не установлена; 2 — флексура, зона контрастного сочленения областей, развивающихся в новейшее время по-разному; 3 — глубинный разлом, активный в новейшее время.

21. Общая длина продольного разрыва (любого из типов, указанных в графе 20), проходящего через ячейку (в км) (по схеме историко-тектонического районирования Кавказа, см. рис. 2).

22. Тип поперечного разрыва (по схеме историко-тектонического районирования Кавказа, см. рис. 2). Код: 0 — отсутствие; 1 — поперечный, активный в новейшее время разлом, проходящий внутри одной геотектонической зоны (см. графу 9); 2 — глубинный, активный в новейшее время поперечный разлом, пересекающий две или больше геотектонические зоны; 3 — разлом, пересекающий всю геосинклиналиную зону и затрагивающий смежные платформенные области.

23. Значения изостатической аномалии силы тяжести, средние значения для ячейки [3, 4, 25]. Код: 1 — отрицательные

аномалии; 2 — значения Δg_i от 0 до 70 мгал; 3 — значения Δg_i более 70 мгал.

24. Значения горизонтального градиента изостатической аномалии силы тяжести по М. Е. Артемьеву [25]. Код: 1 — значения градиента — от 0 до 0,5 мгал/км; 2 — от 0,6 до 1,0 мгал/км; 3 — от 1,1 до 1,5 мгал/км; 4 — от 1,6 до 2,0 мгал/км; 5 — более 2,0 мгал/км.

25. Значения сейсмической активности A_{10} по карте сейсмической активности [24].

Представленный каталог — первая попытка собрать разнородные сведения о геологических условиях возникновения землетрясений в удобном для обозрения и сравнения виде. Материалы, собранные в сеймотектоническом каталоге, — результат анализа данных, полученных многими исследователями тектоники Кавказа. Имеются большие возможности расширения круга используемых в каталоге характеристик, особенно за счет материалов геофизических работ. Необходимо также уточнить и детализировать имеющиеся геологические и сейсмологические данные.

Работа по составлению сеймотектонического каталога является необходимой составной частью большого цикла исследований, связанных с установлением геологических закономерностей возникновения землетрясений.

2. ПРИНЦИПЫ УСТАНОВЛЕНИЯ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК МАКСИМАЛЬНОЙ МАГНИТУДЫ ДЛЯ ЭТАЛОННЫХ ЯЧЕЕК

В предыдущем разделе работы мы уже писали подробно о принципах выбора участка, к которому следовало бы отнести геологическое описание зон возникновения землетрясений. Напомним здесь лишь, что его размеры должны соответствовать точности определения координат эпицентра, величине очаговых зон землетрясений определенной магнитуды и не быть очень большими, чтобы осреднение геологических характеристик не было бы чрезмерно грубым.

Как и при составлении сеймотектонического каталога, в качестве объектов геологического описания выбраны равноплощадные участки территории Кавказа (элементарные ячейки), имеющие форму кругов с радиусом 15 км. Центры ячеек помещены на пересечении параллелей, проведенных через $10'$, с меридианами, проведенными через $15'$.

Выборанный размер ячеек, по-видимому, нужно считать оптимальным. Описывать меньшие площади нецелесообразно, так как не будет гарантий того, что землетрясения, геологические условия которых описываются, произошли в данной, а не в соседней ячейке. Геологическое же описание более крупных участков будет чрезмерно обобщенным, вследствие чего

оно не будет соответствовать очаговой зоне рассматриваемого землетрясения.

Предлагая делать предметом геологического описания равноплощадные участки, территории, мы исходили из того, что никакая крупная поверхностная или глубинная структура на Кавказе не является единой в сейсмическом отношении, а контуры таких структур могут быть проведены по-разному в зависимости от того, какой признак структуры взят в качестве основного. Вместе с тем ниже будет показано, что принадлежность ячейки к определенным протяженным структурам, выходящим по размерам за пределы элементарной ячейки, также не выпала из поля зрения.

Главной задачей при прогнозировании сейсмической опасности с использованием геологических данных является определение веса, значимости той или иной геологической характеристики. Когда мы имеем перед собой геологическое описание крупного землетрясения или сейсмотектонический каталог (см. раздел I гл. IV), мы имеем дело с большим количеством геологических критериев сейсмичности. Их список еще более расширяется, если проводить сопоставление геологических и сейсмических явлений определенных территорий и анализировать условия, характерные для зон с высоким средним и слабым уровнем сейсмичности. При таком анализе выяснилось, что какие-то критерии в равной мере свойственны зонам возникновения сильных, средних и слабых землетрясений, другие — участкам, где зарегистрированы только сильные или слабые толчки.

Точно так же стало очевидным, что в зонах возникновения землетрясений с различной магнитудой одни и те же геологические критерии сейсмичности имеют разную степень проявления.

Следовательно, для того чтобы прогнозировать степень сейсмической опасности по геологическим данным, прежде всего нужно конкретно определить, какие именно признаки, с какой степенью проявления, в каких реальных сочетаниях определяют места возникновения очагов землетрясений, — сильных, средних и слабых. Возникает задача выяснения «компетентности» геологических критериев сейсмичности, меры ответственности каждого из них за распределение в пространстве участков с разным сейсмотектоническим потенциалом, количественного выражения величины вклада этих критериев в сейсмотектонический потенциал.

Примерно в том же виде формулировали прогностическую задачу Н. И. Николаев и П. Н. Николаев [83]: «Однако список таких факторов, достоверно связанных с изучаемым явлением, может быть практически неограниченно большим, и важно определить степень влияния каждого фактора с тем, чтобы дальнейший прогноз вести по ограниченному коли-

честву независимых и наиболее влиятельных факторов» (стр. 111).

Единственно возможный путь решения этой задачи — сравнительный анализ геологических описаний участков территории, для которых со 100%-ной уверенностью известно, что они принадлежат к разным категориям по степени их сейсмической опасности. Такое сравнение может быть проведено между каким-то количеством эталонных описаний ячеек определенных категорий, например, в пределах которых произошли землетрясения с $M=6\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$, $M=5\frac{1}{4} \pm \frac{1}{2}$, $M=4 \pm \frac{1}{2}$, если есть гарантии того, что более сильные землетрясения в пределах ячеек каждой категории в будущем не произойдут. В этом случае сравнительный анализ соответствующих геологических описаний позволит определить вес каждого из геологических параметров данного описания, на основе чего может осуществляться прогноз зон возникновения землетрясений с различной магнитудой. Заметим при этом, что во избежание случайностей (которые могут возникнуть хотя бы потому, что описание геологической обстановки мест возникновения землетрясений системой геологических критериев, или признаков только в некотором приближении соответствует реальной ситуации), эталонных геологических описаний зон возникновения каждой категории должно быть достаточно много. Это условие необходимо соблюдать еще и потому, что геологические условия зон возникновения землетрясений чрезвычайно разнообразны даже в пределах единой тектонической зоны, не говоря уже о гетерогенном по строению регионе, таком, например, как Кавказ.

Все другие пути решения проблемы веса определенных геологических критериев сейсмичности (например, путем сравнения геологических описаний зон возникновения землетрясений только с большой магнитудой) будут некорректными.

Итак, прежде чем решать основную проблему определения веса тех или иных геологических характеристик в их совокупности, характеризующей зоны возникновения землетрясений с различной магнитудой, необходимо решить предварительно не менее сложную промежуточную задачу со следующими двумя условиями:

1) в пределах региона найти определенное количество ячеек каждой категории (по максимальной магнитуде происшедших землетрясений);

2) найти доказательства того, что в пределах отобранных ячеек землетрясения с магнитудой больше установленной для данной категории невозможны. Поскольку геологические условия зон возникновения землетрясений являются предметом исследования, эти доказательства не могут основываться на геологических данных, а должны обеспечиваться сейсмологическими материалами.

Любому исследователю, занимающемуся вопросами сейсмологии и сейсмотектоники ясно, что решение этой промежуточной задачи с такими условиями на современном уровне наших знаний невозможно. Если бы можно было по сейсмологическим данным твердо установить M_{\max} для каждого участка определенной территории, вопрос о прогнозе места и силы землетрясений был бы закрыт. К сожалению, это не так. Единственное исключение относится к ячейкам высшей категории ($M=6\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$), при двух условиях: 1) статистика землетрясений соответствующего класса в данном регионе достаточна и 2) максимальная магнитуда зарегистрированных для данной категории землетрясений M^* в данном регионе не ниже максимальной возможной для этого региона $\text{Sup } M$, т. е. $M^* \cong M_{\max} \cong \text{Sup } M$.

По отношению к более низким по энергетической характеристике категориям нет никаких 100%-ных гарантий того, что $M^*=M_{\max}$. На допущении того, что $M^*=M_{\max}$ ранее строились все нормативные карты сейсмического районирования территории СССР (так называемый сейсмостатистический метод). Последствия всем достаточно хорошо известны по опыту Ашхабадского землетрясения 1948 г. Дагестанского 1970 г., Газлийских 1976 г. и ряда других.

Следует еще раз повторить, что безупречное решение задачи определения веса тех или иных геологических критериев сейсмичности, характеризующих зоны возникновения землетрясений с различной магнитудой, на современном уровне знаний невозможно по объективным причинам. Все решения, которые могут быть получены, лишь в большей или меньшей степени приближаются к оптимальному в зависимости от принятых допущений.

При разработке методики прогнозирования зон возникновения землетрясений с различной M_{\max} для территории Кавказа были выбраны три категории ячеек, принадлежащих областям высокой, средней и низкой сейсмичности, в которых M_{\max} составляла бы $6\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$, $5\frac{1}{4} \pm \frac{1}{2}$ и $4 \pm \frac{1}{2}$. При выборе этих градаций были приняты во внимание следующие соображения:

1) реальная точность определения магнитуды землетрясений составляет примерно $\frac{1}{4}$ единицы магнитуды;

2) землетрясения с магнитудой более 7 на территории Кавказа не были зарегистрированы;

3) землетрясения с $M=4$ могут возникать на Кавказе повсеместно, поэтому выделять категорию более низких значений не имеет смысла;

4) составление учебной выборки, как будет показано ниже, даже для трех градаций оказалось невозможным без целого ряда ограничений, поэтому введение более дробных градаций было бы неоправданным.

Реальная ситуация по территории Кавказа, для которого разрабатывалась методика, и требования к исходному материалу (не менее 30 ячеек учебного материала по каждой из выбранных категорий с различной магнитудой) вызвали необходимость введения следующих ограничений:

1) на территории Кавказа не ожидается землетрясений с $M > 7,0$, так как магнитуда сильнейших зарегистрированных землетрясений, происходивших в пределах региона $M^* = 6,9$ (Шемахинские, 1667 и 1902 гг., Кировобадское, 1139 г.; [93]);

2) в учебную выборку можно включить те ячейки территории, в пределах которых произошли землетрясения, относящиеся по точности определения координат к классу В (± 50 км); предполагается, что специалисты-сейсмологи имели известные основания поместить эпицентры таких землетрясений именно в данные пункты;

3) уровень сейсмичности, отмеченный в населенных пунктах с многовековой историей, можно в целом считать характерным для включающих их элементарных ячеек.

Даже при введении этих условий учебного материала оказывается недостаточно. Например, для категории $M = 6\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ набирается по всему Кавказу лишь 18 ячеек, а для второй категории ($M = 5\frac{1}{4} \pm \frac{1}{2}$) — 7 ячеек вместо необходимых 30. Поэтому было введено еще одно ограничение;

4) в некоторых случаях при установлении M_{\max} было сочтено возможным использовать оценки, основанные на геологических данных.

С методической точки зрения наиболее неприятными ограничениями являются последние два. Это вполне понятно: использование первого из них означает возвращение (хотя и в незначительной мере) к порочному сейсмостатистическому методу установления M_{\max} , а второго — введение в исходные данные (главным образом по отношению к ячейкам второй категории) материалов, которые являются предметом исследования.

В результате при подготовке исходных данных для решения задачи была применена некоторая разновидность эвристического подхода к определению оценок M_{\max} . Эталонные ячейки учебного материала представляют собой не площади с разными «истинными» значениями M_{\max} (за исключением 18 ячеек первой категории при введении первого из перечисленных выше ограничений), а площади с экспертными значениями M_{\max} . Соответственно, и в результате последующих операций по решению задачи будут найдены закономерности, связыва-

* В литературе высказывалось мнение о том, что на Кавказе сильнейшие землетрясения прошлого достигали интенсивности IX—X баллов [134, 135]. Однако приводимые Н. И. Николаевым [82] данные позволяют усомниться в том, что такие землетрясения в этом регионе имели место.

ющие особенности геологической обстановки с экспертными оценками M_{\max} . Преодолеть различие между истинными значениями магнитуды и их экспертными значениями в настоящее время невозможно. К решению проблемы M_{\max} и $SupM$ даже не найдено сколько-нибудь реальных подходов, если говорить о дифференцированной оценке этих параметров для сравнительно небольших по площади участков, а не регионов или больших территорий в целом.

При разработке рассматриваемой методики были сделаны попытки в какой-то степени уменьшить влияние принятых нами ограничений на решение задачи. В частности, в первую категорию (помимо 18 отмеченных выше ячеек) были включены дополнительно только те ячейки, в пределах которых были зарегистрированы землетрясения с $M \geq 5,0$. Кроме того, была введена система весовых коэффициентов для ячеек, отобранных для решения задачи. Их величина зависела от магнитуды максимального зарегистрированного в пределах ячейки землетрясения и точности определения его координат (АА и А, или В) (табл. 5).

Таблица 5

Система весовых коэффициентов для ячеек учебной выборки

Категория области по оценкам максимальной магнитуды ожидаемых землетрясений	Экспертная оценка максимальной магнитуды, M_{\max}	Сейсмостатистическая характеристика участков территории, включенных в учебную выборку		Весовой коэффициент (степень уверенности при оценке M_{\max})
		Наибольшая отмеченная магнитуда землетрясений, M^*	Точность определения эпицентра, км	
Первая	$6\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$	$6\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$	15—25	8
		$6\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$	50	4
		$5\frac{1}{4} \pm \frac{1}{2}$	15—25	2
		$5\frac{1}{4} \pm \frac{1}{2}$	50	1
Вторая	$5\frac{1}{4} \pm \frac{1}{2}$	$5\frac{1}{4} \pm \frac{1}{2}$	15—25	4
		$5\frac{1}{4} \pm \frac{1}{2}$	50	2
		$> 4\frac{3}{4}$		1
Третья	$4 \pm \frac{1}{2}$	$4 \pm \frac{1}{2}$		4
		$2\frac{3}{4} \pm \frac{1}{2}$		2
		$> 2\frac{1}{4}$		1

Составленный экспериментальный материал состоит из 93 ячеек, что составляет по площади около 8% всей территории Кавказа. Распределение ячеек экспериментального материала показано на рис. 12.

В первую категорию вошли участки, в пределах которых уже произошли землетрясения с $M \geq 6$. Кроме того, к этой категории отнесен ряд ячеек, в которых зарегистрированы землетрясения с меньшей магнитудой (но не меньше 5). Эти ячейки расположены в зонах ограничения крупных (порядка 30—50 км) блоков земной коры, соответствующих зонам глубинных разломов, активных в новейшее время.

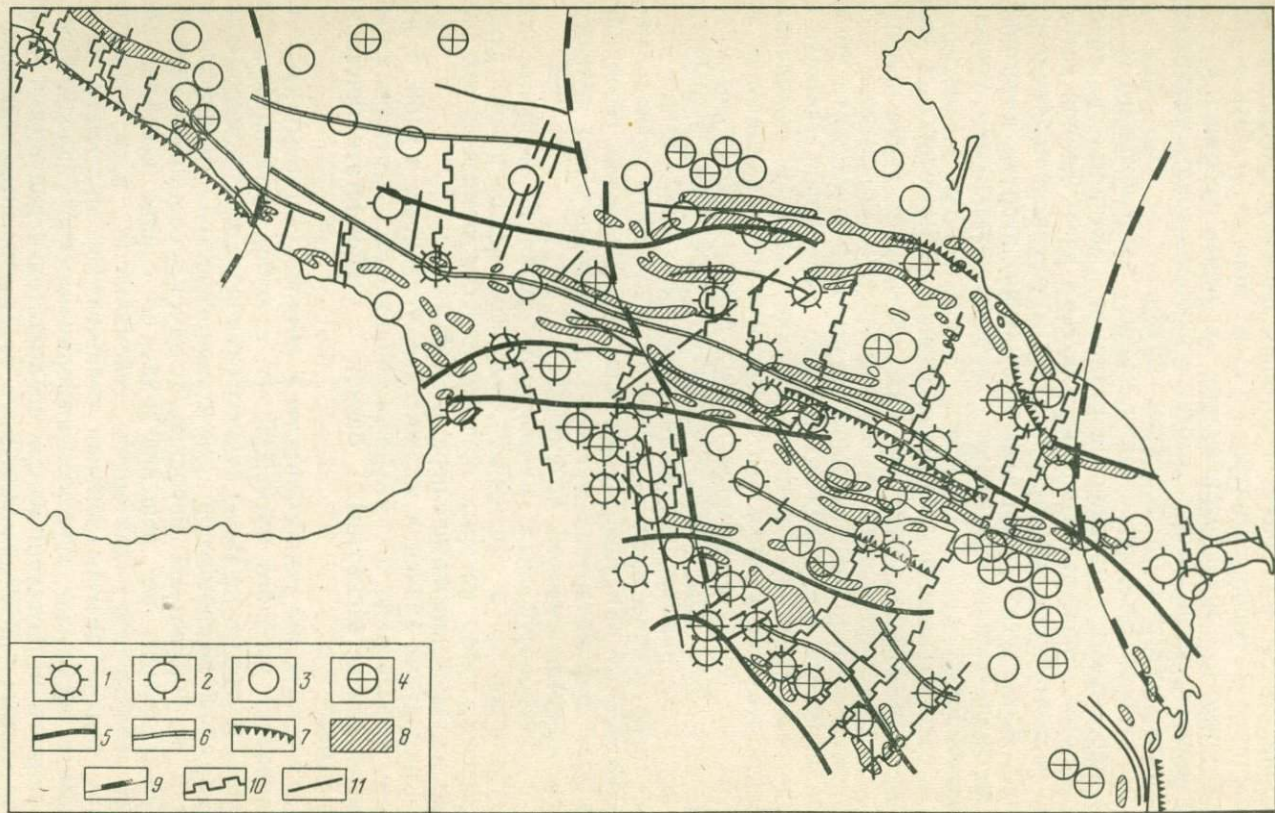
Во вторую категорию вошли ячейки, расположенные в зонах продольных и поперечных разломов, активных в новейшее время. Экспертная оценка для семи ячеек данной категории соответствует зарегистрированным магнитудам землетрясений. Для других ячеек, включенных во вторую категорию, экспертная оценка превышает зарегистрированный уровень сейсмичности.

В третью категорию вошли ячейки, включающие в себя населенные пункты, где в течение нескольких веков сильные и средние землетрясения не отмечались. Мы стремились к тому, чтобы ячейки учебной выборки были бы в какой-то степени равномерно распределены по всей территории Кавказа и представляли бы все геотектонические зоны. К сожалению, сделать этого не удалось: во внутренней геосинклинальной зоне Малого Кавказа, например, явно преобладают ячейки первой категории; для выделения здесь большого количества асейсмичных районов нет достаточных оснований. Таким образом, легко можно предвидеть, что в результате исследования окажется, что признаки, отличающие внутреннюю геосинклинальную зону от других зон Кавказа, одновременно являются и признаками высокой сейсмичности.

С помощью весовых множителей учебный материал как бы увеличивался в объеме за счет повторного рассмотрения тех ячеек, отбор которых проводился без принятия тех или иных из отмеченных выше ограничений.

Конкретные значения множителей, указанных в табл. 5, выбраны произвольно, но ими можно варьировать, стремясь к наилучшей увязке экспертных оценок с сейсмостатистическими данными.

В заключение данного раздела хотелось бы отметить, что составление учебного материала (т. е. отбор эталонных ячеек разной категории по M_{\max}) является наиболее ответственной и наиболее сложной проблемой сейсмогеологической части исследований по формальной методике. От того, как составлена учебная выборка, зависит все решение задачи по оценке весов тех или иных геологических критериев сейсмичности и, в конечном счете, задача прогнозирования сейсмической опасности. Подготовить абсолютно «чистую» выборку нам не удалось. Представляется, что сделанные при ее подготовке допущения являлись минимально необходимыми в тех конкретных условиях, в которых готовился учебный материал.



Несмотря на то что были сделаны попытки уменьшения влияния сделанных ограничений на ожидаемый результат, уже на этой стадии работы можно было предвидеть, что наименее благополучно дело обстоит с учебными ячейками второй категории с $M=5\frac{1}{4}\pm\frac{1}{2}$: эта часть выборки, как было показано, составлялась с максимальным использованием геологических данных. Как будет показано ниже, это положение с учебными ячейками второй категории найдет отражение и при решении последующих задач по определению весов различных геологических критериев сейсмичности и прогнозированию сейсмической опасности.

3. ИЗУЧЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ОТБОР ПАРАМЕТРОВ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ЭТАЛОННЫХ ЯЧЕЕК

В результате более ранних работ по территории Кавказа (см. разделы 1 гл. III и IV) был установлен достаточно большой список геологических критериев сейсмичности этого региона. Использовать его целиком для решения отмеченных выше задач было бы невозможным по следующим причинам: 1) при большом количестве параметров геологического описания эталонных ячеек разной категории снижается устойчивость получаемого решения. Поэтому необходимо было ограничить такое описание примерно 10 признаками (с некоторыми градациями внутри них, или в непрерывной шкале); 2) геологическое описание не должно было включать признаки, сведения о которых были бы неизвестны хотя бы для некоторой части учебных ячеек, отобранных для последующего анализа. В результате из рассмотрения сразу же были исключены, например, данные о современных движениях земной коры, неизвестные для южной части Кавказского региона; 3) не было уверенности в том, что все геологические критерии сейсмичности являются информативными, т. е. имеют существенно разные показатели для ячеек, принадлежащих категориям с разными экспертными

Рис. 12. Схема расположения экспериментального материала на Кавказе [26].

Категория ячеек:

1 — первая (экспертная оценка $M_{\max} = 6\frac{1}{2}\pm\frac{1}{2}$); 2 — вторая (экспертная оценка $M_{\max} = 5\frac{1}{4}\pm\frac{1}{2}$); 3 — третья (экспертная оценка $M_{\max} = 4\pm\frac{1}{2}$); 4 — ячейки всех категорий, в пределах которых отмечались землетрясения с магнитудой, соответствующей экспертной оценке; 5 — активные в новейшее время зоны глубинных разломов; 6 — зоны глубинных разломов, активность которых не установлена; 7 — зоны контрастных сочленений; 8 — зоны высоких значений градиента скорости новейших тектонических движений; активные в новейшее время поперечные разломы; 9 — первого порядка, 10 — второго порядка, 11 — связанные с вулканизмом

оценками M_{\max} . Следовательно, необходимо было провести анализ информативности каждого из выделенных ранее геологических критериев сейсмичности с тем, чтобы не включать в описание учебных ячеек те из них, которые оказались неинформативными.

Изучение информативности геологических критериев сейсмичности является чрезвычайно сложной методической задачей [90, 91]. В наших исследованиях этот цикл работ выполнял Б. А. Борисов [15], причем информативными считались те геологические признаки, которые имели разные средние значения в ячейках, относящихся к разным категориям по M_{\max} . Вычислялись средние и средневзвешенные значения, и их распределения для разных категорий ячеек практически не отличались между собой. Вычисление средних значений — не лучший способ изучения информативности (более строгие результаты, как показал П. Н. Николаев [91] возможно получить с использованием дисперсионных методов анализа). Однако и этот метод позволил отбраковать ряд неинформативных геологических параметров и некоторые из них, информативные для определенных геотектонических зон Кавказа, но не для всего региона в целом.

В результате проведенной работы для геологического описания ячеек учебной выборки, принадлежащих разным категориям по M_{\max} , было отобрано 10 признаков.

Для удобства дальнейшего анализа значения всех исследуемых параметров были выражены в процентах от максимального значения каждой характеристики на территории Кавказа. Геологические характеристики, не имеющие численного выражения, были разбиты на градации, упорядоченные по степени интенсивности проявления тектонических процессов. При этом каждой градации дано определенное число процентов — от 0 до 100, где 100% означает высшую градацию данной характеристики, а промежуточные значения определяют различные геологические явления, характерные для менее интенсивного тектонического режима.

Ниже дается перечисление граф (признаков, или параметров) геолого-геофизического описания экспериментального материала в том порядке, как они помещены в табл. 6*, и расшифровываются кодовые обозначения для градаций параметров, не имеющих количественного выражения.

1. Характер перестройки тектонического режима в новейшее время. Градации: а) участки устойчивых поднятий, испытавшие глыбовые дифференцированные движения (100%); б) новообразованные в мезозое и кайнозое (до миоцена) поднятия на месте устойчивых ранее прогибов (50%); в) поднятия, воз-

* В табл. 6 приведена часть учебной выборки.

