

КАРАПЕТЯН Б. К.
КАРАПЕТЯН Н. К.

**ПРЕДПОСЫЛКИ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
И СЕЙСМОСТОЙКОЕ
СТРОИТЕЛЬСТВО
В АРМЯНСКОЙ ССР**



КАРАПЕТЯН Б. К., КАРАПЕТЯН Н. К.

7806

**ПРЕДПОСЫЛКИ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И
СЕЙСМОСТОЙКОЕ
СТРОИТЕЛЬСТВО
В АРМЯНСКОЙ ССР**

Отв. ред. академик АН Арм. ССР
А. Г. Назаров.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЛИАСТАН»
ЕРЕВАН — 1981

6С4.013. Индекс ББК 38.2

К 213

Рецензия: заведующего Азербайджанской лабораторией сейсмостойкого строительства Центрального научно-исследовательского института строительных конструкций Госстроя СССР, кандидата техн. наук, доцента Г. А. Алиева.

Карапетян Б. К., Карапетян Н. К.

К 213 Предпосылки землетрясений и сейсмостойкое строительство в Армянской ССР/ Под ред. А. Г. Назарова.— Ер.: Айастан, 1981.— 172 с., 38 ил.

В книге рассматриваются вопросы, связанные с изучением землетрясений, определением их интенсивности и других параметров, даются краткие сведения о сильных и разрушительных землетрясениях, происходящих на территории Армении и прилегающих областей, приводятся предвестники землетрясений и возможные пути предсказания их по месту, силе и времени, даются основы расчета и проектирования в сейсмических районах, описываются основные типы сейсмостойких зданий, возводимых в Армянской ССР.

Книга представляет интерес для сейсмологов, проектировщиков и строителей, осуществляющих строительство в сейсмических районах.

К $\frac{3205000000}{701 (01) 81}$ 68—80

6С4 013
ББК 38.2

ВВЕДЕНИЕ

В предложенной вниманию читателей книге авторы не ставили перед собой цели дать исчерпывающий ответ на все аспекты рассматриваемой проблемы как с точки зрения прогнозирования землетрясений, так и сейсмостойкого строительства. Задача их заключалась в том, чтобы ознакомить читателей с современным состоянием проблемы и заострить их внимание на наиболее важных вопросах, требующих правильного решения.

В результате рассмотрения приведенных в книге вопросов, связанных с прогнозированием землетрясений и сейсмостойкостью сооружений, читатель приходит к заключению, что состояние научных исследований в области геофизики, сейсмологии, инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства, а также строительство в сейсмических районах должны находиться на таком уровне, который мог бы обеспечить безопасность людей и сохранность материальных благ народа при сильных землетрясениях.

Это достигается путем глубокого изучения процессов, происходящих в недрах Земли, предшествующих сильному землетрясению, правильного осуществления сейсмического районирования и микрорайонирования с учетом влияющих на них основных факторов с целью достоверного установления места и силы возможного сильного землетрясения на территории СССР и, в частности, на территории Армянской ССР, выявления наиболее реальных предвестников землетрясений и создания научно обоснованной теории прогнозирования сильных землетрясений для точного предсказания времени их возникновения, разработки теории сейсмостойкости

и совершенствования строительных норм и правил для обеспечения сохранности зданий и сооружений.

Одним из наиболее важных аспектов изучения землетрясений является определение времени их возникновения. При положительном ответе на этот вопрос исключается такой важный и вместе с тем неприятный фактор, как неожиданность их возникновения. Предсказание землетрясений дает возможность эвакуировать население, но наряду с этим не исключает проблемы обеспечения сохранности зданий и сооружений и сохранения материальных ценностей.

При предсказании времени возникновения сильных землетрясений необходимо также установить место и силу их возникновения, то есть осуществлять прогнозирование сильных землетрясений в пространстве и во времени.

Для того, чтобы обеспечить сохранность зданий и сооружений при сильных землетрясениях, необходимо их проектировать и строить с учетом возможных сейсмических воздействий, интенсивностью в 7, 8, 9 и даже 10 баллов. Районы, подверженные воздействию таких землетрясений, занимают площадь около 3 млн. кв. км, или примерно 13% территории ССР с населением почти 20 млн. человек.

Таким образом, прогнозирование землетрясений и сейсмостойкое строительство являются двумя важными и взаимосвязанными направлениями одной общей проблемы — сохранения нормальной жизни людей и их имущества при сильных землетрясениях.

Территория Армянской ССР подвержена сильным и разрушительным землетрясениям, и поэтому рассматриваемая проблема для нашей республики также имеет очень важное значение.