никшие не раньше миоцена, и участки продолжающегося прогибания, не испытавшие перестройки (0).

2. Близость к предгорьям: характеристика, обратная суммарному выражению (амплитуде) новейших движений. При анализе информативности этого признака обнаружилось, что амплитуды новейших движений имеют обратную связь с M_{\max} . Этот несколько неожиданный результат анализа имеет, однако, простое истолкование: сейсмичные области тяготеют к зонам сочленения горных и равнинных областей, где средний для ячейки суммарный результат новейших вертикальных движений имеет минимальную величину. Обозначение «100%» соответствует участкам, где амплитуда новейших движений не

Таблица 6

Учебная выборка для решения экспериментальной задачи зоны
Большого Кавказа

(Экспертная оценка $M_{\max} = 6^{1/2} + 1/2$)

Название местности, год, магнитуда и класс точности определения координат эпицентра землетрясения*)	Весовой множитель	Номер ячейки**	Геолого-геофизические характеристики в относительной мере***										Прогнозные значения M_{\max}^{****}
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Чхалта; 1963; 6,5; А	8	4548	100	29	17	0	100	0	67	50	100	45	6,6
Северный Дагестан; 1970; 6,6; А	8	4853	50	100	8	0	100	100	0	0	100	40	6,5
Сикух; 1885; 6; А	8	5816	50	45	25	0	0	100	67	100	33	17	6,5
Шемаха; 1902; 6; А	8	5967	50	100	33	0	100	100	100	100	100	53	6,7
Самур;	4	5829	50	40	50	0	100	100	0	0	100	24	6,6

Название местности, год, магнитуда и класс точности определения координат эпицентра землетрясения*	Весовой множитель	Номер ячейки**	Геолого-геофизические характеристики в относительной мере***										Прогнозные значения M_{max} ****
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1667; 6; В Шемаха;	4	5968	50	100	17	0	50	100	0	0	100	50	6,5
1869; 6; В Анапа;	2	3362	50	100	8	0	100	100	67	100	3	23	6,3
1966; 5,4; А Гегечкори;	2	4675	50	100	33	0	50	100	67	100	100	15	6,7
1957; 5,0; А Дарьяльское ущелье;	2	4760	50	100	100	100	50	0	67	0	100	30	6,7
1915; 5,5; А р. Аргун;	2	4764	50	36	25	0	100	100	33	50	100	63	6,7
1966; 5,0; А Гора Барбало; 1951; 5,5; А	2	4786	50	33	25	0	50	0	67	50	100	44	6,5
Закаталы; 1936; 5,0; А	2	5819	50	83	25	0	100	100	67	100	100	60	6,7
Шеки; 1953; 4,8; А	2	5846	50	67	50	0	100	100	0	0	100	69	6,6
Касумкент; 1966; 5,5; А	2	5917	50	83	42	0	50	100	67	100	33	28	6,6
Бабадаг; 1971; 5,5; А	2	5942	50	67	58	0	50	0	100	0	100	57	6,4
Сочи; 1870; 5; В	1	4424	50	83	33	0	100	100	100	100	10	36	6,6

* В указанной местности ощущалось землетрясение, сильнее в данной ячейке;

** по единой номенклатуре для Кавказа;

*** расшифровка кода — в тексте гл. IV;

**** вычислены по результатам решения экспериментальной задачи с помощью одномерных нелинейных преобразований.

превышает 1 км; для других участков численное выражение данного параметра получается из выражения: $100/a$, где a — разность амплитуд в пределах ячейки, км.

С карты новейших движений снимается средняя для ячейки (a не максимальная) амплитуда.

3. Разность экстремальных значений («размах») амплитуды новейших движений в пределах ячейки. Учитываются только те разности амплитуд, которые связаны с относительными движениями фундамента. Если же установлено, что новейшие движения поверхности осадочного чехла связаны со складкообразованием внутри осадочного чехла и не затрагивают фундамент, то в данной графе выборки записывается 0. Максимальное значение разности амплитуд относительных движений блоков фундамента на Кавказе, как оказалось, составляет 6 км (для кругов с радиусом 15 км), так что относительное значение этого признака, записываемое в учебную выборку, получается из выражения:

$$\frac{\Delta a \cdot 100}{6}$$

где Δa — разность амплитуд в пределах ячейки, км.

4. Проявления неоген-четвертичного вулканизма. В учебной выборке всем проявлениям неоген-четвертичного вулканизма дано обозначение «100%», независимо от того, отмечается ли сплошное развитие эффузивов, или имеются вулкано-тектонические депрессии, или отдельные вулканические аппараты. Дело в том, что в учебной выборке оказалось недостаточно ячеек, в которых отмечалось бы иное проявление вулканизма, чем развитие эффузивов.

5. Геотектоническая неоднородность, т. е. попадание в пределы ячейки двух или более условных знаков на карте историко-тектонического районирования рис. 2. Градации: а) более двух условных знаков (100%); б) два условных знака (50%); в) в геотектоническом отношении ячейка однородна (0).

6. Протяженность продольного активного в новейшее время глубинного разлома или зоны контрастного сочленения областей, развивавшихся по-разному в новейшее время. Градации: а) 100 км и более (100%); б) от 20 до 100 км (50%); в) активных разломов нет (0).

7. Тип поперечного разлома по той же классификации, которая использовалась при составлении сейсмотектонического каталога землетрясений Кавказа (см. раздел 1 гл. IV). Градации: а) разлом, пересекающий всю геосинклинальную зону, — разлом I порядка (100%); б) разлом, пересекающий две или больше геотектонических зон, — разлом II порядка (67%); в) разлом III порядка, не выходящий за пределы одной зоны (33%); к этой же градации относятся разломы, ус-

танавливаемые по наличию цепочек вулканических аппаратов; г) активных поперечных разломов нет (0).

8. Узлы пересечения продольных и поперечных разломов. Необходимость учета этого параметра (безусловно, коррелированного с двумя предыдущими) связана с тем, что иногда отмечается «активизация» продольных разломов (казалось бы, неактивных в новейшее время) в местах пересечения с поперечными разломами. Градации: а) пересечение активных продольных разломов с поперечными I и II порядков; пересечение продольного разлома, активность которого в новейшее время не установлена, с поперечным разломом I порядка (100%); б) пересечение активных продольных разломов с поперечными III порядка; пересечение продольных разломов, активность которых не установлена, с поперечными разломами II и III порядка (50%); в) узлов нет (0).

9. Сейсмическая активность A_{10} . Градации этой характеристики соответствуют градациям карты сейсмической активности Кавказа, составленной под руководством В. И. Бунэ [24]: а) $A_{10}=0,6 \div 2,0$ (100%); б) $A_{10}=0,2 \div 0,6$ (33%); в) $A_{10}=0,06 \div 0,2$ (10%); г) $A_{10}=0,02 \div 0,06$ (3%).

10. Горизонтальный градиент изостатических аномалий силы тяжести. Карта распределения значений градиента изостатических аномалий для Кавказа составлена в Институте физики Земли АН СССР под руководством М. Е. Артемьева [25]. В учебной выборке показаны значения градиента в процентах от максимального значения, отмеченного на Кавказе.

Кроме двух последних, все другие характеристики, включенные в описание экспериментального материала, были взяты из методической работы по Кавказу, выполненной в ИФЗ АН СССР [24] и основанной на результатах проведенных ранее научных исследований. В «Карту геологических критериев сейсмичности» из указанной работы автором (совместно с И. В. Кирилловой) были внесены небольшие изменения, соответствующие результатам более позднего изучения. Учебная выборка (см. табл. 6) состоит из описаний 93 ячеек, расположенных в следующем порядке: 1) по категориям экспертных оценок; 2) внутри каждой категории — по продольным структурным зонам (полосам): Предкавказский передовой прогиб, Большой Кавказ (см. табл. 6), Закавказский межгорный прогиб и Малый Кавказ; 3) внутри каждой зоны — в порядке убывания весовых коэффициентов; 4) внутри каждой группы с одинаковыми весовыми коэффициентами — в порядке возрастания номеров единой номенклатуры ячеек для Кавказа [21].

После выхода в свет нового каталога [93] появилась возможность проверить качество составленной нами выборки для решения экспериментальной задачи с точки зрения точности определения магнитуды, координат эпицентра и глубины землетрясений. Данные для такого анализа по отношению к ячей-

Проверка качества учебной выборки для ячеек первой категории

с экспертной оценкой $M = 6^{1/2} + 1/2$

№ п/п	Название, год	М по табл. 6	М по новому каталогу [93]	Координаты			
				по табл. 6		по новому каталогу [93]	
				Широта	Долгота	Широта	Долгота
1.	Чхалта, 1963	6,5	6,4	43,10	41,45	43,25	41,35
2.	Сев. Дагестан, 1970	6,6	6,6	43,00	47,00	43,00	47,09
3.	Сикух, 1885	6,0	4,0	41,50	47,45	41,54	47,48
4.	Шемаха, 1902	6,0	6,9	40,40	48,30	40,42	48,36
5.	Самур, 1667	6,0	6,5	41,30	47,0	41,42	47,18
6.	Шемаха, 1869	6,0	5,2	40,40	47,45	39,54	48,18
7.	Анапа, 1966	5,4	5,8	44,50	37,15	44,42	37,18
8.	Гегечкори, 1957	5,0	5,3	42,30	42,30	42,30	42,24
9.	Дарьял, 1915	5,5	5,4	42,50	44,45	42,48	44,42
10.	Аргун, 1966	5,0	4,9	42,50	45,45	43,03	45,43
11.	Барбало, 1951	5,5	5,3	42,20	45,15	42,18	45,18
12.	Закаталы, 1936	5,0	5,3	41,40	46,30	41,30	46,36
13.	Шеки, 1953	4,8	4,9	41,10	47,15	41,06	47,24
14.	Касумкент, 1966	5,5	5,4	41,40	48,00	41,47	48,09
15.	Бабадаг, 1971	5,5	5,5	41,10	48,15	41,14	48,38
16.	Сочи, 1870	5,0	5,3	43,40	39,45	43,36	39,54
17.	Алаверди, 1742	6,0	6,0	42,00	45,15	42,06	45,12
18.	Кировабад, 1139	6,0	6,9	40,40	46,30	40,18	46,18
19.	Поти, 1887	5,0	4,9	42,00	42,00	42,06	42,00
20.	Телави, 1902	5,0	4,4	41,50	45,45	41,32	45,36
21.	Кировабад, 1907	5,0	5,0	40,50	46,15	41,12	46,30
22.	Гори, 1920	6,0	6,2	42,00	44,00	42,00	44,06
23.	Зангезур, 1931	6,5	6,3	39,20	46,00	39,12	46,00
24.	Ахалкалаки, 1899	6,0	5,4	41,40	43,30	41,36	43,30
25.	Ахалкалаки, 1088	6,0	5,3	41,20	43,30	41,36	43,30
26.	Севан, 1827	6,0	5,0	40,30	44,15	40,30	44,48
27.	Ереван, 1679	6,0	5,9	40,10	44,30	40,06	44,42
28.	Двин, 851	6,0	5,2	40,00	44,30	40,00	44,36
29.	Вайоцзор, 906	6,0	5,7	39,50	45,15	39,42	45,06
30.	Вайоцзор, 735	6,0	5,8	39,40	45,30	39,42	45,30
31.	Татев, 1308	6,0	6,1	39,30	46,45	39,24	46,12
32.	Табактури, 1940	5,7	6,0	41,40	43,45	41,42	43,48
33.	Ленинакан, 1926	5,0	5,7	40,40	43,45	40,42	43,42
34.	Степанаван, 1959	5,2	5,4	41,10	44,00	41,12	43,46
35.	Спитак, 1967	5,2	5,0	40,50	44,15	41,03	44,19
36.	Михета, 1318	5,0	5,5	41,50	43,45	41,56	44,42
37.	Табактури, 1940	5,2	3,6	41,30	44,00	41,30	43,48
38.	Севернее Еревана, 1910	5,0	4,5	40,40	44,30	40,48	44,36
39.	Ереван, 1932	5,2	—	40,10	45,00	—	—

кам первой категории с экспертной оценкой магнитуды $M = 6\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ суммированы в табл. 7.

Что касается точности определения координат эпицентра и глубины очага, то новые данные практически совпадают с теми, которые использовались для подготовки учебной выборки. Если же говорить о магнитудах, то изменения коснулись 34 землетрясений из 39, и на этих изменениях (точнее, на их последствиях) следует остановиться подробнее.

В ячейках с Сикухским землетрясением 1885 г. (№ 3), Телавским 1902 г. (№ 20), Табацкурским 1940 г. (№ 37), к северу от Еревана 1910 г. (№ 38) магнитуды оказались значительно ниже, чем предполагалось (соответственно 4,0; 4,4; 3,6; 4,5), а в ячейке № 39 по новому каталогу [93] вообще землетрясений не происходило. По этой причине указанные пять ячеек введены в учебную выборку неправильно, так как в первую категорию в виде исключения включались только те ячейки, в пределах которых уже происходили землетрясения с магнитудой $5,9 \geq M \geq 5,0$.

В следующей группе 16 ячеек: в них отмечались землетрясения с магнитудой, меньшей, чем предполагалось ранее, но не менее 5,0. Следовательно, введение их в первую категорию с экспертной оценкой $M = 6\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ возможно. Напомним, что изменение значений магнитуды землетрясений при решении экспериментальной задачи ведет только к изменениям весовых коэффициентов в соответствии с табл. 5. Из общего числа землетрясений этой группы в восьми случаях весовые коэффициенты не изменились, так как магнитуды для номеров 1, 9, 23 оказались не ниже 6,0, а для номеров 10, 11, 14, 19, 35 — в диапазоне $5,9 \geq M \geq 5,0$, как и считалось ранее.

В восьми случаях (номера 6, 24—30) магнитуда изменилась таким образом, что вместо $M \geq 6,0$ оказалось $5,9 \geq M \geq 5,0$. Однако по точности определения координат все эти землетрясения относятся к классу В и уже имеют низкий коэффициент, равный 1 по табл. 5.

Следовательно, изменение магнитуды землетрясений во всех 16 ячейках этой группы несколько не повлияло на качество учебной выборки. Заметим, кстати, что под № 6 в табл. 7 показана ячейка с Шемахинским землетрясением 1869 г., магнитуда которого предполагалась ранее $M = 6,0$. По новому каталогу [93] она составляет 5,2. Однако в ячейке с теми же координатами произошло другое Шемахинское землетрясение 1667 г. с $M = 6,9$. Как только что было показано, и это изменение не должно влиять на величину весового коэффициента ячейки.

Последнюю группу составляют 14 ячеек, на площадях которых происходили землетрясения с большей магнитудой, чем предполагалось ранее. По отношению к 12 из них весовые коэффициенты по табл. 5 не изменились, так как в пяти (№ 4,

5, 18, 22, 31) магнитуды землетрясений остались не ниже 6,0, а для семи (№ 7, 8, 13, 16, 33, 34, 36) — в диапазоне $5,9 \geq M \geq 5,0$. Формально к этой же группе относится и ячейка с Закавказским землетрясением 1936 г. (№ 12). Однако по новым данным в ячейке с теми же координатами произошло Закавказское землетрясение 1948 г. с $M=6,7$, в связи с чем весовой коэффициент этой ячейки должен быть увеличен с 2 до 4, так как точность определения координат эпицентра составляет $\pm 0,5^\circ$. Должен быть изменен с 2 до 8 и весовой коэффициент ячейки с Табацкурским землетрясением 1940 г. (№ 32), так как по новым данным его магнитуда составляет 6,0, а точность определения координат $\pm 0,1^\circ$.

Как следует из табл 6, 7, всего в первой категории учебной выборки было 39 ячеек. После проведенной проверки оказалось, что в двух ячейках необходимо ввести другие весовые коэффициенты, а пять ячеек нельзя использовать в учебной выборке. Как будет показано ниже, этот результат существенно не повлиял на качество решения экспериментальной задачи.

4. РЕШЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ

Экспериментальную задачу, решить которую было необходимо для последующего прогнозирования сейсмической опасности, можно сформулировать следующим образом: определить вклад каждого геологического признака, выбранного для описания эталонных ячеек учебного материала, в величину магнитуды, соответствующую принадлежности данной ячейки к той или иной категории по экспертной оценке M_{\max} . При успешном решении, тем самым, определялся вес каждого геологического параметра в тех их сочетаниях, какие имелись для 93 случаев подготовленной учебной выборки. При решении этой задачи нельзя было допустить, чтобы какой-то признак имел подавляющее преимущество над другими. Это противоречило бы всему накопленному опыту сеймотектонических исследований, которым неизбежно установлена связь зон возникновения землетрясений с различной магнитудой с совокупностью многих геологических критериев сейсмичности (подробнее об этом мы писали в главах I—II).

В связи с этим функционал, избранный для решения экспериментальной задачи, должен был иметь вид суммы вкладов определенного количества признаков, причем эти вклады должны иметь сравнимые между собой величины.

Решение экспериментальной задачи было выполнено в ИППИ АН СССР. Не останавливаясь здесь на математической стороне решения экспериментальной задачи (принципиальная сторона вопроса изложена в работах [43, 140, 148], а в конкретном применении к данной проблеме в работах [21, 26, 28, 29]), отметим лишь некоторые его аспекты.

Математическая формулировка задачи сводилась в упрощенном виде к нахождению прогнозирующей функции $f(x_1, x_2, \dots, x)$, значения которой как можно меньше отличались бы от значений экспертных оценок M_{\max} ячеек учебного материала при данном его геологическом описании:

$$\sum_{r=1}^R [(f_r - M_{\max r})^2 S_r] = \min,$$

где f — прогноз магнитуды для ячеек с известной экспертной оценкой M_{\max} ; S — весовой множитель; r — порядковый номер ячейки в учебной выборке ($r=1, 2 \dots R$).

Характер прогнозирующей функции был задан в следующем виде:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_i) = z = \left[\sum_{i=1}^I \Phi_i(x_i) \right],$$

где x_i — параметры (значения геологических характеристик); z и Φ_i — искомые функции; i — номер геологической характеристики ($i=1, 2, 3 \dots I$).

Введение функции z в функционал продиктовано необходимостью получения более точного значения прогноза (более близкого экспертной оценке M_{\max}), а также для того, чтобы прогноз магнитуды не превышал 7 и не был много меньше 4 (таковы были ограничения при подготовке учебной выборки).

На рис. 13 полученное решение экспериментальной задачи показано в виде серии графиков. На них отмечено влияние (вес, вклад) каждого геологического параметра на величину магнитуды. Размах графиков функций φ_2 и φ_5 (близость к предгорьям и геотектоническая неоднородность) оказался сравнительно невелик, только поэтому они не показаны на рис. 13. Решение экспериментальной задачи может быть представлено и в виде номограмм (двойных шкал), более удобных для эксплуатации полученного решения — прогнозного выделения зон возникновения землетрясений с различной магнитудой (рис. 14). На этом рисунке представлено влияние всех геологических параметров, отобранных для описания ячеек учебной выборки.

Рассмотрим результаты полученного решения подробнее, предпослав этому анализу одно замечание. На рис. 14 правые шкалы показаны равномерными и каждое деление отвечает примерно 0,1 условной единицы (или $1/4$ единицы магнитуды без учета корректирующего влияния функции z — самой правой номограммы). Понятно, что точное соответствие каждой градации геологической характеристики значениям с точностью $1/4$ единицы магнитуды не соответствует точности решения задачи. Вместе с тем брать эти значения с меньшей точностью (до единиц магнитуды) было бы неправильно, так как

при суммировании величины вклада в магнитуду каждой из 10 геологических характеристик ошибка, связанная с таким округлением, возрастает до недопустимой величины. Иными словами, индивидуальная точность вклада каждого параметра может быть выражена в относительном, качественном виде, а суммарный прогноз магнитуды для каждой ячейки — в абсолютном, количественном.

Из рис. 14 следует, что наиболее тесно с магнитудой земле-

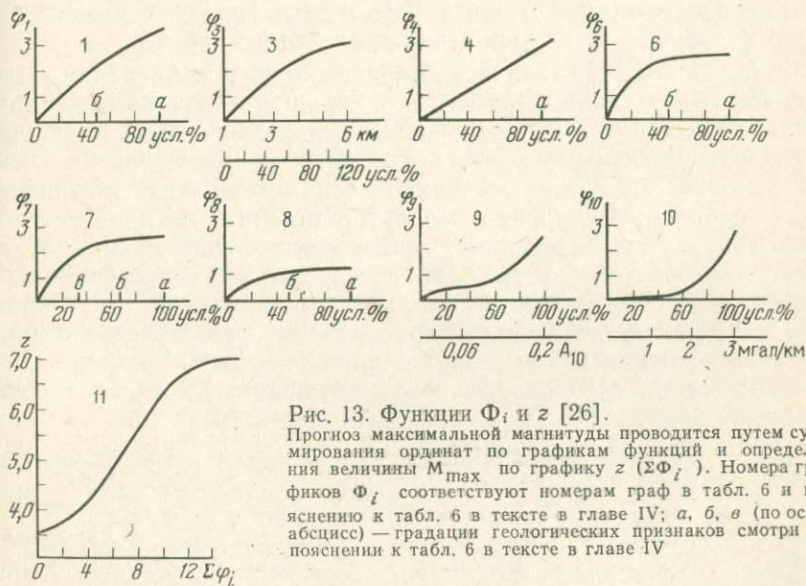


Рис. 13. Функции Φ_i и z [26].

Прогноз максимальной магнитуды проводится путем суммирования ординат по графикам функций и определения величины M_{\max} по графику $z(\Sigma\Phi_i)$. Номера графиков Φ_i соответствуют номерам граф в табл. 6 и пояснению к табл. 6 в тексте в главе IV; а, б, в (по осям абсцисс) — градации геологических признаков смотри в пояснении к табл. 6 в тексте в главе IV

трясений связана сейсмическая активность A_{10} , максимальной градации которой отвечает вклад в магнитуду 3,2 условных единицы. Этот результат в целом соответствует характерной для Кавказа ситуации: сильные землетрясения возникают по большей части в районах с интенсивным проявлением слабой сейсмичности, т. е. в местах активного проявления современного тектонического процесса.

По степени связи с магнитудой землетрясений остальные геологические параметры могут быть расставлены в следующий нисходящий ряд: характер перестройки тектонического режима в новейшее время (максимальный вклад в величину магнитуды составляет 2,8 условной единицы); протяженность активного в новейшее время продольного разрывного нарушения (2,74); проявления новейшего вулканизма (2,4), размах амплитуды новейших тектонических движений (2,1); горизонтальный градиент изостатической аномалии силы тяжести (1,8); ранг поперечного тектонического нарушения (1,3); наличие дизъюнктивного узла (1,2); амплитуда новейших тектони-

ческих движений (0,7); геотектоническая неоднородность (0,5).

Такой характер взаимоотношений геологических критериев сейсмичности с магнитудой землетрясений показывает, что главенствующее положение занимают те из них, которые связаны с сейсотектоническим потенциалом данного конкретного места (характер перестройки режима движений, размах их амплитуды) и возможностью реализации землетрясений, соответствующих этому потенциалу (протяженность продольного и ранг поперечного разрывного нарушения, градиент изостатической аномалии и наличие дизъюнктивного узла).

Анализ рис. 14, казалось бы, несколько противоречит выявленным ранее закономерностям о хорошей связи областей высокой сейсмичности с поперечными тектоническими нарушениями и дизъюнктивными узлами. Однако это противоречие носит формальный характер, поскольку наличие дизъюнктивного узла тесно коррелировано пространственно с присутствием продольного и поперечного тектонических нарушений. Если учесть это обстоятельство, то связь дизъюнктивного узла с магнитудой землетрясения окажется наибольшей по сравнению со всеми остальными параметрами геологического описания (в максимальном выражении 5,3 условных единицы, из которых 2,8 за счет продольного нарушения, 1,2 за счет поперечного и 1,2 за счет наличия узла).

Выше мы уже отмечали, что в результате решения ожидалось выявление тесной связи магнитуды землетрясений с проявлениями новейшего вулканизма. Так оно и оказалось. Это — формальное следствие характера распределения экспериментального материала, накопленного для решения задачи: в пределах Малого Кавказа с высокой степенью проявления на площади молодого вулканизма не было оснований для выделения большого количества ячеек второй и третьей категории. Вместе с тем этот параметр является косвенным отражением принадлежности Малого Кавказа к внутренней зоне области альпийской складчатости, и в этом качестве его введение в рассмотрение имеет уже не формальное значение.

Представляется интересной слабая связь с магнитудой землетрясений такого геологического параметра, как средняя амплитуда новейших тектонических движений. Эта закономерность давно уже отмечалась многими исследователями, которые пытались найти более конкретные характеристики, связывающие сейсмичность с проявлением новейших движений. Мы говорили выше о некоторых их производных (градиентах скорости новейших тектонических движений), нами при решении задачи использовался такой параметр, как степень контрастности их проявления (размах амплитуды). Возможны, вероятно, и поиски каких-то иных, поскольку в полу-

ченном решении связь магнитуды землетрясений с последним параметром все-таки остается небольшой.

Интересны и некоторые другие закономерности, вытекающие из рассмотрения результатов решения. Рис. 13 показывает, что степень связи тех или иных параметров с магнитудой землетрясений сильно колеблется от степени их проявления (градация). Если говорить о перестройке тектонического режима, то в зависимости от принадлежности к двум соседним градациям вклад в прогнозную магнитуду может колебаться на 1,7 условной единицы. Вместе с тем в некоторых случаях вклады соседних градаций одного и того же признака в магнитуду оказываются примерно одинаковыми. Так, в случае дизъюнктивных узлов первой и второй категории они составляют 1,2 условной единицы, а в случае с продольными разрывами протяженностью более 100 км и от 20 до 100 км — 2,8 и 2,7 условных единицы соответственно.

Это означает, что некоторые геологические критерии сейсмичности, выраженные в качественной форме, мы разбиваем по степени их проявления не самым удачным способом. Это достаточно очевидно в случае с продольными разломами, так как максимальные размеры очагов землетрясений Кавказа (с $M=6^{3/4}$) вполне могут размещаться в зонах разрывных нарушений второй градации — от 20 до 100 км. Введение более «сильной» градации оказалось в данном случае излишним.

Точно так же оказалась излишней разбивка дизъюнктивных узлов на две категории, поскольку решающим аргументом для определения вклада этого параметра в величину магнитуды является существование узла, а не его тип. Заметим, что и этот результат решения возможно было предвидеть на основании анализа традиционных методов прогнозирования сейсмической опасности. Ранее, в разделе 1 гл. III было показано, что при выделении на Кавказе зон возникновения землетрясений с разной магнитудой мы вынуждены были объединить дизъюнктивные узлы двух первых категорий в одну зону, поскольку в обоих типах ранее возникали землетрясения с $M \geq 6^{1/2}$. Точно так же в пределах Балканского региона землетрясения с одной и той же магнитудой возникали в различных типах дизъюнктивных узлов на территориях некоторых из выделенных мегаблоков (см. раздел 2 гл. III).

В методическом плане это положение с градациями геологических признаков было рассмотрено позднее Н. И. Николаевым и П. Н. Николаевым, которые, в частности, отмечали: «Точность результатов в значительной мере будет определяться выбранным интервалом градаций критериев. При слишком мелком интервале точность прогноза будет занижена. При слишком большом интервале наряду со снижением практической ценности прогноза (огрубление, обобщение выделяемых зон) будет наблюдаться значительная потеря информации»

([84], с. 163). П. Н. Николаев [91] показал, что нужно стремиться к выбору градаций, охватывающих 10—15% площади региона при относительно равномерном распределении площади среди различных значений критериев.

Следовательно, возникают возможности улучшения полученного решения как за счет поисков новых геологических критериев сейсмичности, так и за счет исключения некоторых излишних градаций и введения ряда дополнительных, характеризующих в более узком диапазоне степень проявления тех геологических признаков, которые могут быть выражены только в качественной форме.

5. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗОН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С РАЗЛИЧНОЙ МАГНИТУДОЙ НА ОСНОВЕ ФОРМАЛЬНОГО МЕТОДА В ПРЕДЕЛАХ ЭТАЛОННОГО РЕГИОНА (КАВКАЗ)

Для целей картирования площадей с различным уровнем сейсмической опасности (максимальной магнитудой ожидаемых землетрясений) необходимо теперь по всей территории составить формализованное геологическое описание всех элементарных ячеек территории. Это описание должно иметь тот же вид, что и учебная выборка (см. табл. 6). Затем по двойным шкалам определяется вклад каждой градации данного геологического критерия сейсмичности в магнитуду. Величины вкладов, соответствующие геологическому описанию данной ячейки, суммируются и корректируются по шкале функции z (см. рис. 14) в прогнозное значение M_{\max} ожидаемых землетрясений для этой ячейки. Далее те же операции повторяются для каждой ячейки региона.

В начале этой стадии работ оказалось целесообразным составить десять (по числу использованных геологических признаков) формализованных карт, показывающих распределение различных геологических характеристик на территории Кавказа. Каждая составляется простым стандартным способом: на бланковую карту наносят сначала центры ячеек, затем возле каждого такого центра записывается наибольшее значение данной геологической характеристики, попадающее в пределы ячейки, или среднее значение — в зависимости от вида признака, — точно так же, как это делалось при составлении сейсмотектонического каталога и геологического описания экспериментального материала, — но только не для отдельных точек, а для всей рассматриваемой территории (см. разделы 1 и 3 гл. IV). Затем проводится контур, разделяющий ячейки с разными градациями признака. Таким образом, условные знаки формализованных карт находятся в соответствии с принятыми градациями формализованного геологического описания. Для простоты изображения ячейки на формализованных картах показаны не в виде

кругов (частично пересекающихся), а в виде трапеций $10' \times 15'$, вписанных в эти круги (две таких карты представлены на рис. 15 и 16).

На формализованных картах площадь распространения высоких градаций геологических признаков оказывается несколько больше, чем на исходных тектонических и других подобных картах. Это понятно — наивысшая градация, согласно принятой методике, распространяется на всю площадь ячейки. Указанная особенность методики находится в полном соответствии с реальной точностью определения координат эпицентра землетрясений, положения глубинных разломов и т. п.

После подготовки формализованных карт составляется «анкета» — сплошное формализованное геологическое описание всех ячеек территории. «Анкета» заполняется «сверху вниз», т. е. с каждой формализованной карты последовательно переносятся в анкету все показанные на ней значения, затем берут следующую карту и так далее. В принципе можно обойтись без формализованных карт и сразу переносить нужные значения с исходных геологических и геофизических карт в описание. Однако этот способ гораздо труднее, он создает опасность многочисленных технических ошибок, которые затем трудно обнаружить. Составление формализованных карт практически исключает возможность таких ошибок и позволяет быстро перерабатывать большие массивы исходных данных.

Формализованная анкета геологического описания имеет тот же вид, что и учебная выборка, представленная в табл. 6. Последняя графа анкеты — значение прогноза f — заполняется по мере вычисления значений этой функции по найденным функциям Φ_i и z .

После составления формализованных карт по признакам и заполнения анкеты были рассчитаны (с помощью номограмм, показанных на рис. 14) значения прогнозирующей функции f для всех ячеек территории Кавказа. Распределение вычисленных значений показано на рис. 17. Согласно условию экспериментальной задачи значение функции f определяется с точностью $\pm 1/2$ единицы магнитуды. Поэтому проведенные на рис. 17 границы различных категорий значений f , соответствующих категориям экспертных оценок M_{\max} для ячеек экспериментального материала, носят условный характер. Действительно, значение f , близкое к граничному, допускает отнесение данной ячейки к любой из двух разделенных границей категорий, однако ячейки экспериментального материала размещаются строго в пределах «своих» зон, так как по условию задачи прогнозные значения максимальной магнитуды для этих ячеек должны совпадать с экспертной оценкой ($6\frac{1}{2} \pm 1/2$; $5\frac{1}{4} \pm 1/2$; $4 \pm 1/2$).

Не упуская из виду отмеченную выше условность в проведении границ между зонами различных категорий f , рассмотрим

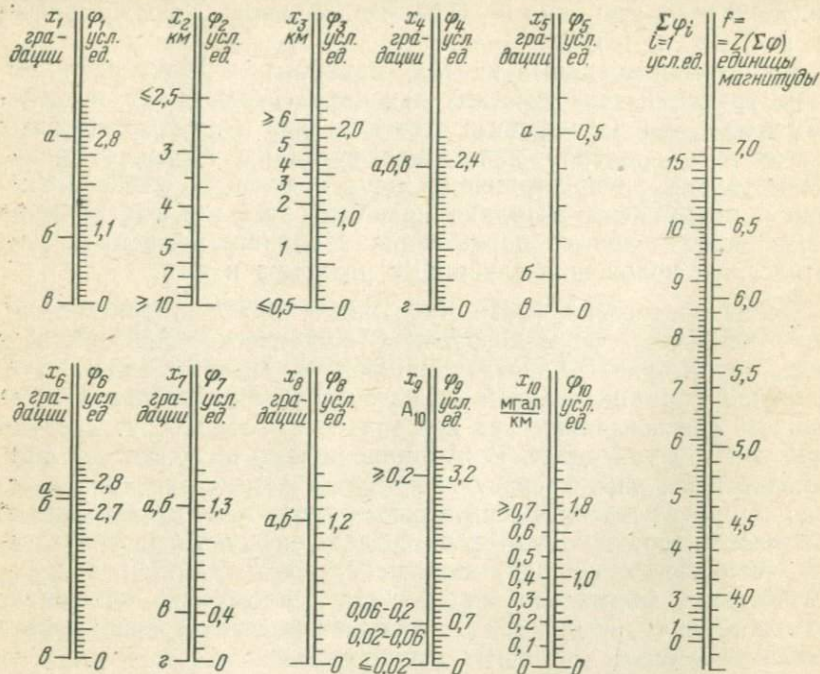


Рис. 14. Номограммы (двойные шкалы), полученные в результате решения экспериментальной задачи [21].

Номера номограмм (x_1, x_2, \dots, x_{10}) соответствуют номерам граф в табл. 6 и пояснению к табл. 6 в тексте в главе IV; буквенные обозначения в левой части номограмм (а, б, в, г) даны в пояснении к табл. 6; номограмма для функции f соответствует графику z на рис. 13

в общих чертах полученное распределение прогнозируемых значений максимально возможной магнитуды землетрясений.

Из 1050 ячеек, составляющих территорию Кавказа, к первой категории отнесено 333 ячейки, ко второй — 276, к третьей — 441.

Зона первой категории ($f=5,9-6,9$) имеет прерывистое распространение. В пределах Предкавказья она охватывает район Минеральных Вод (Ессентуки — Пятигорск) и несколько севернее — район с. Нагутское. В западной части Большого Кавказа к первой категории относятся следующие районы: участок Черноморского побережья между Анапой и Джубгой, Краснодарский район с прилежащим участком побережья (Сочи — Адлер), узкая полоса северного склона от долин рек Большой и Малый Зеленчук до Военно-Грузинской дороги, сравнительно небольшой участок южного склона между долиной р. Кодори и меридианом г. Кутаиси и осевая часть Большого Кавказа в виде треугольника с вершиной на меридиане р. Большой Лабы и основанием несколько восточнее Военно-Сухумской дороги.

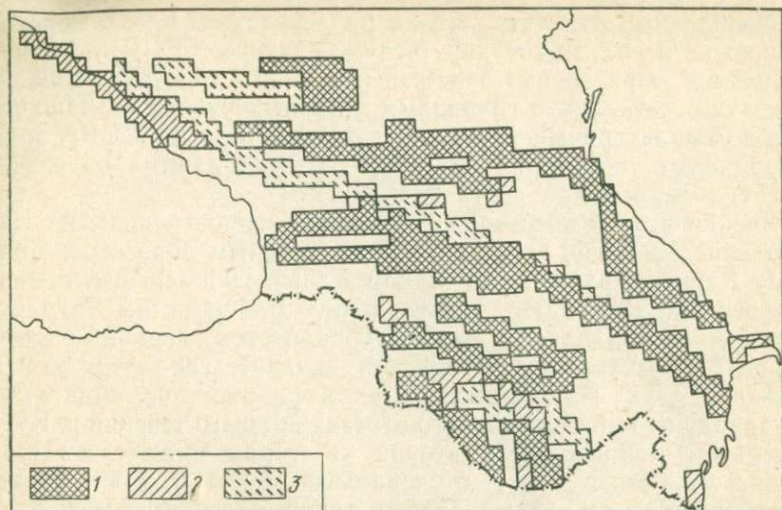


Рис. 15. Формализованная карта продольных разломов Кавказа (по рис. 2) [21].

1 — активные в новейшее время глубинные разломы и зоны контрастного сочленения протяженностью более 100 км; 2 — то же, протяженностью от 20 до 100 км; 3 — продольные глубинные разломы, активность которых в новейшее время не установлена

На Большом Кавказе зона первой категории выделяется в виде полосы, имеющей наибольшую ширину на участке сочленения южного склона Большого Кавказа с Алазано-Агрчайской депрессией, а также на меридиональном участке к западу от Военно-Грузинской дороги. Полоса прерывается на северном склоне Большого Кавказа в районе долины р. Сулак. К первой категории относится северная часть Апшеронского полуострова и небольшая территория, вытянутая в северо-восточном направлении, в верховьях р. Андийское Койсу.

В Закавказском межгорном прогибе зона первой категории представляет собой отдельные участки в предгорьях, обрамляющих Колхидскую низменность (район Миха — Цхакая — Кутаиси), а также занимает центральную часть территории межгорного прогиба между городами Хашури и Телави.

На Малом Кавказе ячейки первой категории доминируют. Они образуют полосу его северного ограничения в западной части (между городами Махарадзе и Хашури), группируются в северо-восточной части (между городами Болниси и Агдам), в двух широких полосах меридионального простираия (от г. Гори на севере до г. Еревана на юге и от г. Нафталан на севере до г. Кафан на юге), образуют отдельные сгущения в районе оз. Севан, г. Нахичевань и в некоторых других местах.

На юге Азербайджана ячейки первой категории сливаются в полосу меридионального простираия.

Необходимо отметить, что на ряде участков вдоль морского побережья и вблизи государственной границы СССР найденные значения f определенно занижены, так как для точной оценки не хватает сведений о глубинных активных разломах (проходящих под акваториями морей или за территорией СССР), а для пограничных территорий нет также точных данных об изостатических аномалиях силы тяжести.

Ячейки второй категории значений f распространены на Кавказе менее широко. Они приурочены главным образом к Большому Кавказу, развиты на Малом Кавказе и в меньшей степени в прогибах. Занимают значительные площади на Западном Кавказе, в Колхиде, в Аджаро-Триалетской горной системе и почти отсутствуют в Куринской впадине, где представлены только в двух поперечных зонах в районе пос. Мингечаур и к западу от меридионального отрезка нижнего течения р. Куры. Отдельные районы ячеек второй категории имеются и в Предкавказье: к северу от г. Минеральные Воды и к юго-западу от района Майкоп — Краснодар, а также на участке между долиной р. Терек и г. Грозный.

Ячейки третьей категории сейсмической опасности доминируют в зонах интенсивного опускания — в Предкавказье и в Куринской части межгорного прогиба. Относительно небольшие по площади районы этой категории отмечаются в Дагестане (в районе верхнего течения рек Чирахчай и Уллучай, в нижних частях долин Каракойсу, Аварского и Андийского Койсу), а также в бассейне р. Иори, в районе г. Тбилиси, а также в нескольких других местах.

Что касается способа составления карты прогноза M_{\max} в изолиниях, то, как неоднократно отмечалось, точность такого прогноза невелика: в то же время на рис. 17 детальность проведения изолиний f много выше, чем на составленных обычно картах сейсмического районирования. Однако это вполне оправдано. Ввиду использования только монотонных функций $\Phi_i x_i$, разность величин f имеет всегда ясный физический смысл: проведение изолиний функции f через любой, даже малый интервал помогает сравнивать смежные районы по интенсивности тектонического режима и относительной сейсмической опасности.

Отнесение той или иной ячейки к зоне определенной категории произведено на основе анализа всей совокупности имеющихся данных. Кажущаяся «нелогичность» (с точки зрения специалистов, не привыкших к такому подходу) проведения отдельных контуров, когда, например, части единой зоны глубинного разлома оказываются в разных категориях значений f , связана именно с привлечением большого количества слагаемых параметров. Примерами могут служить прерывистая меридиональная полоса первой категории на юге Азербайджанской ССР или широтная зона в Северном Дагестане. Эта особенность

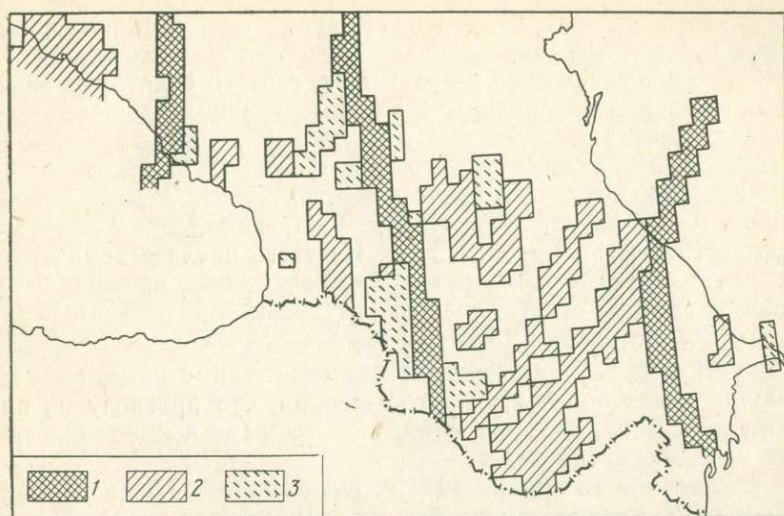


Рис. 16. Формализованная карта активных в новейшее время поперечных разломов Кавказа (по рис. 2) [21].
 1 — разломы первого порядка; 2 — разломы второго порядка; 3 — разломы третьего порядка, в том числе связанные с вулканизмом

контуров различных значений f представляется чрезвычайно важной: она отражает возможность дифференциации структурных элементов разных порядков по степени сейсмической опасности.

На эту специфику зон возникновения землетрясений указывали Н. И. Николаев и П. Н. Николаев [84, 88], считавшие, что различный характер сейсмичности в пределах единой структурной единицы не является случайным, а определен всем ходом тектонического развития территории. Поэтому необходимо прогнозирование участков с разным уровнем сейсмической опасности в единых сейсмогенерирующих зонах.

Важность такой дифференциации подчеркивал И. Е. Губин, писавший об одной из главных проблем по развитию сейсмического районирования: «расчленение протяженных сейсмогенных зон на звенья, разделенные друг от друга изгибами зоны, поперечными разломами, кулисообразной стыковкой разрывов и другими тектоническими особенностями, могущими послужить ограничениями крупных очагов, вероятных в звеньях зоны» ([55], с.24).

Существует только один прямой путь проверки описанного формального метода — регистрация местоположения очагов и магнитуды землетрясений, которые произойдут после составления прогнозной карты распределения магнитуд эталонного региона — Кавказа, изображенной на рис.17.

С момента первой публикации этой карты* [21] прошло несколько лет. За этот период на Кавказе произошло много небольших землетрясений и только одно со значительной магнитудой — Черногорское 28 июля 1976 г. с $M=6,4$, которые могли проконтролировать прогноз, сделанный с использованием формального метода.

Некоторые результаты этого контроля показаны в табл.8. Из нее видно, что общее число землетрясений с $M \geq 4,5$, происшедших на территории Кавказа за 6 лет, составляет 17 (период с марта 1972 г. по март 1978 г.). Из этого числа 8 землетрясений в точности соответствуют прогнозу — они произошли на площади ячеек соответствующей категории. Среди них и Черногорское землетрясение 1976 г. с $M=6,4$ (№ 65).

Другую группу образуют 7 землетрясений, возникших на площади ячеек более высокой категории, что прогнозу не противоречит. Лишь два землетрясения формально не соответствуют сделанному прогнозу.

Киятинское 13 ноября 1974 г. (№ 59) с $M=4,7$ на площади ячейки с прогнозной оценкой $M=4,4$. Учитывая точность определения магнитуды землетрясений, можно сказать, что ошибка лежит в пределах этой точности.

Другое землетрясение — 20 октября 1975 г. с $M=5,0$ (№ 59) произошло в районе, где прогноз составлял 4,2. Координаты эпицентра по инструментальным данным — $41,7^\circ$ с.ш., $48,5^\circ$ в.д., географически эпицентр располагается на границе Дагестанской АССР и Азербайджанской ССР на прибрежной равнине Каспия в районе выхода из гор долины р. Самур. Следует отметить, что наибольшие макросейсмические эффекты при этом землетрясении отмечались в пос. Магарамкент, в 15—20 км западнее от местоположения инструментально определенного эпицентра. Указанное землетрясение произошло в довольно густо населенном районе, вследствие чего макросейсмические сведения о положении эпицентра следует считать более надежными; точность определения его координат в этой части Кавказа при существующем расположении сейсмических станций вряд ли лучше класса А (± 25 км). Если это так, то землетрясение должно быть отнесено ко второй из отмеченных выше групп, поскольку прогноз для соседней с запада ячейки составляет уже $M=5,1$.

Другой способ прямой проверки полученного решения дает новый каталог [93], в котором на современном уровне знаний собраны сведения обо всех известных землетрясениях. Для Кавказа они начинаются с 550 г. до н.э., для региона Нижняя Кубань — с 63 г. до н.э. Эти данные не были нами использованы при составлении прогнозной карты распределения магнитуд

* Карты были составлены в 1973 г., а сейсмологические данные, использованные при их составлении, ограничены мартом 1972 г.

Проверка решения экспериментальной задачи по данным нового каталога [93] и сведениям о землетрясениях, происшедших после составления карты рис. 17

№ п/п	Год, название землетрясения	М по новому каталогу [93]	М по рис. 17	№ п/п	Год, название землетрясения	М по новому каталогу [93]	М по рис. 17
1	150 до н. э.	5,0	6,1	39	1912 г., Терское II	5,7	4,9
2	63 до н. э., Пантикапейское	6,4	3,7	40	1912 г., Цхрацкаройское	5,6	6,8
3	139 г.	5,7	5,5	41	1913 г.	5,6	5,9
4	400 г.	5,5	4,9	42	1916 г.	5,3	5,7
5	427 г.	6,7	6,6	43	1924 г.	5,2	6,2
6	650 г., Дагестанское	6,1	6,4	44	1930 г.	5,2	5,6
7	918 г., р-н Дербента	6,1	6,6	45	1931 г.	5,0	6,6
8	972 г.	5,0	6,6	46	1933 г.	5,0	5,2
9	1046 г.	5,5	5,6	47	1934 г., Сабирабдское	5,7	3,9
10	1235 г.	5,7	6,7	48	1935 г., Дигорское	6,2	6,0
11	1250 г.	5,7	5,4	49	1935 г., Ахурянское	5,0	6,8
12	1261 г.	5,3	6,6	50	1947 г., Гудамарское	5,5	5,7
13	1275 г., Мухетское	6,7	6,7	51	1950 г., Гудермесское II	5,0	5,6
14	1350 г.	5,9	5,7	52	1953 г., Куткашенское	5,0	6,2
15	1530 г., Алавердское	5,7	6,7	53	1956 г., Шемахинское VIII	5,3	6,2
16	1622 г.	5,1	5,4	54	1959 г., Аджаро-Гурийское	5,1	5,0
17	1652 г.	5,8	5,6	55	1970 г., Сочинский рой	5,1	5,5
18	1688 г., Терское I	5,3	4,9	56	1972 г., 3/II	4,9	6,2
19	1742 г.	5,2	5,1	57	1972 г., Чиркейское	4,5	5,0
20	1764 г.	5,1	5,2	58	1974 г., 4/VIII, Бежтинское	5,1	6,3
21	1785 г.	5,5	6,0	59	1974 г., 13/XI, Киятинское	4,7	4,4
22	1799 г.	5,1	4,7	60	1974 г., 23/XII, Салатауское	5,0	5,0
23	1841 г.	5,7	4,9	61	1975 г., 9/I	5,2	6,5
24	1844 г., Хунзахское	5,3	4,7	62	1975 г., 20/II	4,9	5,7
25	1844 г., Пятигорское	5,0	5,0	63	1975 г., 20/X	5,0	5,1
26	1867 г., Зурнабадское	5,8	5,4	64	1975 г., 16/XII	4,8	4,7
27	1868 г.	6,3	6,6	65	1976 г., 28/VII, Черногорское	6,4	6,6
28	1878 г., Уллу-Гатальское	5,7	6,6	66	1977 г., 14/VI	4,8	6,6
29	1881 г.	5,1	4,8	67	1977 г., 18/VI	4,7	6,6
30	1886 г., Шедрияское	5,8	5,5	68	1977 г., 15/XII	4,9	4,6
31	1896 г.	5,2	6,4	69	1977 г., 21/XII	4,5	5,9
32	1902 г., 16/II	5,2	4,3	70	1978 г., 17/I	4,7	6,9
33	1902 г., 18/VI	5,2	6,0	71	1978 г., 28/II	4,9	5,0
34	1903 г., Нухинское	5,0	6,5	72	1978 г., 26/V	5,8	5,8
35	1904 г.	5,1	5,6	73	1978 г., 9/VI	4,8	6,5
36	1905 г., Тебердинское	6,4	6,1				
37	1906 г., 25/IX	5,0	6,4				
38	1906 г., 20/X	5,2	6,7				

ожидаемых землетрясений. Поэтому их сопоставление с рис.17 позволит выяснить, насколько точен этот прогноз. Результаты такого сопоставления отражены в табл.8 (№ 1—56) и на рис.18.