В работе приводятся общие сведения о землетрясениях и их основные характеристики, дается краткое описание последствий сильных и разрушительных землетрясений, происшедших на территории Армении и прилегающих к ней областей, рассматриваются вопросы, связанные с изучением напряженного состояния в очагах землетрясений, механизмов их возникновения и сейсмического режима. Здесь же обсуждаются возможные пути поиска предвестников землетрясений по изменению отношения скоростей распространения продольных и поперечных сейсмических волн, временным флуктуациям

геофизических полей, современным деформациям и на-
клонам земной коры, нарушению геохимических и гид-
рогеологических процессов, поведению животных и не-
которым другим признакам; рассматриваются существ-
ующие пути предсказания землетрясений. В книге
даются основы расчета и проектирования в сейсмических
районах и приводятся некоторые типы сейсмостойких
зданий с несущими каменными стенами, каркаснопанель-
ные, крупнопанельные и возводимые методом подъема
этажей и перекрытий, которые проектируются и строят-
ся в Армянской ССР.

Авторы глубоко признательны академику АН Армян-
ской ССР А. Г. Назарову и кандидату технических наук
Г. А. Алиеву за ценные советы.

Глава 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ И ИХ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для того, чтобы перейти к рассмотрению вопросов, связанных с изучением и определением предвестников землетрясений, которые могли бы служить основанием для предсказания разрушительных землетрясений, необходимо иметь некоторые общие представления о видах землетрясений, их географическом распределении, параметрах, характеризующих землетрясения, их интенсивности в очаге и на поверхности, а также энергии, излучаемой в результате их возникновения.

1. ВИДЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ИХ ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

В результате многолетних исследований ученых в области физики, математики, геологии и геофизики выяснены многие проблемы, связанные с землетрясениями. Установлено, что существуют землетрясения различной природы. Дадим их краткую характеристику.

Известно, что у нас в СССР, например, на Урале, в Крыму или в Западной Грузии, на некоторой глубине под землей имеются достигающие громадных объемов пещеры (карстовые образования), возникшие в основном в результате растворения известняка проточной подземной водой. Со временем эти пещеры расширяются, увеличиваются, и наступает момент, когда кровля пещеры, не удерживая веса вышележащих горных пород, обрушивается и вызывает сотрясения окружающей территории. Это и есть один из видов землетрясений, которые называются обвальными. Такие землетрясения

происходят редко, они не сильны и носят местный характер.

Такого же местного значения являются землетрясения, возникающие в результате извержения вулканов. В этом случае причиной возникновения землетрясений служит находящаяся в раскаленном состоянии магма, громадные массы которой, будучи под большим давлением, стремятся выйти на земную поверхность, на пути своего выхода раскрывая новые трещины и, преодолевая сопротивление, вызывают вокруг себя сотрясения, которые сильно чувствуются до извержения вулкана, а после извержения либо ослабевают, либо совершенно прекращаются. У нас в СССР такие землетрясения происходят на Дальнем Востоке в результате действующих вулканов на полуострове Камчатка.

Десятки миллионов лет тому назад на территории Армении имелись действующие вулканы, в результате извержения которых образовались богатые запасы таких строительных материалов, как туфы, базальты и другие вулканические породы.

Сильными землетрясениями, разрушительные действия которых охватывают огромные территории и могут быть записаны сейсмическими приборами даже на расстояниях в тысячи километров, являются тектонические, возникновение которых связано с накоплением напряжений в тектонически активных областях земной коры. Модель возникновения тектонического землетрясения можно описать следующим образом. Сложные физико-химические процессы, происходящие внутри Земли, в которых значительную роль играют температурные изменения, радиоактивный распад и др., при их неравномерном распределении приводят к постепенному накоплению напряжений в земной коре. В результате таких постепенно накапливающихся в земной коре напряжений, при достижении их на некоторых участках предела прочности пород, они вызывают разрушения, образуя разлом земной коры, который в некоторых случаях проявляется на поверхности земли в виде разрывов длиной до нескольких сотен километров и смещениями по ним до 10—15 м. При таком внезапном переходе потенциальной энергии в кинетическую и происходит землетрясение.

Тектонические землетрясения на дне океанов вызывают цунами — громадные волны высотой до 30 м, об-

рушивающиеся на прибрежные города. Обычно, когда говорят о землетрясениях, в основном имеют в виду именно тектонические землетрясения, поскольку они происходят несравнимо чаще, имеют большую силу и распространяются на существенно значительные территории. Однако землетрясения происходят не всюду. А там, где происходят, бывают различной интенсивности.