Все землетрясения, которые не учитывались при составлении рис. 17, можно условно разделить на несколько групп. В первую входят не соответствующие сделанному прогнозу: Пантикапейское 63 г. до н.э. (см. табл.8, № 2) с $M=6,4$ при прогнозе 3,7; 1902 г. (№ 32) с $M=5,2$ при прогнозе 4,3 и Сабирабадское 1934 г. (№ 47) с $M=5,7$ при прогнозе 3,9. Все эти землетрясения произошли в сходной геологической ситуации — в зонах длительно и устойчиво развивавшихся Индоло-Кубанского и Куринского прогибов, с огромной мощностью отложений неоген-четвертичного возраста, превышающей несколько тысяч метров. По всей вероятности, причины неправильного прогноза, если считать, что сведения об указанных землетрясениях безупречны*, могут быть следующие: 1) недостаточно полный учет при решении экспериментальной задачи сеймотектонических условий областей глубокого прогибания. Мы использовали материалы по Кавказу в целом, преимущественно по областям поднятия и смежных с ними участкам областей прогибания («шарнирным зонам»). Искать закономерности распределения землетрясений для каждой структурной зоны Кавказа в отдельности невозможно из-за недостаточности сейсмостатистических данных; 2) недостаточность сведений о разломной тектонике на закрытых территориях с большой мощностью молодых отложений.

В любом случае следует иметь в виду эту погрешность решения экспериментальной задачи по отношению к зонам глубоких прогибов. Поэтому на карте рис.18 эти три случая классифицированы как ошибка типа «пропуск цели».

Следующую группу образуют шесть землетрясений — 1250 г. (№ 11), Терское 1 1688 г. (№ 18), 1764 г. (№ 20), 1799 г. (№ 22), 1868 г. (№ 27), 1913 г. (№ 41). Их можно считать не соответствующими прогнозу, если полагать, что приведенные в новом каталоге [93] координаты их эпицентров абсолютно (с точностью до 1') правильны. Это, конечно, не так. Составители каталога указывают точность определения координат эпицентров этих землетрясений: № 11, 18, 20, 22 — $\pm 1^\circ$; № 27, 41 — $\pm 0,5^\circ$. Поэтому с большой долей вероятности можно предполагать, что эти землетрясения произошли на территории не той ячейки, для которой указаны координаты эпицентра в новом каталоге [93], а в соседней по широте или долготе. В этом случае несоответствие прогнозу достаточно формально. Поэтому на

* Имеется в виду точность определения координат и глубина очага. Напомним, что при решении экспериментальной задачи по Кавказу [21] неправильный прогноз был дан для Кубанского землетрясения 1926 г. с $M=5,0$ при прогнозе 4,0. По новому каталогу [93] это землетрясение оказалось глубоким, в связи с чем исключено из рассмотрения.

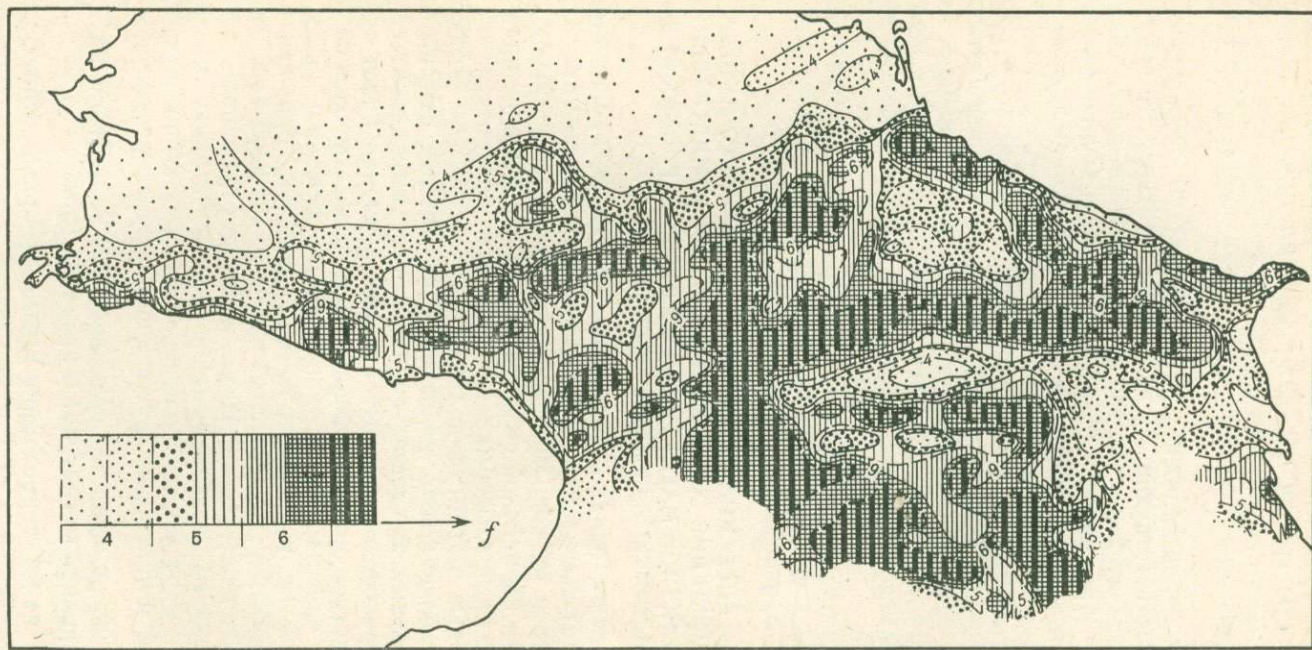


Рис. 17. Карта вычислительных значений максимально возможной магнитуды землетрясений Кавказа в изолиниях [21]

рис.18 эти шесть случаев классифицированы не как землетрясения первой группы.

Следующую группу образуют 19 землетрясений, возникшие в пределах ячеек, где прогнозировалась более высокая магнитуда. Как мы уже отмечали, эти случаи прогнозу не противоречат.

Наконец, в последнюю группу входят 28 землетрясений, в точности соответствующих сделанному прогнозу. В шести случаях это относится к землетрясениям с $5,9 < M \leq 6,7$, в 22 случаях — к землетрясениям с $M \leq 5,8$. К этой же группе фактически относятся все шесть землетрясений предыдущей группы.

Если учесть все сделанные замечания, то из 73 (100 %) землетрясений табл.8 и рис.18 имеется только 3 (4 %) случая «пропуска цели». Остальные 70 событий распределяются так: 26 (36 %) землетрясений имеют магнитуду меньшую, чем на рис.17, что не влияет на качество прогноза; в 44 (60 %) случаях прогноз оказался точным, в том числе для семи землетрясений с $M \geq 5,9$.

Нам представляется, что на основании проведенной проверки решение экспериментальной задачи по отношению к Кавказу следует признать достаточно хорошим.

6. КОСВЕННАЯ ПРОВЕРКА ФОРМАЛЬНОГО МЕТОДА (ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С РАЗЛИЧНОЙ МАГНИТУДОЙ В ДРУГИХ РЕГИОНАХ ОБЛАСТИ АЛЬПИЙСКОЙ СКЛАДЧАТОСТИ)

Существуют, однако, косвенные методы контроля, заключающиеся в эксплуатации решения экспериментальной задачи, полученного в эталонном Кавказском регионе, в других регионах области альпийской складчатости. Если решение правильно, то рассчитанные по формальной методике прогнозные значения максимальных магнитуд должны соответствовать наблюдаемому распределению очагов зарегистрированных землетрясений. Иными словами, при таком анализе будет имитироваться прогноз уже происшедших событий и одновременно будет осуществляться прогноз потенциальной сейсмической опасности на будущее. В качестве таких контрольных регионов нами были выбраны Крым, Карпаты и Альпы, поскольку они, как и Кавказ, принадлежат по большей части к внешней зоне области альпийской складчатости. Ниже мы рассмотрим последовательно для каждого из указанных регионов методику построения прогнозных карт зон возникновения землетрясений с различной магнитудой и проанализируем получившиеся результаты.

Прогнозирование зон возникновения землетрясений с различной магнитудой в пределах Крыма

Южная часть территории Крыма (Горный Крым), входящая в альпийскую складчатую область, в структурном отноше-

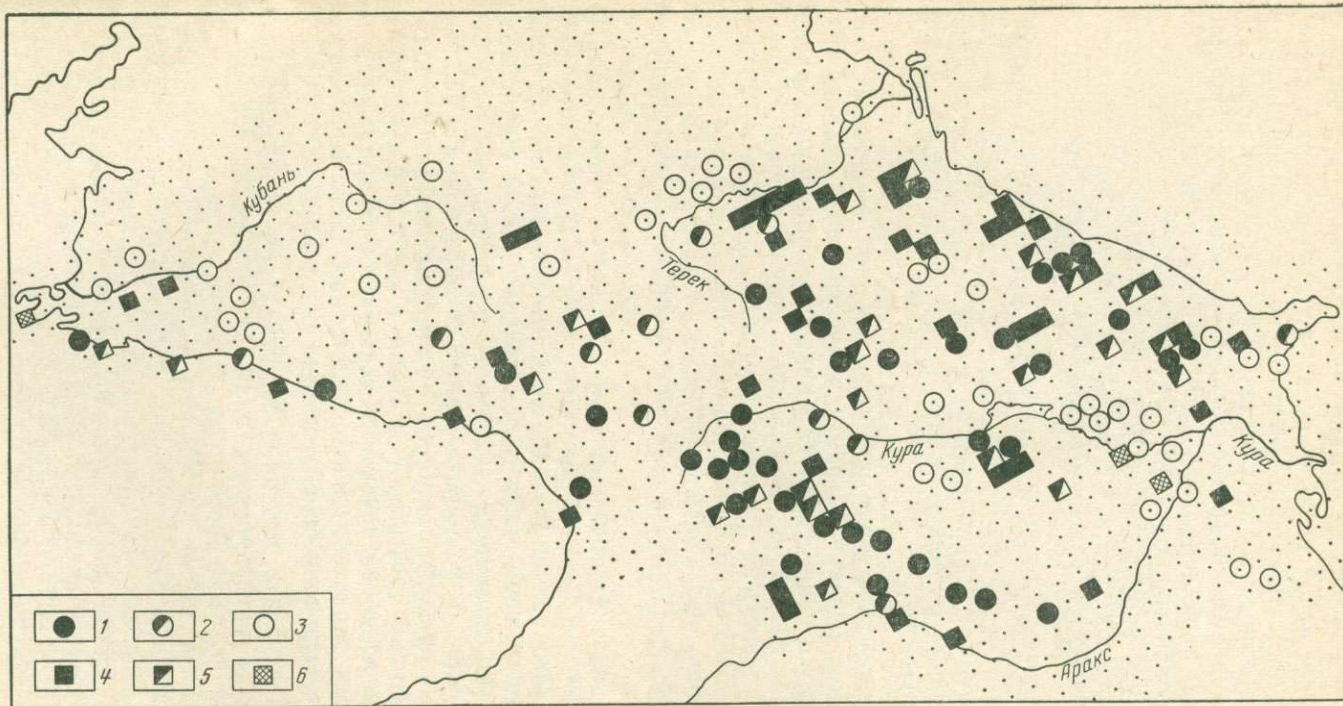


Рис. 18. Проверка решения экспериментальной задачи.

Категории ячеек, использованных при решении экспериментальной задачи (по рис. 12):

1 — первая, 2 — вторая, 3 — третья; 4 — ячейки, на площади которых произошли землетрясения, соответствующие прогнозу; 5 — то же, с магнитудой меньше прогнозной; 6 — то же, с магнитудой больше прогнозной

нии является северным крылом мегантиклинория, а в рельефе представляет собой горный хребет, вытянутый параллельно береговой линии. В течение альпийского цикла происходил процесс постепенного роста и расширения мегантиклинория. Ядро мегантиклинория — поднятие, возникшее в мезозое. На северо-востоке (в периклинальной зоне) к нему примыкают участки новообразованных поднятий, причленившиеся к ранее сформировавшемуся ядру в начале и во второй половине кайнозоя. В северо-восточной части мегантиклинорий Горного Крыма обрамлен западным участком Азово-Кубанского передового прогиба.

Центральная и северная части Крыма (Степной Крым) на альпийском этапе характеризовались платформенным режимом развития. В их пределах на карте историко-тектонического районирования выделяются участки поднятий и опусканий различного возраста.

На альпийском этапе развития большое значение имели зоны разломов различного ранга и простирания. Главнейшие из них относятся к категории глубинных: продольные разломы ограничивают на всем протяжении мегантиклинорий Горного Крыма, поперечные разломы первого порядка — Крымскую часть альпийской геосинклинали. Не все зоны разломов достаточно хорошо выражены в структуре Крыма, однако в настоящее время они надежно устанавливаются по геофизическим данным.

Новейший тектонический этап начался на территории Крыма в позднем миоцене. В целом тектонические движения неоген-четвертичного времени развивались унаследованно по отношению к более ранним этапам альпийского цикла. Наибольшими амплитудами новейших движений характеризуется площадь, примыкающая в настоящее время к акваториям Черного и Азовского морей. В частности амплитуды новейших поднятий Горного Крыма превышают местами 1 км, а в пределах Азовского моря величина опускания достигает 2 км. Более слабыми движениями характеризовалась восточная часть Крыма в районе Керченского полуострова.

Важно отметить, что на новейшем этапе произошла резкая перестройка тектонического плана в пределах современной шельфовой части Черного моря. Она выразилась в обрушении южного крыла мегантиклинория и интенсивном развитии на этом месте процессов опускания. Платформенная часть Крыма характеризовалась незначительными по амплитуде (от 0,00 до -0,25 км), слабо дифференцированными в плане движениями с преобладанием опусканий. Разломы различного ранга и простирания продолжали играть большую роль в процессе формирования структуры. Многие из них развивались унаследованно, однако некоторые являются новообразованными.

В характере проявления современных движений сохраняется в целом та же направленность развития, которая существовала в альпийском цикле и, в частности, на новейшем этапе. Наибольшими скоростями движений характеризуется Горный Крым (до 4 мм/год), меньшими — область Керченского полуострова и Степного Крыма (0 ± 2 мм/год).

Исходный геологический материал [75] позволил подготовить часть формализованных карт для Крыма по тем геологическим признакам, которые были привлечены при решении экспериментальной задачи по Кавказу. Формализованные карты сейсмической активности и горизонтального градиента изостатической аномалии силы тяжести составлены по материалам работ М. Е. Артемьева и др. [24]. Карта новейшего вулканизма по Крыму не составлялась. На формализованных картах значения каждого геологического признака отнесены, как и ранее, к трапециям градусной сетки со сторонами $10' \times 15'$.

Вся территория Крыма была разбита на 93 ячейки. С помощью номограмм (см. рис. 14) для каждой ячейки были вычислены прогнозные значения M_{\max} , показанные на рис. 19.

Согласно результатам проведенной работы наиболее сильные землетрясения могут возникать на Южном берегу Крыма (6 ячеек), в районе Евпатории (1 ячейка) и в западной части Степного Крыма (2 ячейки). Землетрясения средней магнитуды возможны на северных склонах Яйлы и в западной части Степного Крыма (всего 37 ячеек). На остальной площади возможны только слабые землетрясения.

Карта прогноза M_{\max} для Крыма вполне соответствует материалу о происходивших ранее землетрясениях. Несколько необычно указание на возможность землетрясений с высокой магнитудой в западной части Степного Крыма и на западном побережье, хотя и раньше эти районы считались более опасными в сейсмическом отношении, чем смежные с востока [75]. Ожидание высокой сейсмической опасности обусловлено в этой зоне широким развитием глубинных разрывов, обнаруженных в фундаменте (главным образом геофизическими методами).

Прогнозирование зон возникновения землетрясений с различной магнитудой в пределах Карпатского региона

Районирование территории Крыма по максимальной магнитуде ожидаемых землетрясений показало, что формальная методика, разработанная на примере Кавказа, может с успехом применяться и для других регионов области альпийской складчатости. Следующим объектом нашего исследования стал Карпатский регион, включающий территории Чехословакии, Венгрии, Польши, Румынии, Болгарии и сопредельных частей Югославии и СССР.

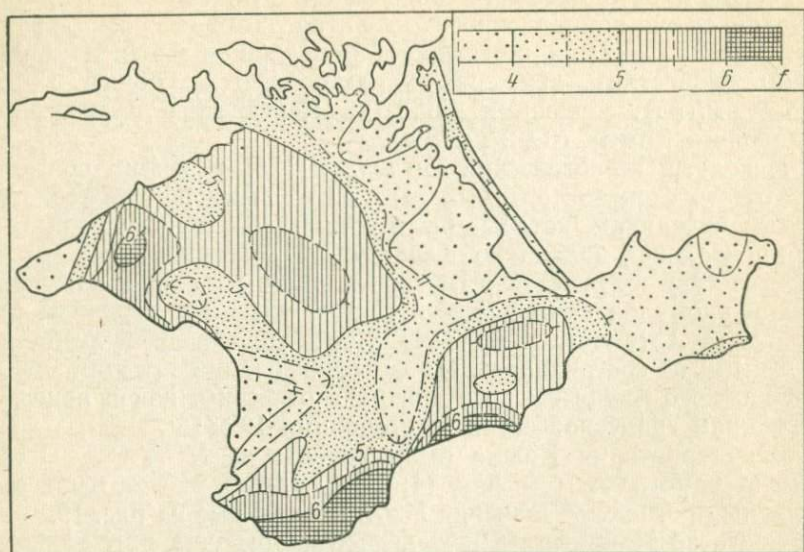


Рис. 19. Карта вычисленных значений максимально возможной магнитуды землетрясений Крыма в изолиниях [21]

Исходные геологические данные, собранные по Карпатскому региону на первой стадии сеймотектонических исследований, достаточно подробно описаны в ряде работ [23, 162]. Отметим здесь, что были подготовлены карты историко-тектонического районирования, новейших и современных движений. Большую помощь в сборе необходимых первичных данных оказали геологи, геофизики, сейсмологи Венгрии, Румынии, Польши и Чехословакии. Отмеченные исходные данные были дополнены материалами, полученными при подготовке Балканского сейсмического проекта ЮНЕСКО (см. раздел 2 гл. III). По территории СССР данные, представленные в работе [75], были уточнены и дополнены А. В. Друмя и И. Д. Гофштейном.

Накопление исходных данных было сопряжено с трудностями, обусловленными разной степенью изученности отдельных частей Карпатского региона. Ниже будет показано, что использование в формальной методике большого количества признаков, оказывающих влияние на прогнозные оценки M_{\max} , позволяет в значительной мере «сnivelировать» имеющиеся погрешности исходных данных.

При прогнозировании M_{\max} для Карпатского региона следовало бы сохранить без изменений все компоненты кавказского варианта решения экспериментальной задачи, однако мы не располагали столь же подробными, как для Кавказа, данными о сейсмической активности и о градиентах изостатических аномалий силы тяжести по всей территории Карпатского регио-

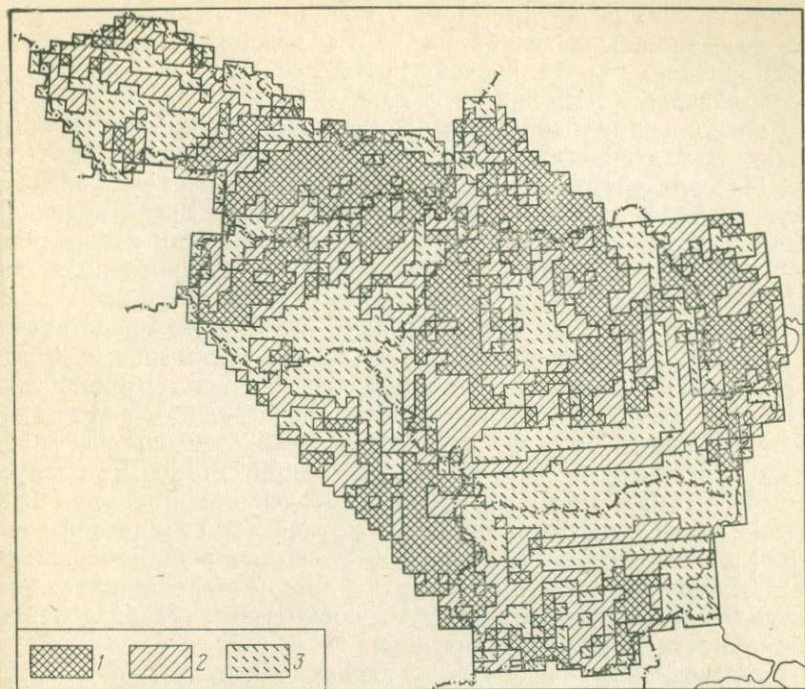


Рис. 20. Формализованная карта геотектонической неоднородности Карпатского региона. Составили Б. А. Борисов, Г. И. Рейснер.

1 — попадание в пределы ячейки трех и более условных знаков схемы историко-тектонического районирования; 2 — попадание двух знаков; 3 — вся площадь ячейки относится к одной зоне историко-тектонического районирования

на. Вместо первого признака мы привлекли данные о распределении значений выделенной энергии землетрясений [157]; величина вклада в прогнозное значение M_{\max} за счет градиента изостатической аномалии силы тяжести была принята для всей территории Карпат одинаковой. Остальные условия: площадь ячейки, к которой отнесено геологическое описание, характер геологических признаков, величины их вкладов в прогнозное значение M_{\max} , т. е. вид функций φ и z — остались без изменений.

На основе собранного материала были составлены формализованные карты по всем геологическим признакам. Две формализованные карты представлены на рис. 20 и 21. Значения каждого признака отнесены на них к трапеции градусной сетки $10' \times 15'$. Общее количество таких ячеек на территории Карпатского региона составило 2127. Легенды формализованных карт соответствуют выбранным градациям геологических признаков. Большинство формализованных карт подготовлено на основе составленных ранее карт, отражающих историю и тенденцию

геологического развития Карпат. Например, карта тектонической перестройки вытекает из карты историко-тектонического районирования, карта контрастности новейших движений — из карты новейшей тектоники и т. д.

Далее с формализованных карт снимались значения геологических характеристик и по номограммам функций φ (см. рис. 14) определялись вклады каждого геологического признака в прогнозные значения M_{\max} для данной ячейки. Затем величины вкладов суммировались и по номограмме функции z определялась искомая величина M_{\max} . Распределение вычисленных значений M_{\max} показано (в изолиниях) на рис. 22.

В первую очередь необходимо убедиться, что представленная на рис. 22 карта имеет право на существование, т. е. что она отражает реальные закономерности сеймотектонических явлений в Карпатском регионе. Нам представляется, что такая проверка может быть осуществлена двумя взаимно дополняющими друг друга способами. С одной стороны, следует выяснить, отражает ли эта карта некоторые общие связи тектонических и сейсмических явлений в альпийской складчатой зоне, которые к настоящему времени достаточно подробно обсуждены в сейсмогеологической литературе; с другой стороны, насколько составленная карта соответствует конкретному распределению сейсмичности Карпатского региона.

Сопоставление рис. 22 с любой тектонической картой Карпатского региона показывает, что распределение вычисленных значений M_{\max} носит вполне закономерный характер. Наибольшей потенциальной сейсмической опасностью характеризуется внутренняя геосинклинальная зона, занимающая южную часть рассматриваемой территории. Именно здесь зоны наибольших градаций M_{\max} ($M \geq 6,8$; $6,7 \geq M \geq 6,5$; $6,0 \geq M \geq 6,4$) занимают наибольшие площади. Меньшие показатели потенциальной сейсмической опасности свойственны внешней зоне. Здесь градации со значениями $M_{\max} \geq 6,8$ отмечаются только на отдельных участках, наибольший из которых располагается в районе Восточных Бескид (Чехословакия), а следующая градация ($6,7 \geq M \geq 6,5$) распространена прерывисто. Участки этой градации приурочены к Западным, Южным Карпатам и Средне-Венгерским горам. Еще меньший уровень потенциальной сейсмической опасности отмечается в передовых прогибах. Здесь высшие две градации ($M \geq 6,5$) представлены главным образом в зонах сочленения передового прогиба с поднятиями Восточных Карпат на территории Румынии и СССР.

Следующее место в рассматриваемом ряду занимают активизированные платформы.

Наконец, минимальной сейсмической опасностью характеризуются области межгорных впадин, испытывавшие на новейшем тектоническом этапе значительные прогибания на обширных площадях (Паннонская, Трансильванская, Валашская), а

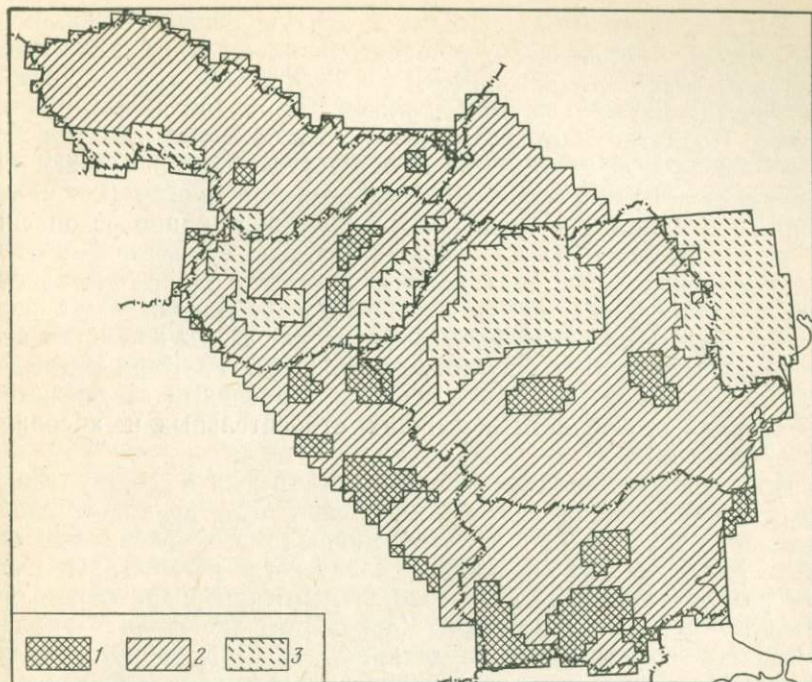


Рис. 21. Формализованная карта распределения высвобожденной энергии землетрясений ($\lg \Sigma E$) Карпатского региона [157]. Составил Б. А. Борисов.
 1 — более 17; 2 — от 15 до 17; 3 — менее 15

также обрамляющие Карпатскую дугу с северо-запада, севера и востока участки неактивизированных платформ. В их пределах величина M_{\max} не превышает, как правило, значений 4,0. Исключение представляют лишь те участки прогибов, в пределах которых движения проявлялись дифференцированно и в ряде мест фундамент был относительно приподнят или даже выведен на дневную поверхность. Такие участки располагаются, например, в центральной части Наннонской впадины в районе гор Мечек в Венгрии, в районе Тимишоары в Румынии и Нови-Сад в Югославии. В этих районах величины M_{\max} иногда превышают 6,0—6,5.

Факт закономерного сочетания прогнозных оценок M_{\max} с определенным рядом тектонических зон Карпатского региона (внутренняя и внешняя зоны геосинклинали, активизированная и неактивизированная платформа) уже может служить основанием для положительной оценки опыта составления карты рис.22. Этот факт означает, что принципиальных ошибок при разработке формальной методики и при ее применении в Карпатском регионе допущено не было.

Анализ карты подтверждает и другую общую закономерность связи тектонических и сейсмических явлений: наиболее опасными, наиболее активными в сейсмическом отношении могут явиться краевые части зон новейших поднятий различных рангов. Поднятие Карпатской дуги в целом прогнозируется как более опасное по отношению к обрамляющим и разделяющим отдельные ее части передовым, межгорным прогибам и наложенным впадинам; в пределах зон прогибов наиболее опасны их приподнятые и раздробленные участки; на активизированной платформе более опасны зоны поднятий и т.д. Этой закономерности подчинена общая картина распределения зон с различной прогнозной величиной M_{\max} на рис.22. На нем четко вырисовываются контуры дугообразного поднятия Карпат (выделенные относительно более высокими значениями M_{\max}) и обрамляющие его области новейших относительных и абсолютных опусканий.

Приведенные данные убеждают в том, что составленная карта распределения прогнозных оценок M_{\max} верно отражает основные закономерности пространственного распределения сеймотектонических явлений Карпатского региона. Сам по себе результат не является неожиданным: при разработке формального метода на примере Кавказа мы включали в анализ те геолого-геофизические характеристики, которые представлялись информативными для определения M_{\max} . Важно другое — этих же признаков оказалось достаточно и для обнаружения общих связей геологических явлений в другом, Карпатском сегменте зоны альпийской складчатости. Это обстоятельство позволяет ожидать, что использование формальной методики, разработанной на Кавказе, поможет выявить такие связи и в других сегментах зоны альпийской складчатости, во всяком случае, в пределах ее внешней зоны. Иными словами, Кавказский регион является в этом отношении эталонным.

Теперь попробуем проанализировать составленную карту более детально. В первую очередь обращает на себя внимание тот факт, что определенные структурные элементы не однородны по величине M_{\max} на всем своем протяжении: при следовании по их простиранию значения M_{\max} не остаются постоянными, а часто меняются в значительных пределах на сравнительно коротких расстояниях. Рис.22 сплошь состоит из примеров подобного рода, поэтому мы ограничимся лишь некоторыми.

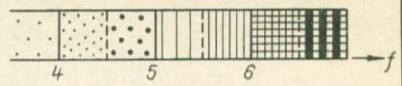
На территории Румынии в зоне сочленения Восточных Карпат с Предкарпатским прогибом высокие значения M_{\max} ($\geq 6,5$) отмечаются лишь в районе Вранча, тогда как в остальных частях они резко уменьшаются вплоть до 4,0 и менее. Хорошим примером могут служить Средне-Венгерские горы, на площади которых величина M_{\max} колеблется в широком диапазоне значений: $6,4 \geq M \geq 4,0$. Та же картина характеризует Западные и Малые Карпаты, Стару Планину и т.д.

Отмеченное явление — следствие применения формальной методики, поскольку величина M_{\max} представляет сумму вкладов разных геологических характеристик: ни одна из них не может диктовать отнесение той или иной элементарной ячейки территории к определенной градации M_{\max} . Сделанное замечание помогает понять, почему на рис.22 многие важнейшие в тектоническом отношении линейные элементы оказались охарактеризованными малыми значениями M_{\max} . В качестве примера можно привести флексуру восточного обрамления Паннонской впадины, границу альпийской складчатой зоны с обрамляющими участками платформ в пределах Румынии и Болгарии и т.д.

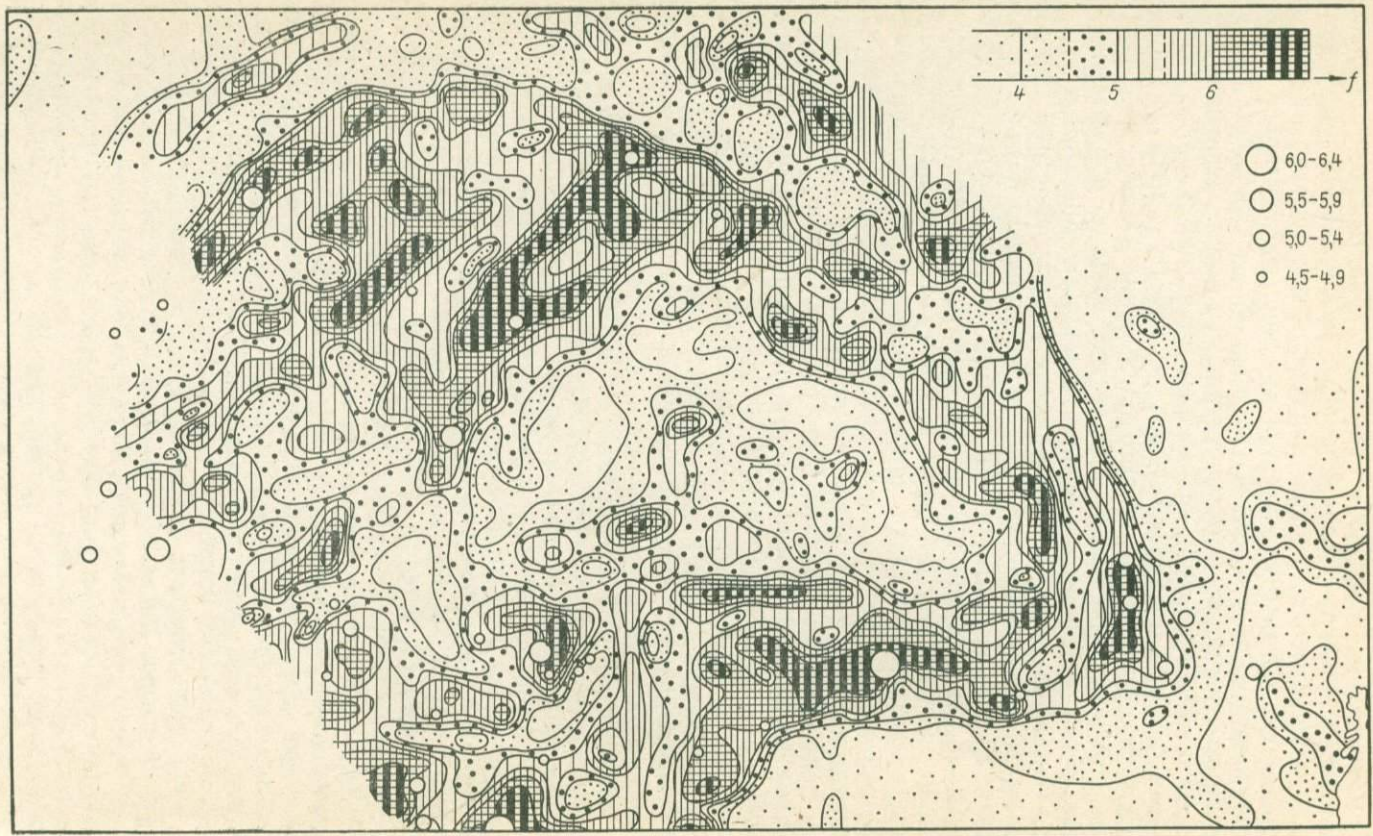
Отраженная на карте неравномерность пространственного распределения величины M_{\max} по простиранию отдельных тектонических зон является чрезвычайно важной. Она отражает реально существующую в природе картину быстрого изменения геологических условий даже в пределах «единой» тектонической зоны, позволяя на этом основании дифференцированно оценивать их потенциальную сейсмическую опасность. Без применения формальной методики построение детальных карт типа приведенной на рис. 22 было бы невозможно. Оправдана ли такая детальность, соответствует ли она реальному распределению сейсмичности Карпатского региона? Иными словами, соответствуют ли прогнозные значения M_{\max} , показанные на рис.22, наблюдениям? Хотя карта является прогнозной, она должна правильно «предсказать» происходившие в прошлом землетрясения.

У нас не было полной карты эпицентров землетрясений Карпатского региона, классифицированных по магнитуде. Мы располагали картами по отдельным странам и районам, составленными по разной методике и за разные сроки наблюдения, с различной степенью достоверности. Тем не менее для объективной проверки полученных нами результатов необходимо было рассмотреть хотя бы имеющиеся неполные данные, собранные в монографии В. Карника [157]. На эти материалы мы и будем в основном ссылаться в дальнейшем изложении.

Качественное сопоставление карты эпицентров с распределением прогнозных значений M_{\max} показано на рис.22. Максимальная магнитуда землетрясений, наблюдаемая в Карпатском регионе, превышает 7, достигая $7\frac{3}{4}$. Эти цифры в первом приближении следует считать верхним пределом магнитуды для рассматриваемой территории. На рис.22 наивысшая градация прогнозной магнитуды обозначена как $M \geq 6,8$. Причина такого несоответствия достаточно очевидна: задача для Кавказа решалась исходя из предположения о том, что верхний предел магнитуды на Кавказе составляет $6\frac{3}{4}$ (максимальная магнитуда зарегистрированных на Кавказе землетрясений). Эксплуатация кавказского решения не могла привести к появлению на итоговой карте Карпатского региона более высоких градаций M_{\max} .



- 6,0-6,4
- 5,5-5,9
- 5,0-5,4
- 4,5-4,9



Однако это не исключает возможности появления в зоне распространения этой градации землетрясений с большей магнитудой.

Анализ рис.22 показывает, что детальность проведенных на ней контуров вполне отвечает реальному распределению наблюдаемых магнитуд Карпатского региона. В подавляющем большинстве случаев удовлетворяется главное требование, необходимое для проверки: прогнозные значения M_{\max} не меньше наблюдаемых магнитуд землетрясений. Это заключение сделано с учетом возможных неточностей при определении координат эпицентров землетрясений, их магнитуды, а также детальности карты масштаба 1:2 500 000. Некоторые результаты проведенного сопоставления показаны не только на рис.22, но и приведены в табл.9. Их рассмотрение показывает, что мы не избежали ошибок типа «пропуск цели». Несмотря на то что таких исключительных случаев немного, два из них относятся к крупнейшим землетрясениям на территории Болгарии: Горна-Оряховица, 14/VI 1913 г., $M=6,8$ и Шабла, 31/III 1901 г., $M=6,7$. Эти случаи требуют более детального объяснения.

Указанные районы располагаются в пределах предгорной равнины с устойчивой тенденцией к опусканию на неотектоническом этапе развития Карпатского региона. Такие участки, как правило, характеризуются относительно невысоким уровнем сейсмической опасности. Исходя из этих соображений, в методических работах по Кавказу наибольшее внимание было уделено областям поднятий. Именно поэтому и на Кавказе мы допустили ошибки типа «пропуск цели» на пограничных между Скифской плитой и альпийской складчатой зоной участках (об этом уже говорилось в разделе 5 гл. IV). Рассмотрение закономерностей сейсмотектонических явлений во внутренних районах зон прогибаний, достаточно удаленных от альпийских поднятий и располагающихся в пределах плит (Скифской или Мизийской), является, по-видимому, специальной задачей, требующей иного, чем мы располагали, исходного материала (главным образом образом геофизического). Сейчас уже достаточно ясно, что для прогнозирования M_{\max} в зонах принципиально различными тенденциями тектонического развития на альпийском этапе не могут использоваться какие-то универсальные геолого-геофизические признаки: в каждом случае потребуется разная их совокупность. Не решив такой задачи для Кавказа, мы, естественно, не были застрахованы от появления неожиданно-

Рис. 22. Карта вычисленных значений максимальной магнитуды ожидаемых землетрясений Карпатского региона [19] (фрагмент)

Сопоставление наблюдаемых магнитуд землетрясений Карпатского района (M^*) с прогнозируемыми по геолого-геофизическим данным M_{\max}

Географическое положение	по-	Регион и его номер	Дата	I_0	M^*	M_{\max}
Краслице-Аш		Чешский, № 6		VI-VII	5,0	6,0—6,5
Кечкемет		Карпаты, № 21	8/VII 1911	IX	5,6	6,0—6,5
Будапешт		То же	12/I 1956	VII	5,4	5,0—5,4
Мор	» »	» »	14/I 1810	IX	—	6,0—6,4
Ясберень	» »	» »	21/VI 1868	IX	—	6,0—6,4
Комарно	» »	» »	28/VI 1763	IX	—	6,0—6,4
Бескиды	» »	» »	26/V 1914	—	5,2	6,8
Малые Карпаты	» »	» »	9/I 1906	—	5,7	6,5—6,7
Тимишоара	» »	» »	2/IV 1901	—	5,8	5,5—5,9
Кымпулунг	» »	» »	26/I 1916	—	6,4	6,5—6,7
Шабла		Болгария, № 23	31/III 1901	X	6,7	4,5
Горна-Оряховица		То же	14/VI 1913	X	6,8	6,0—6,4
Ямбол-Тополовград	» »	» »	15/II 1909	—	5,9	5,5—5,9
Пловдив	» »	» »	1928	—	7,0	6,8
Струма		Македония — долина Струмы, № 24	4/IV 1904	—	7 ³ / ₄	6,8

Примечание. Первые пять граф таблицы составлены по данным В. Карника [157]; последняя графа — по рис. 22. По данным Балканского каталога, для землетрясения Тимишоара $M^*=5,0$, для землетрясения Шабла $M^*=7,2$, для землетрясения Горна-Оряховица $M^*=7,0$ [163].

стей в подобных зонах Карпатского региона. По известным нам геологическим условиям районы типа Горна-Оряховица не отличаются от целого ряда других, занимающих суммарно огромные площади в пределах Карпатского региона (см. рис.22). Включение в анализ таких случаев без специального их рассмотрения, обучение на них и распространение результатов анализа (прогнозирование) приведет к массовому появлению на прогнозных картах ошибок типа «ложная тревога».

Следует сделать еще одно замечание. Как при решении задачи по Кавказу, так и при эксплуатации этого решения в Карпатском регионе, мы не располагали достаточно подготовленными для анализа данными по шельфовой части акватории Черного моря. Поэтому прибрежные районы в обоих случаях классифицированы нами наименее уверенно. Вместе с тем в последнее время доказано, что прибрежные части Черного моря у берегов Северной Болгарии характеризуются сложными тектоническими условиями. Привлечение дополнительных материалов (в первую очередь геофизических) должно существенно изменить картину распределения зон с различной M_{\max} на рис.22 для района Шабла. Сказанное в полной мере относится и к другим прибрежным районам Болгарии и Румынии, охарактеризованным нами в самом первом приближении.

Главным итогом проведенного обсуждения можно считать

следующий: распределение зарегистрированной сейсмичности в пределах Карпатского региона в целом (в подавляющем большинстве случаев) удовлетворительно согласуется с теми прогнозными оценками M_{\max} , которые представлены на рис. 22, подготовленной без учета данных о карпатских землетрясениях. Наиболее хорошие результаты получены по областям преимущественных поднятий, занимающих большую часть рассмотренной площади. Исключения относятся к областям прогибаний в пограничных участках между зоной альпийской складчатости и обрамляющей платформой.

Важно также подчеркнуть, что составленная нами карта не только указывает на увеличение потенциальной сейсмической опасности в некоторых районах Карпат, но и позволяет в отдельных местах заметно уменьшить прогнозную оценку M_{\max} по сравнению с результатами, получаемыми при использовании «традиционных» методов сеймотектонического анализа (например, для некоторых узлов пересечения линейментов разного простирания, отдельных активных в новейшее время зон глубинных разломов и т. д.).

Подготовленная карта распределения зон с различной M_{\max} является первой попыткой подобного рода для Карпатского региона. Она составлена с применением формальной методики путем распространения на территорию Карпат тех закономерностей, которые были ранее установлены для Кавказского сегмента области альпийской складчатости.

Строго говоря, итоговая карта рис. 22 может считаться картой прогнозных значений M_{\max} только условно. Во-первых, задача для Кавказа решалась при допущении меньшей величины верхнего предела M_{\max} , чем зарегистрированная в Карпатах ($6\frac{3}{4}$ и $7\frac{3}{4}$ соответственно). Во-вторых, при эксплуатации полученного ранее решения в условиях Карпатского региона мы вынуждены были пойти на замену одного и исключение второго из десяти исходных геологических параметров, на которых были основаны наши исследования на Кавказе. Поэтому рис. 22 следовало бы считать картой зон возникновения землетрясений Карпатского региона, классифицированных только по относительной сейсмической опасности. Однако проведенное сопоставление этих зон с реальным распределением эпицентров показало, что каждая из них характеризуется вполне определенными максимальными значениями магнитуды землетрясений, отмеченных в 1900—1955 гг. При этом за редкими исключениями, вполне объяснимыми, прогнозные и наблюдаемые оценки в целом соответствуют друг другу. Это обстоятельство представляется чрезвычайно важным и имеет несколько следствий методического характера.

Во-первых, оно позволяет снять вопрос об относительном характере прогнозных оценок M_{\max} на карте рис. 22 и считать их вполне достоверными по значениям магнитуды, указанной для каждой градации на этом рисунке. Во-вторых, для высшей гра-

дании M_{\max} на рис. 22 появляется возможность указать верхний предел магнитуды, равный $7^{3/4}$. В-третьих, становится очевидным, что оконтуренные к настоящему времени по данным сейсмо-статистики зоны возникновения землетрясений Карпатского региона [157] недостаточно точно отражают потенциальную сейсмическую опасность этого участка области альпийской складчатости. В некоторых районах, считающихся асейсмичными, возможно в будущем проявление сильных землетрясений; в других, уже проявивших себя в сейсмическом отношении, землетрясения еще не достигли максимально возможного для них уровня. Наконец, в четвертых, подтверждается предположение, что эксплуатацию решения задачи выделения зон с различной M_{\max} можно проводить и для других (помимо «эталонного») регионов внешней зоны области альпийской складчатости. Более того, изменение некоторых исходных геологических параметров (в данном случае двух) не влияет существенно на точность получаемых результатов. По всей вероятности, выбор Кавказского региона в качестве первого объекта, на котором решалась задача выделения зон с различной M_{\max} по совокупности геолого-геофизических данных, следует признать удачным. Разнообразие сеймотектонических условий, присущее этому региону, позволило правильно определить основные закономерности связи геологических и сейсмических явлений во внешней зоне области альпийской складчатости.

Несмотря на обнадеживающие результаты, наш опыт районирования Карпатского региона по величине M_{\max} показал, что для областей преимущественного прогибания прогнозные значения M_{\max} недостаточно точны и к ним следует относиться с осторожностью.

Прогнозирование зон возникновения землетрясений с различной магнитудой в пределах Альп

Успешные попытки прогнозирования сейсмической опасности с помощью формального метода на территории Крыма и Карпат побудили обратиться далее к анализу регионов, несколько отличающихся по характеру истории развития на альпийском этапе и современной структуре от «эталонного» Кавказа. Выбор пал на классическую зону области альпийской складчатости — Альпы — в пределах территории Северной Италии. При проведении описанных ниже исследований преследовалась цель дополнительно проверить в косвенной форме правильность решения кавказской задачи и одновременно определить область возможного применения этого решения для других частей альпийской складчатой зоны.

Как и в предыдущих случаях, на первой стадии были накоплены необходимые исходные данные.

К настоящему времени территория Северной Италии хорошо изучена различными геолого-геофизическими методами, что позволило такие данные подготовить.

Карта историко-тектонического районирования (рис. 23) использует соответствующую часть «Сейсмотектонической карты Европы» [9] с некоторыми дополнениями по «Международной тектонической карте Европы» [138], «Структурной карте Италии» [167]. Легенда карты близка к принятой на «Сейсмотектонической карте Европы». Большая часть Южных Альп и Северных Апеннин отнесена к новообразованным поднятиям внутри геосинклинали, возникшим в мезозое, или в кайнозое. Сравнительно небольшую площадь занимают устойчивые поднятия в течение альпийского цикла, испытавшие глыбовые дифференцированные движения в неоген-четвертичное время. Эта зона соответствует массиву Аржантейра по границе с Францией.

К областям преимущественного опускания в течение альпийского цикла отнесена Ломбардская низменность, представляющая собой межгорную депрессию, характеризующуюся интенсивными прогибаниями в течение всего новейшего этапа, в том числе и в верхнем плейстоцене — голоцене.

В отличие от шельфовой зоны Адриатического моря, характеризующейся в течение новейшего этапа направленными нисходящими движениями, показанная на рис. 23 часть шельфа Тирренского моря (в пределах Генуэзского залива) отнесена к зоне интенсивной новейшей переработки. По всей вероятности, именно в этой части происходило обрушение и погружение под уровень моря прилежащей части Приморских Альп, сопровождавшееся блоковыми движениями по зонам разломов различного простирания. Такие представления отражены на соответствующей части сейсмотектонической карты Европы [9], и им отвечает сложный характер рельефа дна и гравиметрического поля Генуэзского залива [167].

Мы не располагали данными о новейших движениях Северной Италии. Поэтому для получения информации об амплитудах неотектонических движений и их контрастности были использованы карты рельефа масштаба 1 : 1 000 000, а также (для Ломбардской впадины) материалы о мощностях плиоцен-четвертичных отложений [167]. Конечно, было бы лучше провести геоморфологический анализ, выяснить высоту рельефа до начала новейших движений, величину денудационного срезания (зависящую не только от интенсивности и величины вертикальных движений, но также от водности рек, литологии пород и т. д.) и ввести соответствующие поправки. Однако решение экспериментальной задачи показало (см. рис. 13), что можно использовать грубые градации, а возможными ошибками, связанными со слабой изученностью, можно пренебречь — градации выбраны в километрах, а высоты исходного рельефа и величины денудационного срезания вряд ли превышали сотни метров.

Как было показано, при распространении решения экспериментальной задачи на Карпатский регион (см. раздел 6 гл. IV) оказалось возможным изменить содержание одного (или двух)

из общего числа тектонических параметров или даже не принимать его во внимание при расчетах (заменяв его вклад в суммарную прогнозную оценку постоянной величиной). Оказалось также возможным использовать сильно упрощенные исходные данные, с весьма грубыми градациями, если эти данные, однако, одинаково хорошо изучены во всем рассматриваемом регионе. Этот важный вывод позволил и в данном случае привлечь к предварительным расчетам сейсмической опасности Северной Италии имеющиеся по ней исходные данные, не обязательно в точности соответствующие набору для «эталонного» региона, с последующим их уточнением и оперативным исправлением прогнозных оценок.

В соответствии с этим положением вместо «сейсмической активности», использовавшейся при решении экспериментальной задачи, нами был выбран для другой параметр — выделившаяся энергия [157].