Землетрясения на земном шаре приурочены к трем определенным зонам — поясам сейсмичности. Наиболее активным является Тихоокеанский пояс сейсмичности, в пределах которого происходят 80% всех землетрясений, в том числе большинство катастрофических. Он начинается у восточных берегов Камчатки и через Курильские, Командорские и Алеутские острова тянется к Аляске, далее к Мексике, где от него ответвляется Карибская или Антильская петля. Затем пояс проходит вдоль Тихоокеанского побережья Южной Америки, заканчиваясь Южно-Антильской петлей, включающей Фальклендские острова и Новую Георгию. С другой стороны он проходит вдоль Курильских, затем Японских островов и восточного побережья Азии, переходя в две ветви, одна из которых пересекает Филиппинские и Малайские острова, огибает море Бонда, перерезает Зондские острова и проходит до Андаманских островов, другая ветвь огибает Австралию, пересекает Новую Зеландию и заканчивается у южной оконечности Америки.

Второй пояс, так называемый Средиземноморско-Трансзиатский, в зоне которого происходит около 15% всех землетрясений, в том числе часто разрушительных, тянется с востока Азии от Бирмы к Памиру, Ирану, захватывая бассейны Черного и Средиземного морей и входит в Атлантический океан у Азорских островов. В европейской части этот пояс захватывает Кипр, Крит, Эгейское море, Балканы и Карпаты (румынский узел — под Врачскими горами).

К третьему поясу относятся второстепенные пояса сейсмичности: Арктико-Атлантический, западной части Индийского океана и восточно-африканских грабен, где происходит примерно 5% всех землетрясений.

По территории СССР проходят части двух главных поясов, Тихоокеанского и Средиземноморско-Трансзиатского, и второстепенного Арктического пояса.

Территория Армянской ССР входит в Средиземно-морско-Трансазнатский пояс сейсмичности.

2. ПАРАМЕТРЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Землетрясения сильно отличаются друг от друга. Трудно представить два одинаковых землетрясения. Для того, чтобы иметь возможность характеризовать землетрясение или сопоставить одно землетрясение с другим, необходимо знать некоторые их параметры.

Известно, что при землетрясении происходит разрушение горных пород и возникают большие остаточные деформации. Область внутри Земли, где происходят разрушения и возникают остаточные деформации, называется очагом землетрясения. Процесс разрушения может начаться в очень малой зоне области — в очаге и далее распространиться на всю очаговую область. Таким образом, очаг можно представить как в виде точки (гипоцентра), так и области. В большинстве случаев очаг землетрясения находится не на большой глубине в земной коре, которая колеблется в пределах от нескольких до 30—40 км. Однако бывают землетрясения, гипоцентр которых находится на большой глубине (до 100—150 км) в мантии Земли. Эти землетрясения обычно имеют большую силу и распространяются на большие территории. При глубокофокусных землетрясениях очаг может находиться на глубине до 700 км.

Проекция очага или очаговой области на поверхность Земли называется эпицентральной областью, а проекция гипоцентра на поверхность Земли — эпицентром. Диаметрально противоположная эпицентру точка на земном шаре называется антицентром. Положение эпицентра определяется координатами в градусах северной или южной широты и восточной или западной долготы.

Возникающие в очаге и распространяющиеся в земле упругие волны, т. е. сейсмические волны, могут быть объемными (продольные и поперечные) и поверхностными.

Характеристикой очага является магнитуда, которая определяется относительной энергией сейсмических волн, возбуждаемых в очаге.

Интенсивность или сила землетрясения на поверхности земли определяется баллами.

Кривые, соединяющие точки одинаковой интенсивно-

сти, называются изосейстами, форма и взаимное расположение которых зависят от механизма очага землетрясения, его глубины и геологического строения местности.

После сильного землетрясения обычно следуют повторные толчки — афтершоки, которые продолжаются до нескольких месяцев с постепенно ослабевающей интенсивностью. Иногда отдельные афтершоки по силе приближаются к интенсивности землетрясения.

Бывают случаи, когда сильному землетрясению предшествуют слабые толчки — форшоки. Однако известно, что не всегда слабые толчки сопровождаются сильным землетрясением.

Длинные серии как слабых, так и сильных сотрясений, среди которых не выделяется один главный толчок, называют «роями землетрясений».

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И КООРДИНАТ ЭПИЦЕНТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Методы определения координат эпицентров и глубины залегания очагов землетрясений могут быть разделены на две группы.

К первой группе относятся те методы, при применении которых не используются годографы сейсмических волн, то есть зависимости времен пробега сейсмических волн от эпицентрального расстояния. Следовательно, использование этих методов не требует знания строения земной коры и скоростей распространения сейсмических волн в исследуемом районе.

Все существующие методы определения положения очагов землетрясений этой группы основаны или на прямолинейности сейсмического луча (метод Вадати) или же на прямолинейности годографа (метод гипербол, средних линий и т. д.).