Информация об изостатических аномалиях силы тяжести взята из работ М. Е. Артемьева [2] и Де Брёйн [153], которая была обобщена в монографии Г. А. Шенкаревой ([146], карта VIII). Для участков, по которым гравиметрические данные отсутствовали, вклад в итоговую оценку прогнозной магнитуды за счет гравиметрического параметра был условно взят повсеместно одинаковым $\phi_{10} = 1$.

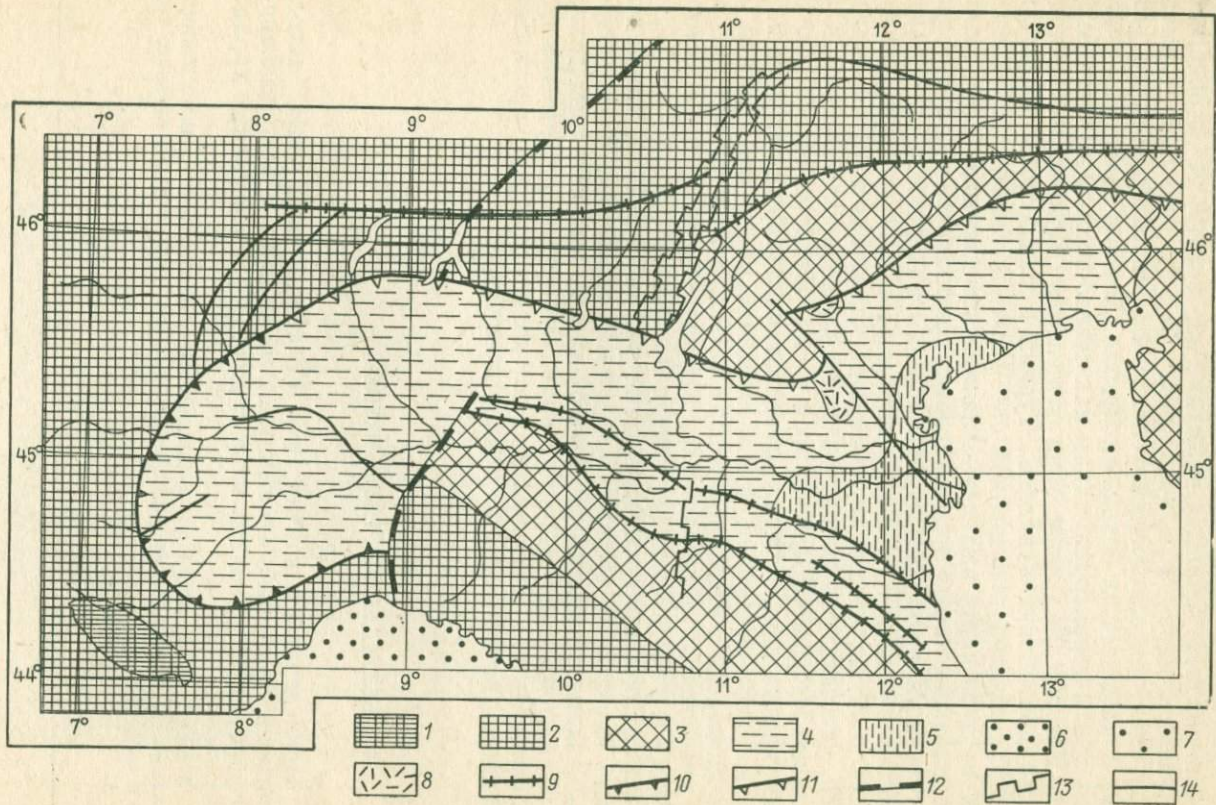
Сущность остальных параметров осталась неизменной по сравнению с первым решением экспериментальной задачи и последующей его «эксплуатацией» для Кавказа, Крыма и Карпат.

После подготовки исходных геологических данных они были формализованы, как и в описанных ранее случаях (см. разделы 5, 6 гл. IV). Одна из составленных формализованных карт представлена на рис. 24. После этой операции оказалось возможным подготовить карту зон возникновения землетрясений с различной магнитудой для территории Северной Италии.

Результаты использования геотектонического метода для прогноза максимальных магнитуд ожидаемых землетрясений Северной Италии показаны на рис. 25. Распределение вычисленных оценок сейсмической опасности, которое представляется доста-

Рис. 23. Структурная схема Северной Италии. Составили Г. И. Рейснер, В. Н. Шолпо.

1 — длительно развивающиеся поднятия, затронутые глыбовыми движениями в неоген-четвертичное время; 2 — поднятия, развивающиеся с мезозоя; 3 — то же, с кайнозоя; 4 — опускания в межгорных впадинах, развивающиеся в неоген-четвертичное время; 5 — интенсивные прогибания в межгорных впадинах в верхнем плейстоцене — голоцене; 6 — отдельные части шельфа, затронутые резко дифференцированными глыбовыми движениями в неоген-четвертичное время; 7 — другие части шельфа; 8 — области, покрытые неоген-четвертичными эффузивными породами; 9 — крупные региональные разломы типа глубинных; 10 — зоны контрастного сочленения; 11 — крупные региональные флексуры; поперечные разломы: 12 — первого, 13 — второго, 14 — третьего порядка



точно хорошо обоснованным и детальным, может рассматриваться как предварительная схема геологической основы сейсмического районирования. Обратим внимание на некоторые особенности полученной карты. Сравнение рис. 25 с имеющимися схемами распределения сейсмических явлений Северной Италии [146, 159] показывает их большое сходство. Хорошо известным очаговым зонам территории, таким как северо-восточная часть Апеннин, Карнийские Альпы, зона сочленения Приморских Альп с зоной прогибания западнее Турина и т. д., соответствуют на рис. 25 области повышенной сейсмической опасности. Вместе с тем на этой карте выделены значительные по площади участки, в пределах которых предполагается возникновение сильных землетрясений, а по сейсмостатистическим материалам они практически асейсмичны. В качестве примера можно назвать южную часть зоны Ивреа в области ее сочленения с межгорной депрессией, участок Альп между озерами Комо и Лаго-Маджоре, по границе Италии со Швейцарией и т. д. Представляется, что такие участки должны стать объектом специального изучения.

Наконец, следует обратить внимание на точный прогноз места возникновения землетрясений 1976 г. в области Фриули. Зона его возникновения отвечает отмеченному на рис. 25 участку с $M \geq 6,5$, расположенному севернее г. Удине*.

В заключение необходимо еще раз подчеркнуть, что надежность карты зон возникновения землетрясений с различной M_{\max} зависит главным образом от надежности исходных данных и их тектонической интерпретации. Особенности применявшегося формального метода позволяют корректировать прогнозные оценки по мере получения новой информации.

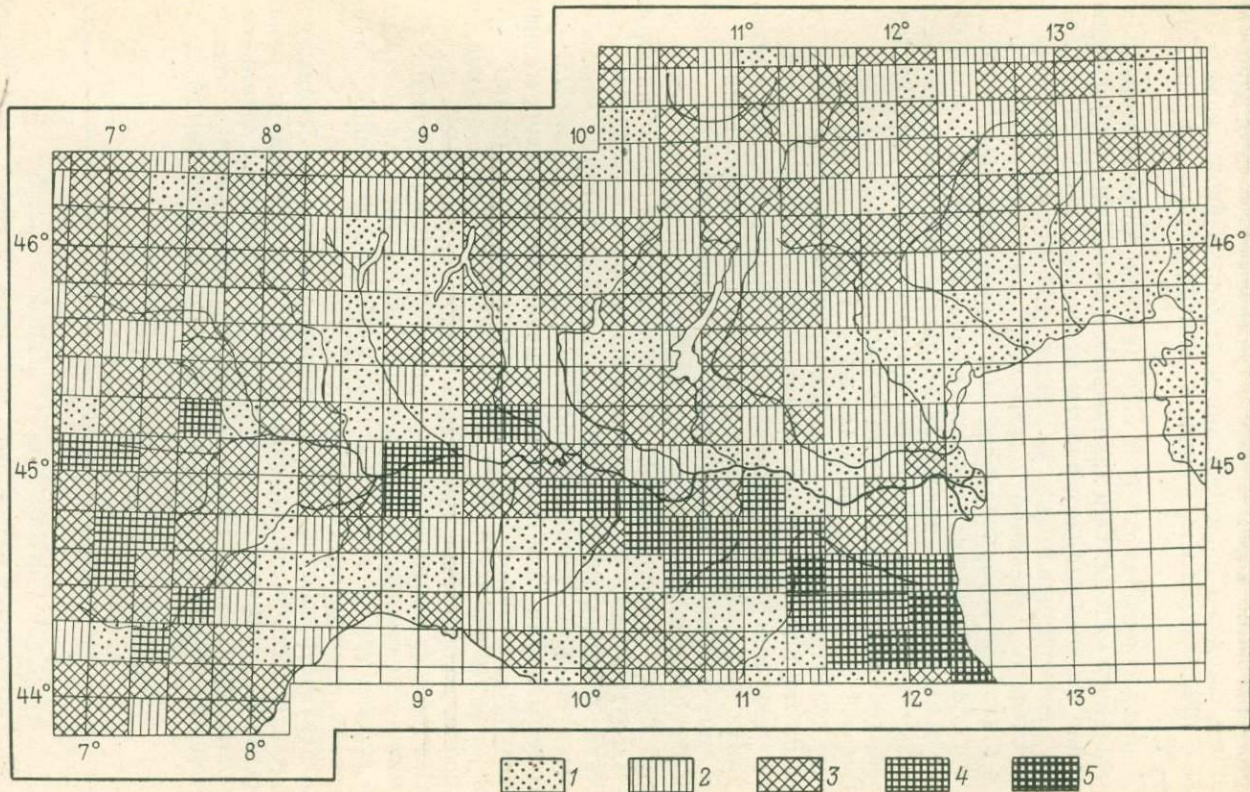
7. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенный в главах III и IV анализ различных методов прогнозного выделения сейсмоопасных зон с использованием геологических данных позволяет дать их сравнительную характе-

* Карта была составлена в апреле 1976 г. и демонстрировалась в Москве итальянским специалистам через несколько дней после первого главного толчка 6 мая 1976 г.

Рис. 24. Формализованная карта контрастности новейших тектонических движений Северной Италии. Составили Б. А. Борисов, Г. И. Рейснер.

Контрастность тектонических движений (в км):
1 — 0—0,6; 2 — 0,7—1,1; 3 — 1,2—2,4; 4 — 2,5—4,5; 5 — более 4,5



ристику и выявить достоинства и недостатки формального метода. Это сделать тем более удобно, что при отмеченном анализе по ряду регионов альпийской складчатости использовался один и тот же исходный геологический материал (Крым, Кавказ, Карпаты в пределах СССР, Румынии, Венгрии, Чехословакии, Болгарии).

В первую очередь следует еще раз подчеркнуть особенности формального метода. Они заключаются в том, что: геологическое описание на всех стадиях работы отнесено к небольшим по размерам равноплощадным участкам той или иной территории; геологическое описание включает информативные признаки (значения которых различны для районов с разной сейсмической опасностью); сейсмическая опасность представляется в виде суммы вкладов, зависящих от конкретных значений той или иной характеристики геологического описания и выражается в количественной форме в единицах магнитуды.

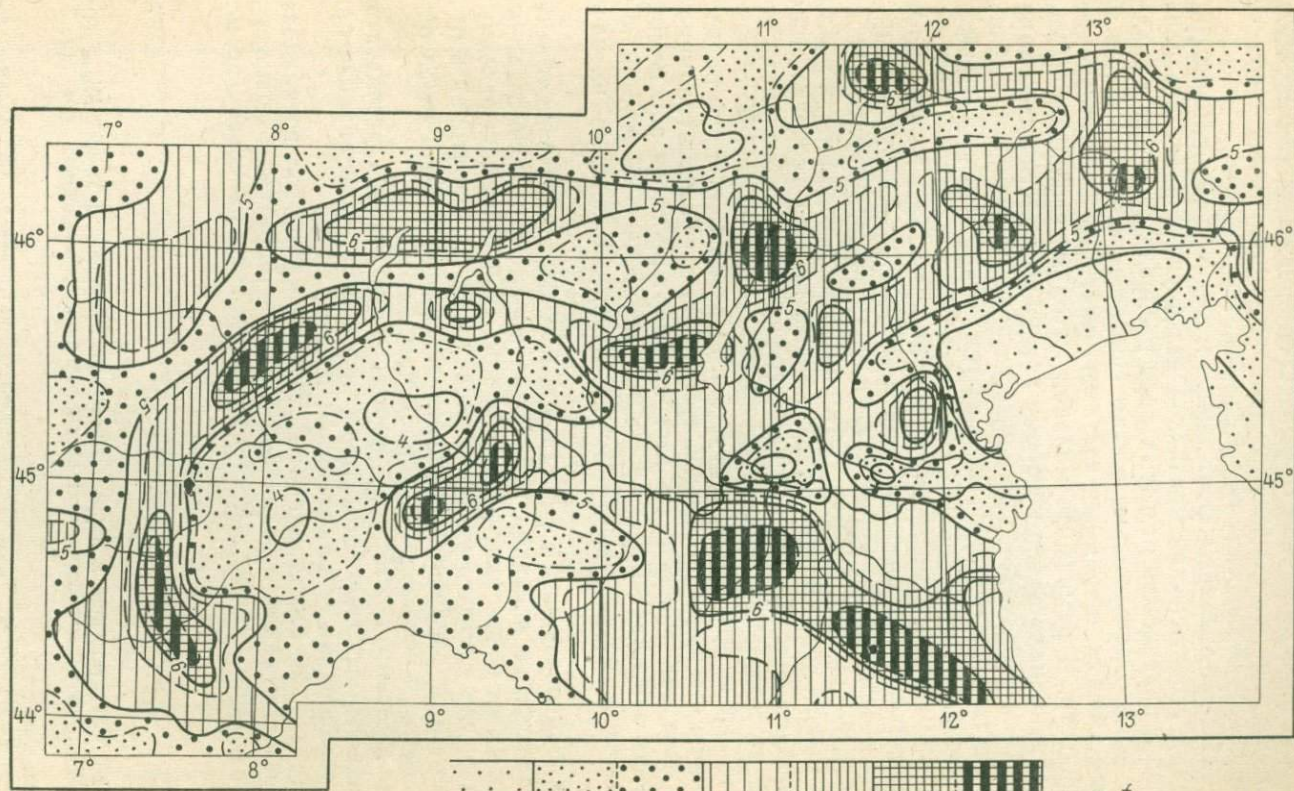
Все эти особенности формальной методики являются по существу новыми, что определило получение принципиально новых результатов при прогнозировании потенциальной сейсмической опасности, выявивших значительные преимущества формальной методики над традиционными в любой их модификации.

В чем, конкретно, выражаются эти преимущества?

1. Использование формальной методики позволяет резко увеличить объем привлекаемой исходной геологической информации. При решении экспериментальной задачи по Кавказу было принято во внимание 10 признаков, часть из которых имели непрерывную цифровую шкалу обозначений, а остальные были разбиты на градации (для сравнения отметим, что в лучших модификациях традиционной методики удастся непосредственно принять во внимание не более 2—3 признаков). Такой подход, несомненно, должен был привести к резкому увеличению детальности итоговых прогнозных карт распределения площадей с различными значениями M_{\max} и их обоснованности. Для подтверждения этого тезиса достаточно даже беглого сравнения, например, карт, приведенных на рис. 5 и 17.

2. Другое преимущество формальной методики основано на том, что геологическое описание отнесено к небольшим равноплощадным участкам. Это также резко увеличивает детальность итоговых прогнозных карт и одновременно повышает точность проведения на них контуров с различными значениями M_{\max} . Те-

Рис. 25. Распределение вычисленных прогнозных значений f максимальной магнитуды M_{\max} ожидаемых землетрясений на территории Северной Италии [151]



перь уже нет вопроса о пределах экстраполяции в пространстве той или иной эталонной сейсмической опасности, так как любая элементарная ячейка исследуемой территории имеет свою численную характеристику максимальной магнитуды.

3. Использование в формальной методике только информативных геологических признаков резко увеличивает обоснованность и надежность итоговых карт распределения зон с различной M_{\max} . Одновременно с этим снимается вопрос о более или менее важных, общих или частных геологических критериях сейсмичности. В рамках формальной методики соблюдается жесткий принцип, согласно которому важность геологической характеристики определяется степенью ее информативности. Увеличение надежности связано также и с тем, что итоговые карты имеют тесную связь с исходным геологическим материалом. Для каждой элементарной ячейки прогнозной карты M_{\max} по имеющейся анкете геологического описания или набору формализованных карт по отобранным признакам (например, представленным для Кавказа — см. рис. 15, 16, или Карпатского региона — см. рис. 20, 21) можно легко установить, с какими именно геологическими условиями связано ее отнесение к той или иной категории по степени потенциальной сейсмической опасности. В результате итоговые карты легко контролируются. Мы уже отмечали в разделе 3 гл. III, что при многоступенчатой системе в рамках традиционной методики всякая связь итоговых карт прогноза зон возникновения землетрясений с первичным геологическим материалом теряется и соответственно весьма затруднен контроль их качества.

4. Использование в формальной методике в качестве объекта геологического описания небольших по площади элементарных ячеек имеет и еще одно преимущество. При уточнении исходных данных для каких-то участков исследованной территории в итоговые карты распределения прогнозных оценок M_{\max} могут легко вводиться необходимые коррективы.

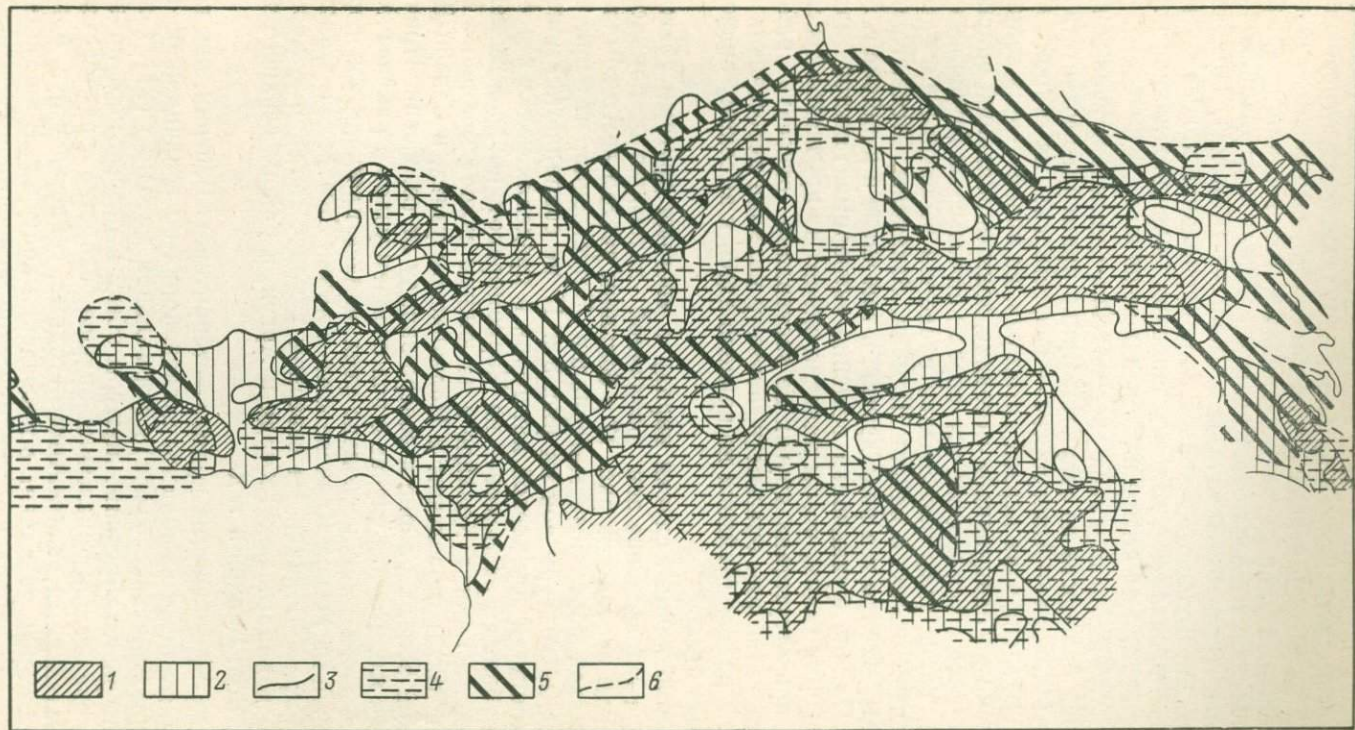
Рассмотрим некоторые примеры сопоставления результатов применения традиционных и формальных методов анализа при прогнозировании сейсмической опасности.

На рис. 26 сопоставляются итоговые карты зон возникновения землетрясений с различной M_{\max} по территории Кавказа и Крыма, выполненные с использованием традиционного (по мо-

Рис. 26. Сопоставление контуров карты вычисленных значений M_{\max} (см. рис. 17) с контурами карты зон возникновения землетрясений (см. рис. 5) [21].

Данные с рис. 17:

1 — зоны со значениями $M_{\max} \geq 6,0$; 2 — зоны со значениями $6,0 > M_{\max} \geq 5,0$; 3 — границы зон. Данные с рис. 5: 4 — зона возникновения землетрясений с $M \geq 5\frac{3}{4}$; 5 — зона возникновения землетрясения с $5\frac{3}{4} > M \geq 4\frac{3}{4}$; 6 — границы зон



дели дизъюнктивного узла) и формального методов (совмещены данные, представленные на рис. 5 и 17). Области, относящиеся к первой категории сейсмической опасности, выделенные разными способами, в ряде случаев совпадают. Таковы, например, районы сочленения Большого Кавказа с Алазано-Агрчайской депрессией (участок Закаталы — Шеки — Шемаха), Прикавказский район Большого Кавказа, меридиональная полоса западнее Военно-Грузинской дороги, широкая меридиональная полоса между г. Гори на севере и г. Ереваном на юге.

Можно найти и случаи «несогласия» новых контуров зон наибольшей опасности со старыми. Яркий пример несоответствия — район Майкопа — Апшеронска — Нефтегорска: на старой карте здесь показана зона первой категории, на новой — этой зоны нет. Согласно «традиционной» методике, зоны наибольшей опасности выделялись в тех местах, где пересекаются зоны глубинных разломов. Такие узлы пересечения разломов выделены на Кавказе во многих местах: в районе Шемахи, Закаталы, Шеки, Красной Поляны, Чхалты и в ряде других, в том числе и в районе г. Майкопа. Однако функционал решения экспериментальной задачи был выбран таким, чтобы наличие одного из признаков сейсмичности при отсутствии других не заставляло относить район к высшей категории опасности, поэтому наличие пересечения разломов в районе Майкопа не привело здесь к высокому значению прогноза M_{\max} .

Рассмотренный случай наряду с многими другими убеждает в том, что выделение зон различной категории сейсмической опасности сделано на рис. 17 с большим учетом всего комплекса имеющихся первичных материалов. Естественно, что при этом отдельные контуры зон на рис. 5 и 17 не совпадают. Уменьшились площади зон первой категории в пределах узлов пересечения глубинных разломов — на Черноморском побережье между Джубгой и Сочи, в Колхиде и на южном склоне Большого Кавказа, в Минераловодском и Нальчикском узлах, в Северо-Дагестанской зоне, в районе к северо-западу от оз. Севан. Причины здесь те же, что и в случае с увеличением узлов в районе г. Майкопа. Вместе с тем несколько увеличились площади зон первой категории на Малом Кавказе южнее линии Самтредиа — Хашури и Акстафа — Болниса, на северном склоне Большого Кавказа между долинами рек Теберда и Аргун, в районе верхнего течения р. Бол. Лиахва и т. д.

Рассмотрим другой пример — территорию Венгрии, для которой также были выполнены исследования по традиционной (модель дизъюнктивного узла) и формальной методике [21]. Совмещенные результирующие контуры обеих итоговых карт приведены на рис. 27. Он показывает большое сходство в расположении зон, выделенных различными методами, свидетельствуя, однако, и о некоторых различиях в проведении контуров. В частности из 22 участков наибольшей сейсмической опасности, выделенных на

территории Венгрии традиционным методом, 5 целиком попали в области невысоких значений M_{\max} при использовании формальной методики. Что касается остальных 17 участков «традиционной карты», то во многих случаях площади их на «формальном» варианте несколько уменьшились, однако кое-где увеличилась территория, отнесенная на «традиционной» карте к сравнительно безопасной категории.

Такие же случаи отмечались и для территории Кавказа. Они вновь подтверждают, что при выделении сейсмоопасных зон с использованием геологических данных необходимо привлекать большое количество признаков, связанных с сейсмичностью, что возможно только при условии формализации исходной информации.

Заметим, что аналогичная ситуация выявилась в последнее время и в некоторых других частях Балканского региона. Работы М. Арсовского и его коллег по территории Югославии [166] показали, что использование одного из вариантов формальной

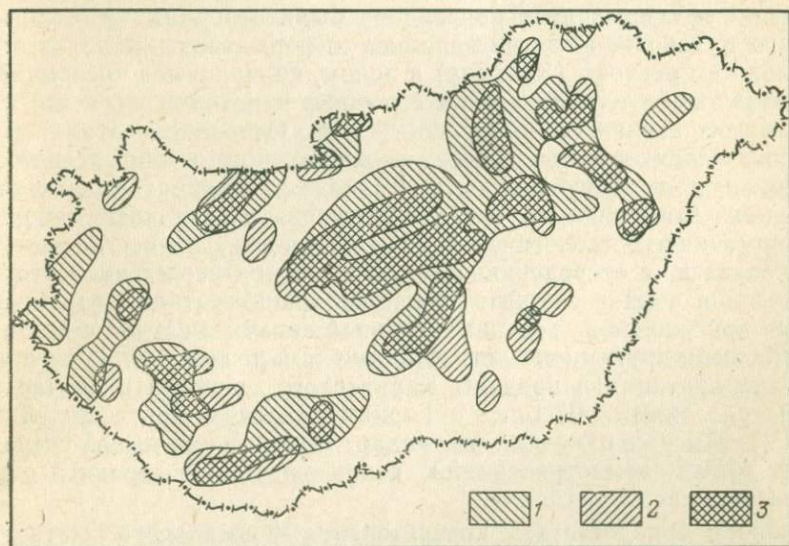


Рис. 27. Сопоставление контуров зон возникновения землетрясений на территории Венгрии, выделенных разными методами [21].

1 — зоны, выделенные «традиционным» методом; 2 — зоны, выделенные «формальным» методом; 3 — зоны, в пределах которых оценки по «традиционным» и «формальным» методам совпадают

методики позволяет в значительной степени детализировать прогноз потенциальной сейсмической опасности, сделанный на основе применения традиционных методов анализа.

Приведенные в гл. IV данные показывают, что формальный метод прогноза зон с различной M_{\max} имеет значительные преимущества перед традиционными: он более точен, надежен и боль-

ше соответствует исходной геологической информации. Вместе с тем формальный метод не лишен и определенных недостатков. Главный из них связан с введением начального допущения, согласно которому обучение происходит на ячейках с экспертными, а не истинными оценками M_{\max} . Это допущение, однако, неизбежно, если есть необходимость сравнительного анализа районов с разным потенциальным уровнем сейсмической опасности. Введение этого допущения означает, что при прогнозировании сейсмической опасности могут возникать ошибки типа «пропуск цели» главным образом по отношению к зонам средней и слабой сейсмичности. По отношению к зонам высокого уровня сейсмичности возможно появление ошибки типа «ложная тревога». Однако проведенное выше сравнение результатов применения формального и традиционных методов анализа показало, что ошибок этого типа последний метод дает значительно больше (см. рис. 26, 27).

Другой недостаток формального метода связан с тем, что для решения экспериментальной задачи были отобраны те геологические признаки, которые являлись информативными для всего эталонного региона (Кавказа) в целом, являющимся чрезвычайно сложным гетерогенным по строению и истории развития на различных этапах геологической жизни. Очевидно поэтому, что геологическая обстановка мест возникновения землетрясений в различных тектонических зонах Кавказа разнообразна и, следовательно, этим зонам будут соответствовать различные наборы информативных геологических характеристик, не всегда могущие совпасть с «усредненными». Прямым подтверждением этого положения может служить появление ошибки типа «пропуск цели» при решении экспериментальной задачи в случае с понтикапейским и другими землетрясениями (см. раздел 5 гл. IV) и при его эксплуатации в пределы Карпатского региона в случае с землетрясениями Шабла и Горна-Оряховица (см. раздел 6 гл. IV). Мы уже отмечали нестандартность геологической ситуации с этими землетрясениями по отношению к средней для остальных частей регионов.

Говоря о недостатках использования формального метода, следует упомянуть еще об одном. При решении экспериментальной задачи практически не были использованы геофизические материалы (за исключением сведений о градиентах изостатической аномалии силы тяжести). Это было связано с несколькими причинами. Во-первых (см. раздел 3 гл. IV), число параметров геологического описания, которое можно было использовать для решения задачи, ограничивалось 10 признаками. В этих условиях мы стремились максимально использовать материалы историко-структурного анализа, т. е. чисто геологические. Во-вторых, некоторые геофизические параметры (например, изостатические аномалии), оказались неинформативными. В-третьих, многие геофизические данные в принципе не удовлетворяли условиям ре-

шения экспериментальной задачи, когда объектом описания являются сравнительно небольшие по площади элементарные ячейки. Детальность геофизических материалов намного ниже геологических (при том же масштабе исследований), что неминуемо ведет к «размазыванию» геофизической информации на площадях, часто превышающих размеры элементарных ячеек.

В свойственных формальным методу недостатках заключены и возможности его совершенствования. Для более надежного установления экспертных оценок M_{\max} по сейсмологическим данным возможен только один путь — уточнения сейсмического режима эталонного региона в течение длительных промежутков времени. Частично такое уточнение сделано составителями нового каталога [93]. Тем не менее, следует это еще раз подчеркнуть, окончательное решение этой проблемы представляется в настоящее время сомнительным. Оно означало бы, что найдены пути прогнозирования сейсмической опасности только по сейсмологическим данным без привлечения геологических материалов, чему противоречит весь опыт сейсмологических и сеймотектонических исследований, накопленный к настоящему времени в СССР и за рубежом.

Для более успешного решения экспериментальной задачи необходимо решать ее не для крупных гетерогенных по строению регионов, а для более однородных геотектонических элементов, его составляющих. В этом случае придется заново определять информативность тех или иных геологических признаков и соответственно составлять новые списки параметров геологического описания эталонных ячеек. Однако на всех стадиях возможно использовать уже разработанные методические приемы.

Совершенствование методики возможно также путем привлечения к анализу дополнительных исходных геологических и геофизических данных, что окажется совершенно необходимым при решении экспериментальных задач по отдельным тектоническим зонам. Необходимо также уточнение и дополнение тех исходных данных, которые были использованы в настоящей работе.

Рассмотренный формальный метод позволяет получить прогнозные значения максимальных магнитуд землетрясений для эталонного региона (Кавказа) и ряда других территорий в альпийской складчатой области. В силу рассмотренных выше причин они не могут считаться окончательными и безоговорочными. Однако в настоящее время эти оценки в наибольшей степени соответствуют исходному геологическому материалу со всеми свойственными ему положительными качествами и недостатками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прогнозирование степени сейсмической опасности определенной территории является одной из важнейших народнохозяйственных проблем. В настоящее время она решается путем составления нормативных карт сейсмического районирования территории СССР. При разработке проблемы прогноза достигнуты определенные успехи. Нормативные карты с каждым новым изданием в период их жизни набирают все меньше ошибок типа «пропуск цели», однако не было еще ни одного издания, которое избежало бы этих ошибок полностью — сильные землетрясения продолжают возникать в тех участках территории СССР, которые на нормативных картах были отнесены к слабой или средней категории по степени сейсмической опасности. Даже в уже полностью готовый вариант последней карты сейсмического районирования территории СССР пришлось вводить существенные коррективы в связи с возникновением некоторых землетрясений, например, Газлийских 1976 г. [104].

Одной из главных причин сложившегося положения является частичное или полное игнорирование геологических данных при подготовке карт сейсмического районирования на одной из самых ответственных стадий проведения этой работы — при прогнозировании зон возникновения землетрясений с различной максимальной магнитудой. Между тем, геологические и сейсмические явления теснейшим образом связаны между собой, посным, взятым изолированно — ни сейсмологическим (если говорить о дифференцированной оценке M_{\max} небольших по размерет никакой другой возможности оценки степени потенциальной сейсмической опасности, кроме самого широкого использования для этой цели определенной геологической информации. Ее привлечение внесет в карты зон возникновения землетрясений прогностический элемент, что недоступно никаким другим данным, взятым изолированно — ни сейсмологическим (если говорить о дифференцированной оценке M_{\max} небольших по размерам участков), ни тектонофизическим, ни геофизическим.

Недостаточно широкое привлечение геологических данных к составлению нормативных карт сейсмического районирования отнюдь не является случайным. Частично в нем виноваты и сами специалисты в области сеймотектоники, которые до недавнего времени не имели на вооружении достаточно надежной методики перехода от геологических критериев сейсмичности к выделению зон возникновения землетрясений с различным уровнем потенциальной сейсмической опасности. Отсутствие такой методики не позволяло специалистам по сеймотектонике достаточно уверенно защищать получаемые ими результаты. В полном соответствии с этим при прогнозировании зон возникновения землетрясений предпочтение вольно или невольно отда-

валось сейсмологическим оценкам, основанным на данных сейсмостатистики.

Действительно, разработка оптимальной методики выделения зон возникновения землетрясений с использованием геологических данных является наиболее деликатной и сложной задачей всего сеймотектонического цикла исследований. По существу прогнозирование сейсмической опасности означает экстраполяцию на основе геологических данных уже зарегистрированного максимального ее уровня в пределы аналогичных по тектоническому устройству участков, где этот максимальный уровень еще не достигнут. Оба рассмотренных метода — традиционный и формальный — опираются при этом на данные сейсмостатистики, поэтому оценка сейсмической опасности при их применении не может быть выше того уровня, который определен на основе этой сейсмостатистики. Достаточно хорошо известно, что данные сейсмостатистики часто бывают неполными и не отражают реальной сейсмической опасности того или иного региона или отдельных его частей. Таким образом, нет гарантий того, что в областях, выделенных в качестве зон возникновения землетрясений определенной магнитуды, не произойдет землетрясения более сильного, чем прогнозируется, независимо от того, используются при анализе геологические данные, или нет; сходную мысль высказал ранее И. Е. Губин [52]. Оценка уровня максимальной сейсмической опасности на базе уже зарегистрированных землетрясений является слабым местом рассмотренных методов, даже несмотря на попытку парировать этот недостаток введением экспертных оценок M_{\max} для учебного материала в формальном методе.

К настоящему времени использование любой модели в рамках традиционной методики не позволяет на должном уровне, т. е. детально и надежно (с необходимым и доступным контролем) прогнозировать сейсмическую опасность каждого сравнительно небольшого по площади участка той или иной территории. А решения этой задачи настоятельно требует практика проведения антисейсмического строительства в сейсмически опасных районах.

В разделе 3 гл. III мы уже обращали внимание читателя на возможные пути резкого улучшения качества традиционной методики. Они заключаются в усилении комплексного подхода к прогнозированию потенциальной сейсмической опасности, привлечению к анализу более обширного и разнообразного фактического материала, более строгом и объективном прохождении различных стадий сеймотектонического анализа — при составлении сводной комплексной карты разломной тектоники и дизъюнктивных узлов, синтетической карты сеймотектонического потенциала и карты относительной сейсмической опасности по геологическим данным. Предложенные способы составления указанных карт основаны на частичной формализации исход-

ной геологической информации, что в конечном счете ведет к сближению традиционных и формальных методов анализа. А это в свою очередь означает, что есть возможности повышения надежности, детальности и объективности исследований и в рамках традиционной методики.

Формальная методика вышла из рамок традиционной. Она использует все положительные качества последней, такие как представления о необходимости учета широкого круга геологической информации для сеймотектонического анализа, о многообразии связей геологических и сейсмических явлений и отсутствии универсального геологического критерия сейсмичности, о квазиоднородных зонах возникновения землетрясений с различной максимальной магнитудой и т. д. Присущие формальным методам особенности — формализация (исходной) геологической информации, выбор в качестве объекта геологического описания небольших равноплощадных участков территории (элементарных ячеек), использование для этого описания только информативных параметров; разработка представления о сейсмической опасности как о сумме вкладов в значение магнитуды, зависящих от каждой из отобранных характеристик геологического описания, — позволили преодолеть многие трудности, стоявшие непреодолимым барьером на пути традиционных методов анализа. Из числа их отметим невозможность использования в рамках традиционной методики, существующей в настоящее время, большого количества необходимой исходной геологической информации, неуверенность выделения (в качественной форме) зон с различной потенциальной сейсмической опасностью из-за незнания веса геологических критериев сейсмичности в их различных сочетаниях и, как следствие этого, внесение в прогноз элемента субъективизма, который практически невозможно проконтролировать. В противоположность этому применение формального метода прогнозного выделения зон с различной магнитудой ожидаемых землетрясений позволяет резко повысить точность проведения контуров итоговых карт, их детальность и надежность, а также легко контролировать результат, выраженный в количественной форме. По глубокому убеждению автора, применение формальной методики позволяет в настоящее время получать результаты на принципиально ином по качеству уровню по сравнению с любой модификацией традиционной. Проведенная в работе прямая и косвенная проверка метода на примере ряда регионов полностью подтвердила это положение.

Вместе с тем формальный метод отнюдь не лишен недостатков. При его разработке оказалось необходимым ввести некоторые допущения, снижающие «чистоту» метода и, соответственно, возможности его использования. Тем не менее, имеются реальные возможности совершенствования формального метода.

В первую очередь оно связано с улучшением качества исход-

ной сейсмологической информации в пределах эталонных регионов. Такие возможности открываются после выхода в свет нового каталога [93], уточнившего наши знания о пространственном распределении землетрясений с различной магнитудой. Вместе с тем только теперь стало возможным привлечь к сеймотектоническому анализу сведения об очагах землетрясений вместо представления об их эпицентрах, а также данные о распределении их по глубине. Наконец, совершенствование методики может заключаться в привлечении к анализу геологических признаков, которые не были использованы в настоящей работе. Из их числа следует отметить в первую очередь данные по плейстоцен-голоценовой тектонике, современным тектоническим движениям, типу тектонических деформаций в зонах разрывных нарушений и некоторые другие.

Автору представляется, что намеченные пути дальнейшего совершенствования и сближения традиционного и формального методов анализа геологических данных для прогнозного выделения зон возникновения землетрясений с различной магнитудой, использование этих методов для выделения сейсмоопасных районов в различных по истории геологического развития регионах — единственная реально существующая в настоящее время возможность повышения качества нормативных карт сейсмического районирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Методика* составления карты сейсмического районирования на примере Кавказа / И. В. Ананьин, В. И. Бунэ, Н. А. Введенская и др. М., 1969.
2. *Артемьев М. Е.* Изостатические аномалии силы тяжести и некоторые вопросы их геологического использования. М., Наука, 1966.
3. *Артемьев М. Е., Бунэ В. И., Камбаров Н. Ш.* Использование данных о нарушениях изостатического равновесия для выделения сейсмоопасных зон Крымско-Кавказского региона. — Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1972, № 11, с. 8—26.
4. *Артемьев М. Е., Камбаров Н. Ш., Дасымов А.* Изостатическое состояние южных районов СССР. — В кн.: Изостазия. М., 1973, с. 67—75.
5. *Белоусов В. В.* К вопросу о методах сейсмического районирования. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1954, № 3, с. 209—222.
6. *Белоусов В. В., Гзовский М. В.* Тектонические условия и механизм возникновения землетрясений. — Труды геофиз. ин-та АН СССР, 1954, № 25, с. 25—35.
7. *Белоусов В. В., Кириллова И. В., Сорский А. А.* Краткий обзор сейсмичности Кавказа и сопоставление его с тектоническим строением. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1952, № 5, с. 3—9.
8. *Белоусов В. В., Гориков Г. П., Петрушевский Б. А.* По поводу статьи И. Е. Губина «О сейсмическом районировании юго-западной Туркмении». — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1954, № 5, с. 443—450.
9. *Белоусов В. В., Сорский А. А., Бунэ В. И.* Сейсмотектоническая карта Европы. М., Наука, 1968.
10. *Определение* зон повышенной сейсмической опасности по геологическим данным / В. В. Белоусов, Б. А. Борисов, И. В. Кириллова и др. — В кн.: Предвестники землетрясений. М., 1973, с. 6—18.
11. *Белоусов Т. П.* Тектонические движения Памира в плейстоцене — голоцене и сейсмичность. М., Наука, 1976.
12. *Землетрясение* в северных цепях Тянь-Шаня 22 декабря 1910 г. (4 января 1911 г.) / К. И. Богданович, И. М. Карк, Б. Я. Корольков, Д. И. Мушкетов. — Труды Геол. ком-та. Нов. сер., 1914, вып. 89, с. 329—419.
13. *Борисов А. А.* Определение пороговых условий высокой сейсмоопасности путем формализованного анализа геофизических данных. — Геофиз. сборник, 1976, вып. 71, с. 19—28.
14. *Борисов А. А., Шенкарева Г. А.* Сейсмолого-геофизическая характеристика Кавказа и запада Средней Азии. — Бюлл. МОИП. Отд. геол., 1972, т. 47, № 6, с. 5—16.
15. *Борисов Б. А.* Методические вопросы выделения сейсмоопасных зон по геологическим данным (на примере Кавказа). [Дисс. на соиск. у. степени канд. геол.-мин. наук]. М., 1974.
16. *Борисов Б. А., Рейснер Г. И.* Выделение сейсмоопасных зон по геологическим данным. — Вестн. АН СССР, 1973, № 8, с. 61—64.
17. *Борисов Б. А., Рейснер Г. И.* О сейсмотектоническом каталоге землетрясений Кавказа. — Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1974, № 9, с. 11—18.
18. *Борисов Б. А., Рейснер Г. И.* О районировании территории Крыма по

максимальной магнитуде землетрясений. — Геофиз. сборник, 1975, вып. 67, с. 68—74.

19. *Борисов Б. А., Рейснер Г. И.* Сейсмотектонический прогноз максимальной магнитуды землетрясений Карпатского региона. — Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1976, № 5, с. 21—31.

20. *Борисов Б. А., Рейснер Г. И.* Оценка максимальной магнитуды ожидаемых землетрясений по геологическим данным. — В кн.: Сейсмическое микрорайонирование. М., 1977, с. 36—41.

21. *Борисов Б. А., Рейснер Г. И., Шолпо В. Н.* Выделение сейсмоопасных зон в альпийской складчатой области. М., Наука, 1975.

22. *Борисов Б. А., Рейснер Г. И., Шолпо В. Н.* Геотектонический метод прогнозирования максимальной магнитуды землетрясений применительно к Северная Италия. — ДАН СССР, 1976, т. 231, № 6, с. 1323—1326.

23. *Борисов Б. А., Рейснер Г. И., Шолпо В. Н.* Выделение сейсмоопасных зон по геологическим данным на территории Чехословакии, Венгрии и Румынии. — В кн.: Поиски предвестников землетрясений. Международный симпозиум 27 мая — 3 июня 1974 г. Ташкент, 1976, с. 88—92.

24. *Опыт оценки максимальной сейсмической опасности на примере Кавказа / В. И. Бунэ, И. В. Кириллова, И. В. Ананьин и др.* — Вопр. инж. сейсмологии, 1971, вып. 14, с. 3—29.

25. *Бунэ В. И., Артемьев М. Е., Камбаров Н. Ш.* О связи сейсмичности с характеристиками гравитационного поля на Восточном Кавказе. — ДАН СССР, 1971, т. 197, № 6, с. 1305—1307.

26. *О методе выявления связи магнитуды землетрясений с тектоническими параметрами района / В. И. Бунэ, И. Т. Турбович, Б. А. Борисов и др.* — ДАН СССР, 1974а, т. 214, № 3, с. 553—556.

27. *Карта возможных максимальных сотрясений юга Европейской части СССР / В. И. Бунэ, И. В. Кириллова, И. В. Ананьин и др.* — Вопр. инж. сейсмологии, 1974, вып. 16, с. 78—103.

28. *Метод прогнозирования максимальной магнитуды землетрясений / В. И. Бунэ, И. Т. Турбович, Б. А. Борисов и др.* — Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1975, № 10, с. 31—43.

29. *Применение метода нелинейных преобразований для выделения зон с различными максимальными магнитудами землетрясений в Крымско-Кавказском регионе / В. И. Бунэ, И. Т. Турбович, Б. А. Борисов и др.* — Вопр. инж. сейсмологии, 1975, вып. 17, с. 124—136.

30. *Введенская Н. А., Растворова В. А.* Новейшая структура и сейсмичность Большого Кавказа. — В кн.: Сейсмотектоника альпийского складчатого пояса юга СССР и некоторых сопредельных районов. М., 1974, с. 6—19.

31. *Гамбурцев Г. А.* Состояние и перспективы работ в области прогноза землетрясений. — В кн.: Бюлл. Совета по сейсмологии. № 1. М., 1955, с. 7—14.

32. *О критериях высокой сейсмичности / И. М. Гельфанд, Ш. А. Губерман, М. А. Извекова и др.* — ДАН СССР, 1972, т. 202, № 6, с. 1317—1320.

33. *Гзовский М. В.* Тектонофизическое обоснование геологических критериев сейсмичности. Ч. I и II. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1957, № 2, с. 141—160; № 3, с. 273—283.

34. *Гзовский М. В.* Использование новейших и современных тектонических движений при сейсмическом районировании нового типа. — В кн.: Современные движения земной коры. № 1. М., 1963, с. 149—178.

35. *Гзовский М. В.* Градиент скорости новейших тектонических движений и его тектонофизическая интерпретация. — В кн.: Проблемы неотектоники. М., 1964, с. 9.
36. *Гзовский М. В.* Основы тектонофизики. М., Наука, 1975.
37. *Гзовский М. В., Никонов А. А.* Количественные характеристики современных и молодых тектонических движений в областях с разным тектоническим режимом и сейсмичностью. — Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1968, № 10, с. 17—83.
38. *Гзовский М. В., Никонов А. А.* Сопоставление количественных характеристик современных и молодых тектонических движений в областях с разным тектоническим режимом и сейсмичностью. — В кн.: Проблемы современных движений земной коры. М., 1969, с. 405—412.
39. *Сопоставление тектоники с сейсмичностью Гармского района Таджикской ССР / М. В. Гзовский, В. Н. Крестников, И. Л. Нерсесов, Г. И. Рейснер.* — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1958, № 8, с. 959—976.
40. *Гзовский М. В., Крестников В. Н., Рейснер Г. И.* Геологические методы количественной характеристики среднего градиента скорости вертикальных тектонических движений (изменений наклона) земной коры и некоторые результаты их применения. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1959, № 8, с. 1147—1156.
41. *Новые принципы сейсмического районирования на примере центральной части Тянь-Шаня / М. В. Гзовский, В. Н. Крестников, И. Л. Нерсесов, Г. И. Рейснер.* — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1960, № 2, с. 77—94; № 3, с. 353—370.
42. *Карта новейших тектонических движений Средней Азии / М. В. Гзовский, В. Н. Крестников, Н. Н. Леонов и др.* — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1960, № 3, с. 1168—1172.
43. *Гигис В. Г., Турбович И. Т., Юрков Е. Ф.* Нелинейные одномерные преобразования в задачах опознавания объекта и прогноза. — В кн.: Проблемы избыточности в информационных системах. Ч.1. Л., 1972, с. 21—23.
44. *Горшков Г. П.* О сейсмическом районировании Средней Азии. — Труды Сейсмол. ин-та АН СССР, 1938, № 79(6), с. 67—71.
45. *Горшков Г. П.* О новой карте сейсмического районирования СССР. — Труды Геофиз. ин-та АН СССР, 1948, № 1 (128), с. 71—73.
46. *Горшков Г. П.* Вопросы сеймотектоники и сейсмическое районирование Китайской Народной Республики. М., 1960 (Бюлл. Совета по сейсмологии, № 7).
47. *Горшков Г. П.* Вопросы сеймотектоники и сейсмическое районирование Бирманского Союза. М., 1961 (Бюлл. Совета по сейсмологии, № 12).
48. *Горячев А. В.* Мезозойско-кайнозойская структура, история тектонического развития и сейсмичность района озера Иссык-Куль. М., Изд-во АН СССР, 1959.
49. *Горячев А. В.* Основные закономерности тектонического развития Курило-Камчатской зоны. М., Наука, 1966.
50. *Губин И. Е.* Сеймотектонический метод сейсмического районирования. М., 1950 (Труды Геофиз. ин-та АН СССР, № 13 (140)).
51. *Губин И. Е.* О некоторых вопросах сейсмического районирования — Тр. Геофиз. ин-та АН СССР, 1954, № 25 (152), с. 36—73.
52. *Губин И. Е.* Закономерности сейсмических проявлений на территории Таджикистана. М., Изд-во АН СССР, 1960.

53. Губин И. Е. О прогнозе землетрясений. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1964, № 9, с. 1292—1299.

54. Губин И. Е. Многоэлементные карты сейсмического районирования. — Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1966, № 7, с. 11—19.

55. Губин И. Е. О картах сейсмического районирования с сейсмогенными (очаговыми) зонами. — В кн.: Сейсмоструктура некоторых районов юга СССР. М., Наука, 1976, с. 6—25.

56. Кириллова И. В. О периодичности разрушительных землетрясений Кавказа и Турции. — ДАН СССР, 1957, т. 115, № 4, с. 771—773.