Графический метод Вадати, служащий для одновременного определения координат эпицентра и глубины залегания очага землетрясения, предполагает точечный очаг, расположенный в гранитном слое, наличие разности времен пробега прямых поперечных и продольных сейсмических волн по крайней мере на четырех станциях, а также постоянство скоростей распространения продольных и поперечных волн как по глубине, так и по направлению во всем первом слое земной коры. Метод Вадати неприменим, если все четыре станции рас-

положены на одинаковых расстояниях от эпицентра, или же если эти станции расположены на одной прямой. Наиболее точный результат получается в том случае, когда эпицентральные расстояния примерно одного порядка с глубиной залегания очага. Плохая служба времени на какой-либо станции не сказывается на точности определения, так как используются не абсолютные времена вступлений продольных и поперечных волн, а разность вступлений этих волн. Однако неточность определения этой разности, неоднородность строения земной коры, а также неправильная интерпретация фаз сильно влияют на полученный результат. Отсюда необходимость наличия при применении этого метода дополнительной пятой станции или же определение координат эпицентра следует проводить еще каким-либо другим методом, также не зависящим от годографа.

В виде контроля к методу Вадати может быть применен метод азимутов, согласно которому положение эпицентра землетрясения определяется как пересечение плоскостей азимутов. Метод азимутов не зависит от годографа и времени вступления фаз, а требует только наличия достаточно четкого и измеряемого по амплитуде первого максимума при записи двух горизонтальных составляющих продольной волны и равенства периодов собственных колебаний сейсмографов на каждой станции.

Способы определения положения очагов землетрясений, основанные на прямолинейности годографов, но без их использования, применяются в тех случаях, когда эпицентральные расстояния значительно превосходят глубину очага землетрясения. С этой целью применяется способ гипербол, согласно которому строится геометрическое место точек с постоянной разностью расстояний до двух сейсмических станций. Точка пересечения трех гипербол, построенных по парам станций, будет соответствовать эпицентру землетрясения.

При большом числе сейсмических станций способ гипербол становится весьма громоздким и заменяется способом окружности, в котором используются те же исходные данные, что и в способе гипербол. Эпицентр в этом случае получается в центре окружности, проходящей через одну, выбранную в качестве базисной, сейсмическую станцию и касающейся окружностей, проведенных из остальных сейсмических станций, с радиусами,

равными произведению кажущейся скорости на разность времен вступлений волны на данную и базисную сейсмические станции.

Если кажущаяся скорость волны неизвестна, то для определения положения эпицентра используется способ приведения к средним линиям, согласно которому эпицентр в первом приближении определяется как точка пересечения построенных по группам из трех станций средних по временам пробега линий.

В случае неизвестной кажущейся скорости волны может быть использован также способ эпицентральной. При этом способе по каждой паре станций строится эпицентральный, т. е. геометрическое место возможных положений эпицентра. При этом каждая точка эпицентральной будет иметь определенное значение кажущейся скорости. Точка пересечения эпицентральных, построенных по различным парам станций, является эпицентром землетрясения.

Время в очаге (момент возникновения землетрясения), в случае нахождения его независимо от годографа, является одним из наиболее трудно определяемых сейсмических элементов. Советскими сейсмологами Е. Ф. Саваренским и В. Т. Архангельским предложены простые графические способы определения времени в очаге независимо от годографа при предположении, что очаг лежит в гранитном слое, и наличия прямых продольных и поперечных волн на нескольких станциях.

Определение времени в очаге значительно упрощается при наличии годографов сейсмических волн для данного района. Годографы сейсмических волн могут быть заданы графически в виде линий в системе координат t — времени пробега сейсмической волны и Δ — эпицентрального расстояния или же в виде таблиц времен пробега сейсмических волн в зависимости от эпицентрального расстояния. Измерив по сейсмограмме, полученной на сейсмической станции, разность времен вступлений поперечных и продольных волн, по годографу определяем соответствующее эпицентральное расстояние от эпицентра до данной сейсмической станции и время пробега волны. Время в очаге получается путем вычитания из времени момента вступления этой волны времени ее пробега.

Для определения положения очага землетрясения путем использования годографов сейсмических волн име-

ется ряд способов (азимута по одной станции, засечек, гипоцентральной).

Способ азимута используется при наличии четкой измеряемой амплитуды в продольной волне на двух горизонтальных составляющих. Проведя на карте от данной станции направление вычисленного азимута и отложив определенное по годографу эпицентрального расстояние, получим положение эпицентра. Однако этот способ дает не очень надежные результаты, так как малейшая ошибка в определении азимута ведет к изменению положения эпицентра землетрясения.

Наиболее эффективным и распространенным способом определения положения очага землетрясения при знании годографов сейсмических волн является графический способ засечек. При наличии палетки годографов волн для различных глубин залегания очагов землетрясений согласно этому способу можно одновременно с положением эпицентра определить также глубину залегания очага землетрясения путем подбора годографа, наибольшим образом соответствующего наблюдаемым данным вступлений волн на сейсмических станциях. Способ требует знания разности времен вступлений поперечных и продольных волн по крайней мере на трех сейсмических станциях. Определив по годографам сейсмических волн соответствующие эпицентральные расстояния для различных глубин залегания очага для каждой глубины из каждой станции, как из центра, проводим окружности с радиусами, равными этим эпицентральным расстояниям. Затем, сопоставляя эти построения, устанавливается, для какой глубины залегания очага получают наименьшая область пересечений засечек и наилучшая согласованность в значениях времени в очаге землетрясения по данным каждой станции в отдельности. Эта, соответствующая годографу, глубина залегания очага и будет глубиной землетрясения, а центр тяжести области пересечений дуг окружностей, проведенных по данным годографов для этой глубины, определяет положение эпицентра землетрясения.

Для территории Армянского нагорья нами построена серия годографов сейсмических волн при разных глубинах залегания очагов землетрясений. Построение годографов сейсмических волн осуществлено по следующей методике.

Пересмотрены материалы наблюдений кавказских

станций, и отображены 120 землетрясений, на сейсмограммах которых отмечаются четкие вступления сейсмических волн и эпицентры которых расположены во всех областях Армянского нагорья. Для этих 120 землетрясений определены времена возникновения, координаты эпицентров и глубины залегания очагов по методам, не зависящим от годографов сейсмических волн. С помощью значений сейсмических элементов определены скорости распространения волн в отдельных слоях земной коры и составлены уравнения времен пробега различных сейсмических волн в зависимости от эпицентрального расстояния при глубине залегания очагов землетрясений, равной 20 км.

С целью построения серии годографов для различных глубин залегания очагов землетрясений было проведено изучение строения земной коры исследуемого района и в результате рассмотрения всех сейсмических и геолого-геофизических исследований выбрана модель земной коры Армянского нагорья.

Согласно принятой модели и полученным формулам времен пробега рассчитаны таблицы времен пробега и построены годографы сейсмических волн для глубин залегания очага 0, 10, 20, 30, 40, 50 км.

Построенная палетка годографов сейсмических волн с успехом была использована нами при изучении двух сильных землетрясений, происшедших на территории Армянской ССР в 1968 г. в районе Зангезура и в 1973 г. в районе г. Еревана для определения времени возникновения, координат эпицентров и глубины залегания очагов этих землетрясений.

4. ИНТЕНСИВНОСТЬ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Интенсивность землетрясений определяется по сейсмическим шкалам в баллах на основании характера повреждений зданий, остаточных явлений в грунтах, поведения людей и животных, положения различных предметов, а также замеренных величин параметров колебаний (смещений, скоростей, ускорений).

За последние 200 лет было предложено более 50 сейсмических шкал. Первые шкалы носили индивидуальный характер, поскольку составлялись применительно к отдельным землетрясениям. В последующем, в результате обобщения последствий ряда землетрясений,

были предложены обобщенные сейсмические шкалы. В последние годы у нас в СССР проведена большая работа по созданию новой сейсмической шкалы и системы измерения интенсивности землетрясений. До настоящего времени в СССР пользуются 12-балльной сейсмической шкалой Института физики Земли АН СССР, практически наиболее важная часть которой в диапазоне от 6 до 9 баллов утверждена в качестве Государственного стандарта (ГОСТ 6249—52). Эта шкала имеет инструментальную и описательную части. В инструментальной части сила землетрясения в баллах определяется величиной x_0 , представляющей наибольшее относительное смещение сферического упругого маятника сейсмометра СБМ, имеющего период собственных колебаний 0,25с и декремент колебаний 0,5. В пунктах, где отсутствуют сейсмометры, сила землетрясения определяется на основании описательной части шкалы по степени повреждения и разрушения зданий, возводимых без необходимых антисейсмических мероприятий, остаточным явлениям в грунтах и изменению режима грунтовых и наземных вод, а также прочим признакам.

Здания делятся на группы: А — одноэтажные дома со стенами из рваного камня, кирпича сырца, самана и т. п.; Б — кирпичные и каменные дома; В — деревянные дома.

Повреждения в зданиях: **легкие повреждения** — тонкие трещины в штукатурке и в печах, осыпание побелки и т. п.; **значительные повреждения** — трещины в штукатурке, откалывание кусков штукатурки, тонкие трещины в стенах, трещины в перегородках, повреждение дымовых труб, печей и т. п.; **разрушения** — большие трещины в стенах, расслоение кладки, обрушение отдельных участков стен, падение карнизов и парапетов, обвалы штукатурки, падение дымовых труб, отопительных печей и т. п.; **обвалы** — обрушивание стен, перекрытий и кровли всего здания или значительных частей его и большие деформации стен (табл. 1).