57. Кириллова И. В. О сейсмических условиях Закавказья, Турции и Ирана. — Бюлл. Совета по сейсмологии, 1960, № 8, с. 125—130.

58. Кириллова И. В. О поперечной дифференциации современных тектонических движений в зоне южного склона Восточного Кавказа. — Бюлл. МОИП. Отд. геол., 1961, т. 36, № 1, с. 24—39.

59. Кириллова И. В., Сорский А. А. О методике составления карты сейсмического районирования масштаба 1 : 1 000 000 на примере Кавказа. — Бюлл. Совета по сейсмологии, 1960, № 8, с. 121—124.

60. Анализ геотектонического развития и сейсмичности Кавказа/ И. В. Кириллова, Е. Н. Люстих, В. А. Растворова и др. М., Изд-во АН СССР, 1960.

61. Кленов В. И. Плейстоценовая тектоника Западного Саяна и Западной Тувы. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1966, № 6, с. 50—54.

62. Комплексные исследования Черноморской впадины. М., Наука, 1970.

63. Крестников В. Н. О связи геологических и сейсмических явлений Тянь-Шаня. — Бюлл. Совета по сейсмологии, 1957, № 3, с. 81—94.

64. Крестников В. Н. История развития колебательных движений земной коры Памира и сопредельных частей Азии. М., Изд-во АН СССР, 1962.

65. Крестников В. Н., Рейснер Г. И. Нарыно-Чичканская поперечная зона глубинного разлома Западного Тянь-Шаня. — Изв. АН СССР. Сер. геол., № 10, 1966, с. 78—90.

66. Крестников В. Н., Рейснер Г. И., Горбунова И. В. Восточный Казахстан. — В кн.: Сейсмическое районирование СССР. М., 1967, с. 331—342.

67. Леонов Н. Н. Тектоника и сейсмичность Памиро-Алайской зоны. М., Изд-во АН СССР, 1961.

68. Карта современных вертикальных движений и морфоструктур Кавказа. — В кн.: Проблемы современных движений земной коры. М., Изд-во АН СССР, 1969, с. 142—155.

69. Масарский С. И., Моисеенко Ф. С. О сейсмичности Алтая. — Геология и геофизика, 1962, № 8, с. 104—106.

70. Масарский С. И., Рейснер Г. И. Новейшие тектонические движения и сейсмичность Западного Саяна и Западной Тувы. М., Наука, 1971.

71. Масарский С. И., Моисеенко Ф. С., Семакин В. П. Алтае-Саянская область. — В кн.: Сейсмическое районирование СССР. М., 1968, с. 343—357.

72. Матцова В. А. Карта скоростей современных вертикальных движений земной коры Кавказа и Юго-Востока Приазовья. — В кн.: Современные движения земной коры. № 3. М., 1968, с. 244—264.

73. Медведев С. В. Карта сейсмического районирования территории СССР (1957 г.). — Труды Ин-та физики Земли АН СССР, 1958, № 1 (163), с. 3—28.

74. Инструкция по сейсмическому районированию /С. В. Медведев, В. И. Бунз, Н. А. Введенская и др. — Труды Ин-та физики Земли АН СССР, 1961, № 17(184), с. 128—145.

75. Методические рекомендации по сейсмическому районированию территории СССР. М., Изд-во АН СССР, 1974.

76. Милановский Е. Е. Новейшая тектоника Кавказа. М., Недра, 1968.

77. Мушкетов Д. И. Ближайшие задачи сейсмогеологических исследований. — Труды Сейсмол. ин-та, 1931, № 16.

78. Мушкетов Д. И. Опыт сейсмического районирования в СССР. — Труды Сейсмол. ин-та, 1933, № 33, вып. 1.

79. Мушкетов Д. И., Сейсмическое районирование Средней Азии. — Труды Сейсмол. ин-та, 1933, № 34, вып. 2, с. 1—26.

80. Мушкетов И. В. Землетрясение 28 мая 1887 г. в г. Верном. — Изв. Русского геогр. об-ва, 1888, т. 24, вып. 2.

81. Николаев Н. И. Неотектоника и ее выражение в структуре и рельефе СССР. М., Госгеолтехиздат, 1962.

82. Николаев Н. И. О применении исторического, археологического и палеосейсмогеологического методов при изучении истории проявления землетрясений. — В кн.: Влияние инж. деятельности на сейсмический режим. М., 1977, с. 165—183.

83. Николаев Н. И., Николаев П. Н. Методические аспекты прогноза возбужденной сейсмичности, связанной с заполнением крупных водохранилищ. — В кн.: Влияние инж. деятельности на сейсмический режим. М., 1977, с. 99—112.

84. Николаев Н. Н., Николаев П. Н. Новые принципы вероятностей сейсмического районирования. — В кн.: Влияние инж. деятельности на сейсмический режим. М., 1977, с. 153—164.

85. Николаев Н. И., Шульц С. С. Карта новейшей тектоники СССР. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1961, № 4, с. 25—32.

86. Николаев Н. И., Николаев П. Н., Сидоров И. С. Карта градиентов скорости новейших тектонических движений и ее физическая интерпретация. — Вестн. МГУ. Сер. геол., 1968, № 6, с. 72—81.

87. Николаев П. Н. О связи истории тектонического развития и сейсмической активности. — Вестн. МГУ. Сер. геол., 1969, № 5. с. 110—116.

88. Николаев П. Н. Деформационная неоднородность земной коры как геологический критерий сейсмичности. — В кн.: Земная кора сейсмоопасных зон. М., 1973, с. 104—114.

89. Николаев П. Н. Некоторые вопросы геомеханики. — В кн.: Геофизические поля и сейсмичность. М., 1975, с. 156—164.

90. Николаев П. Н. О применении корреляционного метода в сейсмотектонике и прогноз землетрясений максимальной силы. — В кн.: Влияние инж. деятельности на сейсмический режим. М., 1977, с. 113—127.

91. Николаев П. Н. Количественная оценка достоверности и значимости геологических критериев сейсмичности. — Новейшая тектоника, новейшие отложения и человек, 1977, вып. 7, с. 112—117.

92. Никонов А. А. Голоценовые и современные движения земной коры. М., Наука, 1977.

93. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР, М., Наука, 1977.

94. *Островский А. Б.* Палеосеймотектонические дислокации на Черноморском побережье Северо-Западного Кавказа в связи с оценкой современной сейсмичности этой территории. — В кн.: Комплексные исследования Черноморской впадины. М., 1970, с. 46—58.
95. *Петрушевский Б. А.* Урало-Сибирская эпигерцинская платформа и Тянь-Шань. М., Изд-во АН СССР, 1955.
96. *Петрушевский Б. А.* О некоторых текущих задачах сейсмогеологии. — Бюлл. МОИП. Отд. геол., 1957, т. 32, № 5, с. 99—125.
97. *Петрушевский Б. А.* К исследованиям сейсмичности Китайской Народной Республики. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1959, № 12, с. 1729—1738.
98. *Петрушевский Б. А.* Геологические условия возникновения землетрясений. — Советская геология, 1960, № 2, с. 74—82.
99. *Петрушевский Б. А.* К сейсмогеологической характеристике горных сооружений Южной Сибири и Северной Монголии. — Бюлл. Совета по сейсмол., 1960, № 10, с. 108—120.
100. *Петрушевский Б. А.* О связи между землетрясениями максимальной силы и геологической обстановкой. — Бюлл. Совета по сейсмол., № 8, 1960, с. 28—35.
101. *Петрушевский Б. А.* Новейшие тектонические движения континентальной Азии и сейсмогеологическая обстановка областей их проявления. — В кн.: Активизированные зоны земной коры. М., 1964, с. 45—57.
102. *Петрушевский Б. А.* О новых направлениях в сейсмогеологии в связи с сейсмическим районированием. — Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1967, т. 12, № 5, с. 60—73.
103. *Петрушевский Б. А.* Землетрясения и тектоника. — Бюлл. МОИП. Отд. геол., 1969, т. 44, № 1, с. 17—22.
104. *Петрушевский Б. А.* Некоторые уроки Кызылкумских землетрясений. — Бюлл. МОИП. Отд. геол., 1977, т. 52, № 1, с. 33—55.
105. *Ранцман Е. Я.* Геоморфология и сейсмичность долины р. Сурхоб. — ДАН СССР, 1959, т. 124, № 1, с. 171—174.
106. *Ранцман Е. Я.* Некоторые вопросы геоморфологии Гармского района Таджикистана в связи с его сейсмичностью. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1960, № 5, с. 82—87.
107. *Растворова В. А.* О некоторых связях новейших движений и сейсмической активности Кавказа. — ДАН СССР, 1960, т. 133, № 5, с. 1179—1182.
108. *Растворова В. А.* Формирование рельефа гор. М., Наука, 1973.
109. *Растворова В. А., Нерсесов И. Л.* Варташенское землетрясение 1953 г. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1955, № 1, с. 86—88.
110. *Растворова В. А., Рустанович Д. Н.* Сейсмичность и новейшая тектоника Краснополянского района. — Бюлл. Совета по сейсмол., № 8, 1960, с. 110—115.
111. *Резанов И. А.* Тектоника и сейсмичность Туркмено-Хорасанских гор. М., Изд-во АН СССР, 1959.
112. *Резанов И. А.* Вопросы новейшей тектоники Северо-Востока СССР. М., Наука, 1964.
113. *Резанов И. А., Зарудный Н. Н.* История колебательных тектонических движений Северо-Востока СССР. М., Изд-во АН СССР, 1962.
114. *Резанов И. А., Растворова В. А., Леонов Н. Н.* Опыт детального

сейсмического районирования на примере одного из районов Западной Туркмении. — Бюлл. Совета по сейсмол., 1960, № 8.

115. *Резвой Д. П.* Об одном из способов изображения результатов новейших тектонических движений. — Уч. зап. Львовского гос. ун-та, 1953, т. 23, сер. геол., вып. 6, с. 305—308.

116. *Рейснер Г. И.* Построение карт градиентов скорости вертикальных тектонических движений земной коры на примере Северного Тянь-Шаня. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1960, № 9, с. 1316—1320.

117. *Рейснер Г. И.* О тектонике и сейсмичности Горного Алтая. — Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, № 5, 1971, с. 18—31.

118. *Рейснер Г. И.* О классификации новейших прогибов Горного Алтая. — Бюлл. МОИП. Отд. геол., 1971, т. 16, № 3, с. 57—73.

119. *Рейснер Г. И.* Ранние стадии развития рельефа Юго-Восточного Алтая. — Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1971, № 1, с. 93—99.

120. *Рейснер Г. И.* Об исходных геологических данных для целей сейсмического районирования. — Изв. АН Арм. ССР. Науки о Земле, 1972, т. 25, № 4, с. 17—23.

121. *Ризниченко Ю. В.* О возможностях расчета максимальных землетрясений. — Труды Ин-та Физики Земли АН СССР, 1962, вып. 25, с. 5—15.

122. *Ризниченко Ю. В.* О связи между энергией максимальных землетрясений и сейсмической активностью. — Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1964, № 7, с. 1352—1354.

123. *Ризниченко Ю. В.* Сейсмическая активность и энергия максимальных землетрясений. — В кн.: Проблемы геофизики Средней Азии и Казахстана. М., 1967, с. 36—51.

124. *Ризниченко Ю. В.* Геолого-геофизические данные при решении проблемы сейсмической опасности. — В кн.: Мат-лы конф. по изучению сейсмичности и глубинного строения Азербайджана. Баку, 1974, с. 3—19.

125. *Ризниченко Ю. В., Джибладзе Э. А.* Определение максимально возможных землетрясений по комплексным данным для Кавказа. — Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1974, № 5, с. 64—85.

126. *Сейсмичность и сотрясаемость Карпато-Балканского региона* /Ю. В. Ризниченко, А. В. Друмя, Н. Я. Степаненко и др. — Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1973, № 10, с. 23—41.

127. *Рихтер Ч. Ф.* Элементарная сейсмология. М., Изд-во иностр. лит., 1963.

128. *Рудич Е. М.* Основные закономерности развития Приморья, Сахалина и Японии как зоны перехода от континента к океану. М., Изд-во АН СССР, 1962.

129. *Русанов А. Б., Яброва Л. А.* Структурные оползни горных стран (на примере Кавказа). — Бюлл. МОИП. Отд. геол., 1973, т. 18, с. 122—126.

130. *Сейсмическое районирование СССР.* М., Наука, 1968.

131. *Сеймотектоника альпийского складчатого пояса юга СССР и некоторых сопредельных территорий.* М., Советское радио, 1974.

132. *Сеймотектоника некоторых районов юга СССР.* М., Наука, 1976.

133. *Солоненко В. П.* Сейсмическое районирование Восточной Сибири. Иркутск, Изд-во СО АН СССР, 1963.

134. *Солоненко В. П.* Палеосейсмогеология. — Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1973, № 9, с. 3—16.

135. Солоненко В. П., Хромовских В. С. Мощное землетрясение Большого Кавказа. — Природа, 1974, № 6, с. 35—47.
136. Солоненко В. П., Тресков А. А., Флоренсов Н. А. Сейсмическое районирование Восточной Сибири. — Геол. и геофиз., 1960, № 10, с. 104—114.
137. Сорский А. А. О сейсмичности района Шемахи в Закавказье. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1955, № 1, с. 35—44.
138. Тектоника Европы. Объяснительная записка к Международной тектонической карте Европы. М., Недра, 1964.
139. Труды 10 Генеральной Ассамблеи Европейской сейсмологической комиссии. Т. 2. М., Изд-во АН СССР, 1970.
140. Турбович И. Т., Гитис В. Г., Маслов В. К. Опознавание образов. М., Наука, 1971.
141. Флоренсов Н. А., Тресков А. А., Солоненко В. П. О статье М. В. Гзовского «Использование новейших и современных тектонических движений при детальном сейсмическом районировании Нового типа». — Геология и геофизика, 1964, № 8, с. 101—102.
142. Хромовских В. С. Сейсмология Южного Прибайкалья. М., Наука, 1965.
143. Сейсмодислокации Западного Кавказа и их значение для сейсмического районирования /В. С. Хромовских, В. П. Солоненко, В. М. Жилкин и др. — В кн.: Сейсмогенные структуры и сейсмодислокации. М., 1973, с. 12—15.
144. Цхакая А. Д., Махатадзе Л. Н., Табидзе Д. Д. Чхалтинское землетрясение. Тбилиси, Мецниереба, 1967.
145. Шебалин Н. В.* О предельной магнитуде и предельной бальности землетрясений. — Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1971, № 6, с. 12—20.
146. Шенкарева Г. А. Сейсмичность Апеннинского полуострова и прилегающих островов. М., Наука, 1973.
147. Шолпо В. Н. Альпийская геодинамика Большого Кавказа. М., Недра, 1978.
148. Юрков Е. Ф. Одномерные нелинейные преобразования в опознавании образов и прогнозировании. [Автореф. канд. дисс.]. М., 1973.
149. Allen C. R., St. Amand P., Richter C. F., Nordquist J. M., 1965. Relation ship between seismicity and geologic structure in the Southern California region. Bull. Seismol. Soc. America, v. 55, N 4, p. 753—797.
150. Borissoff B. A., Reisner G. I., Sholpo V. N., 1976. Tectonics and maximum magnitudes of earthquakes. Tectonophysics, v. 33, p. 167—185.
151. Borissoff B. A., Reisner G. I., Sholpo V. N., 1977. A geotectonic method of predicting the maximum magnitudes of expected earthquakes as applied to the Northern Italy area. Bolletino di Geofisica teorica ed applicata, N. 73—74, p. 19—26.
152. Borissoff B. A., Reisner G. I., Sholpo V. N., 1978. The geological basis for the analysis of seismic risk. Proceedings of the Symposium on the analysis seismicity and on Seismic Risk (Liblice, 17—22 October 1977) Czechoslovak Academy of Sciences, Geophysical Institute, Academia, Prague, p. 59—67.
153. De Bruyn J. W., 1955. Isogram maps of Europe and North Africa. Geophys. Prospect, v. 3, N 1, p. 1—14.
154. Drumea A. V., Reisner G. I., Shebalin N. V., Sholpo V. N., Stepanenko N. J., 1975. Maps of seismic origin zones and maps of maximum expected intensity. Balcan Region, UNESCO, Scopje, 1975.

155. *Fomin G. N.*, 1976. Scientific Fundamentals and Ways of Realization of General Scheme of Population Distribution in the USSR. Geoforum, v. 7, p. 259—269.

156. *Gelfand I. M., Guberman Sh. I., Izvekova M. L., Keilis—Borok V. I., Ranzman E. Y.*, 1972. Criteria of high seismicity determined by pattern recognition. Tectonophysics, v. 3. p. 415—422.

157. *Karnik V.*, 1971. Seismicity of the European Area, pr. 2, Academia, Prahae.

158. *Mahel M.*, (editor in chief), 1973. Tectonic map of the Carpathian—Balkan mountain system and adjacent areas, scale 1:1 000 000. Dr. Stur Geol. Inst., Bratislava and UNESCO, Paris.

159. *Malaroda R., Raimondi C.*, 1957. Linee dislocazione e seismicita in Italia. Bolletino geod. e sci. affini, v. 16, N 3. p. 272—323.

160. *Proceedings of the Seminar on the Seismotectonic map of the Balkan Region*, Dubrovnik, 17—26 April, 1973, 1974. UNESCO, Skopje.

161. *Reisner G. I.*, 1976. Geological data and seismic zoning. Proceedings of the Seminar on seismic zoning maps, Skopje, 27 October—4 November, 1975, v. 1, UNESCO, Skopje, p. 11—40.

162. *Reisner G. I., Sholpo V. N.*, 1975. Distinguishing zones of Seismic Risk According to Geological Data in the Territories of Czechoslovakia, Hungary and Romania. Veroff. Zentr. Inst. Phys. d. Erde, N 31, teil 2, p. 133—141.

163. *Shebalin N. V.*, 1974. Balkan Region—principles and practice of Cataloguing. Catalogue of earthquakes, UNESCO, Skopje.

164. *Shebalin N. V., Reisner G. I., Drumea A. V., Aptekman J. Y., Sholpo V. N., Stepanenko N. J., Zasharova A. I.*, 1976. Earthquake origin zones and distribution of maximum expected seismic intensity for the Balkan Region. Proceedings of the Seminar on seismic zoning maps, Skopje, 27 October—4 November, 1975. V. 11, UNESCO, Skopje, p. 68—171.

165. *Sjkošek B.*, 1976. Der tektonische werdegang eines Teiles des innerdinaren Grenzgebietes. Nova Acta Leopoldina, Neue Folge, N 224, B. 45, p. 10—31.

166. *Skoko D., Arsovski M., Hadzievski D.*, 1976. Determination of possible earthquake origin zones on the territory of Yugoslavia. Proceedings of the Seminar of seismic zoning maps, Skopje, 27 October—4 November, 1975, v. 1, UNESCO, Skopje, p. 116—131.

167. *Structural model of Italy*, scale 1:1 000 000, 1973. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma.

О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.	
Предисловие	4	
Глава I. Обзор методов выделения сейсмоопасных зон в СССР с использованием геологических данных	10	
Глава II. Исходные геологические данные и геологические критерии сейсмичности	28	
1. Исходные геологические данные	28	
2. Геологические критерии сейсмичности	33	
Глава III. Традиционные геологические методы прогнозирования сейсмической опасности	39	
1. Выделение зон возникновения землетрясений на территории Кавказа	40	✓
2. Выделение зон возникновения землетрясений на территории Балканского региона	66	
3. Обсуждение результатов	85	
Глава IV. Формальный геологический метод прогнозирования сейсмической опасности	92	
1. О сейсмотектоническом каталоге землетрясений	92	
2. Принципы установления экспертных оценок максимальной магнитуды для эталонных ячеек	101	
3. Изучение информативности геологических характеристик и отбор параметров геологического описания эталонных ячеек	109	
4. Решение экспериментальной задачи	117	
5. Прогнозирование зон возникновения землетрясений с различной магнитудой на основе формального метода в пределах эталонного региона (Кавказ)	122	
6. Косвенная проверка формального метода (выделение зон возникновения землетрясений с различной магнитудой в других регионах области альпийской складчатости)	132	
Прогнозирование зон возникновения землетрясений с различной магнитудой в пределах Крыма	132	
Прогнозирование зон возникновения землетрясений с различной магнитудой в пределах Карпатского региона	135	
Прогнозирование зон возникновения землетрясений с различной магнитудой в пределах Альп	146	
7. Обсуждение результатов	150	
Заключение	160	
Список литературы	164	

Георгий Игоревич Рейснер

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ
СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

Обложка художника *О. Е. Осташевой*
Художественный редактор *Е. Л. Юрковская*
Корректор *Е. В. Наумова*
ИБ № 3955

Сдано в набор 09.06.80	Подписано в печать 28.10.80	Г-17182
Формат 60×90 ^{1/16}	Бумага типографская № 2 Гарнитура «Литературная»	Печать высокая
Усл. печ. л. 11,0	Уч.-изд. л. 12,05	Тираж 2000 экз.
Заказ 388/8118-2	Цена 60 коп.	

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19
Подольский филиал ПО «Периодика» Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли

г. Подольск, ул. Кирова, д. 25

Уважаемый товарищ!
В издательстве «Недра»
готовятся к печати новые книги

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ исследования при гидротехническом строительстве / Дзеваньский Я., Комаров И. С., Молоков Л. А., Рейтер Р. 25 л. 1 р. 70 к.

Обобщен опыт инженерно-геологических исследований, выполненных в СССР, ПНР и ГДР, при гидротехническом строительстве. Рассмотрены вопросы, связанные с оценкой условий строительства и учетом различных геологических факторов. Приведены примеры из практики гидротехнического строительства в СССР, ПНР и ГДР. Рассмотрены вопросы взаимодействия сооружений и массивов горных пород и геологические прогнозы, проблемы влияния гидротехнического строительства на окружающую среду. Описана методика геологических исследований. Даны рекомендации по вопросам накопления и обработки информации с использованием ЭВМ, по составлению отчетных материалов.

Для инженеров-геологов и других специалистов по изысканиям, проектированию и строительству гидротехнических сооружений.

ЛОМНИЦ С., РОЗЕНБЛЮТ Е. Сейсмический риск и инженерные решения: Пер. с англ. 40 л. Пер. изд.: Нидерланды, 1976. 2 р. 90 к.

В составлении монографии кроме основных авторов принимали участие специалисты США и Мексики.

Рассмотрены различные модели землетрясений, основанные на представлениях плитовой тектоники. Описаны теоретические положения плитовой тектоники, создающие наиболее надежную основу для объяснения закономерностей распределения землетрясений на земном шаре и их концентрации в отдельных зонах. Приведены инженерные решения в зависимости от количественной оценки сейсмичности территорий. Изложены задачи определения общего сейсмического риска и пути ее решения на базе стохастических моделей. Приведена характеристика применяемой аппаратуры.

Для специалистов, связанных с проблемами сейсмологии, а также со строительством сооружений в сеймоопасных районах.

ПАШКИН Е. М. Инженерно-геологические исследования при строительстве туннелей. 10 л. 55 к.

Приведены результаты исследований, проведенных автором в последние 15 лет в районах Средней Азии, Крыма, Кавказа и Дальнего Востока. Рассмотрены сложные геосистемы пород с определяющими их свойствами структурными связями и инженерно-геологические особенности массивов горных пород горноскладчатых областей; охарактеризована роль тектонической структуры в формировании инженерно-геологических условий — влияние трещинной

тектоники, разрывных нарушений, складчатых деформаций, обводненность горных пород, регулирующие критерии устойчивости. Описаны формы нарушения устойчивости горных пород при сооружении туннелей, условия образования вывалов. Даны рекомендации по прогнозированию устойчивости и предупреждению вывалов.

Для геологов, работающих в области инженерно-геологических исследований при строительстве гидротехнических и транспортных туннелей.

ПОНОМАРЕВ В. В. Рентгеноструктурные методы исследования в инженерной геологии. 15 л. 80 к.

Рассмотрены рентгеноструктурный анализ поликристаллов, аппаратура, используемая для исследования пород, а также применение математических методов и ЭВМ для обработки рентгеновских данных. Анализируется влияние микротекстуры на деформационное поведение пород, изменение микротекстуры под действием различных факторов. Показаны перспективы использования рентгеновских методов в инженерно-геологических исследованиях, для изучения динамики промерзания грунтов и т. д.

Для геологов, инженеров-геологов и других специалистов, изучающих природу прочности пород и механизмы формирования их свойств.

Интересующие Вас книги Вы можете приобрести в местных книжных магазинах, распространяющих научно-техническую литературу, или заказать через отдел «Книга-почтой» магазинов «Недра»:

№ 17—199178, Ленинград, В. О., Средний проспект, 61;

№ 59—127412, Москва, Коровинское шоссе. 20

Издательство «Недра»

60 кол.

72-87-09 цршз.

34-27-50

рб, см?

393

НЕДРА