Имеются и другие шкалы, которыми пользуются в различных странах, такие, как десятибалльная шкала Росси-Фореля, (1873 г.); двенадцатибалльная европейская шкала (Меркалли-Канкани-Зиберга, 1917 г.); двенадцатибалльная американская модифицированная шкала (ММ, 1931 г.); семибалльная японская шкала (1950 г.); двенадцатибалльная китайская шкала

(1956 г.) и, наконец, двенадцатибалльная международная шкала (MSK — 1964 г.).

Шкала сейсмической интенсивности MSK—1964, составленная С. В. Медведевым, В. Шпонхойером и В. Карником, рекомендована ЮНЕСКО для временного использования в качестве единой международной шкалы. Ею пользуются и у нас в СССР. Она отличается от шкалы Института физики Земли тем, что в инструментальной части, кроме показаний сейсмометра СБМ, также приводятся значения ускорений и скоростей колебаний почвы, соответствующие V—X баллам. Другой отличительной особенностью является то, что в описательной части сделаны уточнения, в частности, классификация повреждений осуществлена по 5 ступеням; в составе зданий типа Б внесены крупноблочные и панельные здания, а также фахверковые строения, а в состав зданий типа В — каркасные железобетонные здания и т. д.

Часто необходимо бывает осуществлять перевод балльности, определенной по одной шкале, в балльность другой шкалы (таблица 2).

9087

Сейсмическая шкала Института физики Земли АН СССР

Баллы	γ_0 , мм	Повреждение зданий и сооружений	Остаточные явления в грунтах и изменение ре- жима грунтовых и назем- ных вод	Прочие признаки
1		Повреждений нет	Нарушений нет	Землетрясение людьми не ощущается. Колебания почвы регистрируются при- борами.
2		Повреждений нет	Нарушений нет	Отмечается отдельными очень чуткими лицами, на- ходящимися в полном по- кое.
3		Повреждений нет	Нарушений нет	Колебания отмечаются не- многими людьми, находя- щимися в состоянии покоя внутри помещений. Внима- тельными наблюдателями замечается очень легкое раскачивание висячих предметов.
4		Повреждений нет	В отдельных случаях воз- можны трещины в сырых грунтах	Легкое раскачивание вися- чих предметов и неподвиж- ных автомашин. Легкое колебание жидкости в со- судах. Слабый звон плот- но составленной неустой- чивой посуды.



1	2	3	4	5
5 0,5—1	Легкий скрип полов и перегородок. Дребезжание стекол. Осыпание побелки. Движение незакрытых дверей и окон. В отдельных зданиях легкие повреждения.	В редких случаях тонкие трещины в сырых грунтах. Небольшие волны в непроточных водоемах. В единичных случаях меняется дебит источников.	Землетрясение распознается большинством людей, находящихся внутри зданий. В редких случаях просыпаются спящие. Под открытым небом ощущается отдельными лицами. Заметно качаются висючие предметы. В редких случаях маятники стенных часов останавливаются. Из наполненных сосудов иногда выплескивается жидкость. Неустойчивая посуда и украшения, стоящие на полках, иногда опрокидываются.	
6 1,1—2	Во многих зданиях легкие повреждения. В отдельных зданиях группы А и Б значительные повреждения. В редких случаях при сырых грунтах тонкие трещины на дорогах.	Трещины в сырых грунтах шириной до 1 см. В горных районах единичные случаи оползней и осыпания грунтов. Небольшие изменения дебита источников и уровня воды в колодцах.	Ощущается всеми людьми внутри зданий и большинством под открытым небом; все просыпаются. Животные беспокоятся. Качаются висючие предметы. Иногда падают книги с полок и сдвигаются картины. Многие маятники стенных часов останавливаются. Падает посуда. Многие люди выбегают из помещений. Передвижение	

1	2	3	4	5
7 2,1—4	В большинстве зданий группы А значительные повреждения и в отдельных — разрушения. В большинстве зданий группы Б легкие повреждения и во многих — значительные повреждения. Во многих зданиях группы В легкие повреждения и в отдельных — значительные повреждения. В отдельных случаях оползни на крутых откосах насыпей дорог, трещины на дорогах и нарушение стыков трубопроводов. Повреждение каменных оград.	Тонкие трещины в сухих грунтах. Большое количество трещин в сырых грунтах. Отдельные случаи оползней на берегах рек. В горных районах небольшие оползни и осыпание грунтов. Возможны горные обвалы. В отдельных случаях мутнеет вода в водоемах и реках. Изменяется дебит источников, уровень грунтовых вод. В некоторых случаях возникают новые или пропадают существующие источники воды. Трещины в грунтах достигают нескольких сантиметров. Много трещин на склонах гор и в сырых грунтах. Большие осыпания, оползни и горные обвалы. Вода в водоемах становится мутной. Возникают новые водоемы. Возникают новые или пропа-	людей неустойчивое. Животные выбегают из укрытий. Сильно качаются висят лампы. Легкая мебель сдвигается. Падают книги, посуда, вазы. Все люди выбегают из помещений и в отдельных случаях выпрыгивают из окон. Передвигаться без опоры трудно.	
8 4,1—8	Во многих зданиях группы А разрушения, и в отдельных — обвалы. В большинстве зданий группы Б значительные повреждения и в отдельных — разрушения. В большинстве зданий группы В легкие повреждения и во многих — значительные повреждения. Небольшие оползни на крутых откосах выемок и насыпей дорог. Отдельные случаи разрыва стыков трубопроводов. Памятники и статуи сдвигаются. Каменные ограды разрушаются.	Часть висят лампы повреждается. Мебель сдвигается и частью опрокидывается. Легкие предметы подсакивают и опрокидываются. Люди с трудом удерживаются на ногах. Все выбегают из помещений.		

1	2	3	4	5
9 8,1—16	Во многих зданиях группы А обвалы. Во многих зданиях группы Б разрушения и в отдельных — обвалы. Во многих зданиях группы В значительные повреждения и в отдельных разрушения. В отдельных случаях искривление железнодорожных рельсов и повреждение насыпей дорог. Много трещин на дорогах. Разрывы и повреждения трубопроводов. Памятники и статуи опрокидываются. Большинство труб и башен разрушается.	дают существующие источники воды. Во многих случаях меняются дебит источников и уровень воды в колодцах. Трещины в грунтах до 10 см шириной, а по склонам и берегам рек — свыше 10 см. Большое количество тонких трещин в грунтах. Горные обвалы. Много оползней и осыпания грунтов. Небольшие грязевые извержения. Большие волнения в водоемах. Часто возникают новые или пропадают существующие источники воды.	Мебель опрокидывается и ломается. Большое беспокойство животных.	
10 16,1—32	Во многих зданиях группы Б обвалы. Во многих зданиях группы В разрушения и в отдельных обвалы. Значительные повреждения насыпей и дамб. Местные искривления железнодорожных рельсов. Разрывы трубопроводов. Дороги получают много трещин и деформаций; обвалы труб, башен, памятников, оград.	Трещины в грунтах шириной несколько дециметров и в отдельных случаях — до 1 м. Обвалы скал в горных районах и у морских берегов. Большие оплывины песчаных и глинистых масс. Прибой и выплескивание воды в водоемах и реках. Возникают новые озера.	Многочисленные повреждения предметов домашнего обихода. Животные мечутся и кричат. Ломаются ветви и старые стволы деревьев.	

1	2	3	4	5
11		Общие разрушения зданий. Разрушение насыпей на больших протяжениях. Трубопроводы приходят в полную негодность. Железнодорожные пути искривляются на большой длине.	Образуются многочисленные трещины на поверхности земли. Вертикальные перемещения пластов. Большие обвалы, оползни. Из трещин выступают водонасыщенные рыхлые отложения. Сильно меняется режим источников и водоемов, а также уровень грунтовых вод.	Гибель многих людей, животных и имущества под обломками зданий.
12		Общее разрушение зданий и сооружений.	Сильная катастрофа. Гибнет значительная часть населения от оползней. Значительные вертикальные и горизонтальные разрывы и сдвиги. Большие изменения режима подземных и наземных вод. Образуются водопады. Возникают озера. Изменяются русла рек.	Сильная катастрофа. Гибнет значительная часть населения от обвалов зданий. Растительность и животные погибают от обвалов и осыпей в горных районах, а также от приливных вод.

Сопоставление баллов по различным шкалам

Шкала MSK- 1964	Шкала Институ- та фи- зики Земли АН СССР 1952г.	Американ- ская моди- фицирован- ная шкала (MM), 1931г.	Япон- ская шкала, 1950 г.	Китай- ская шкала, 1956г.	Шкала Росси- Фореля, 1873г.	Европей- ская шкала (Меркалли- Канкани- Зиберга), 1917 г.
I	1	I	0	1	I	I
II	2	II	1	2	II	II
III	3	III	2	3	III	III
IV	4	IV	2,3	4	IV	IV
V	5	V	3	5	V-VI	V
VI	6	VI	4	6	VII	VI
VII	7	VII	4,5	7	VIII	VII
VIII	8	VIII	5	8	IX	VIII
IX	9	IX	6	9	X	IX
X	10	X	6	10	X	X
XI	11	XI	7	11	X	XI
XII	12	XII	7	12	X	XII

5. ЭНЕРГИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Энергия землетрясения — величина, которая характеризует гипоцентральный область землетрясения, в то время как балльность, о чем было сказано выше, характеризует эпицентральный область.

Общую энергию землетрясения непосредственно невозможно определить, так как большая часть этой энергии идет на разрушение горных пород, физико-химические превращения, тепловые и другие необратимые процессы в очаге. Непосредственно можно определить только незначительную часть этой энергии, которая затрачивается на образование упругих сейсмических волн. Полная энергия может быть определена косвенным путем.

Б. Б. Голицыным в 1915 году впервые был предложен метод определения сейсмической энергии, то есть энергии упругих сейсмических волн далекого землетрясения. Существовавшие до него методы определения энергии землетрясения (полной энергии) были основа-

ны на вычислении работы, затраченной на преодоление сил сцепления горных пород. Эти методы весьма приближенные и для применения требуют детального обследования эпицентральной области.

Согласно методу Б. Б. Голицына, сейсмическая энергия землетрясения принимается равной полной энергии поверхностных волн на данном эпицентральном расстоянии. При вычислении энергии принимается пространственная равномерность излучения, то есть делается предположение, что плотность энергии вблизи очага постоянна и не зависит от азимута и угла выхода сейсмического луча.

Однако, как показал Джеффрис (1923), предположение о пространственной равномерности излучения для поверхностных волн является неверным. Он предложил формулу Б. Б. Голицына использовать только для объемных волн, для которых при эпицентральных расстояниях $< 90^\circ$ может быть принято равномерное излучение энергии из очага. Им предложено учитывать также потенциальную энергию сейсмических волн, которая равна примерно их кинетической энергии.

Метод Б. Б. Голицына был в дальнейшем развит С. И. Косенко, которая, как и Джеффрис, считает возможным использовать формулу Б. Б. Голицына только для вычисления энергии объемных волн. Эта формула ею была несколько уточнена, а именно—введены поправки: а) на криволинейность сейсмического луча, так как при выводе формулы Б. Б. Голицыным и Джеффрисом было принято прямолинейное распространение сейсмических волн; б) на отражение сейсмических волн, так как сейсмограф регистрирует суммарную амплитуду падающих и отраженных волн, а при определении энергии необходимо учитывать амплитуду только падающих волн.

С учетом всех указанных поправок энергия излученных из очага объемных волн вычисляется по следующей формуле:

$$E = 2\pi R^2 \rho c \frac{\sin \Delta \sin e_0}{f(e, \tau) \cos e \frac{de}{d\Delta}} e^{\Delta k} \int_0^{\tau} v^2 dt, \quad (1.1)$$

где R — радиус Земли; ρ — плотность пород в месте расположения сейсмической станции; c — скорость распро-

странения волны; e — угол выхода из очага; e_0 — угол выхода на поверхность Земли; Δ — эпицентральное расстояние; k — показатель затухания; $f(e, \alpha)$ — функция, учитывающая неравномерность излучения энергии, которая зависит от механизма очага; τ — продолжительность землетрясения и v — мгновенная колебательная скорость частиц почвы в падающей сейсмической волне.

На больших эпицентральных расстояниях основная часть поступающей энергии связана с поверхностными волнами, энергия которых вычисляется по формуле:

$$E = 2\pi R p \sin \Delta \int_0^e v^2 H c dt \cdot e^{k\Delta}, \quad (1.2)$$

где c — групповая скорость распространения поверхностных волн; H — эффективная глубина проникновения поверхностных волн.

Энергия сейсмических волн может быть определена с помощью специальных приборов.

В. И. Бунэ сделана попытка использовать метод Б. Б. Голицына для оценки энергии близких землетрясений. С этой целью им определена энергия сталинабадского землетрясения 27 февраля 1952 года по сейсмограммам близких станций, расположенных на разных эпицентральных расстояниях и в разных азимутах. За энергию землетрясения В. И. Бунэ принял энергию объемных волн, излученных из очага. Реальную сейсмограмму землетрясения он представил в виде ограниченного числа участков незатухающих синусоидальных колебаний.

С целью исключения субъективных ошибок, вносимых вычислителем при разбиении сейсмограммы на отрезки синусоид, Н. К. Карапетян предложен способ определения энергии землетрясения, основанный на использовании частотного спектра сейсмических колебаний при определении интеграла в формуле Б. Б. Голицына. Используя этот способ, она определила плотность потока энергии сейсмических волн по сейсмограммам землетрясений Армянского нагорья, а также сейсмозрывных волн в различных грунтах.

6. МАГНИТУДА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Метод классификации землетрясений по их величине (магнитуде) на основании инструментальных наблюдений предложен К. Рихтером (1935).

Согласно К. Рихтеру, магнитуда землетрясения определяется как десятичный логарифм среднего арифметического максимальных амплитуд записи этого землетрясения двумя горизонтальными сейсмографами Вуда-Андерсена, расположенными на эпицентральных расстояниях в 100 км, при условии, что амплитуда записи землетрясения выражена в микронах. Следовательно, в соответствии с этим методом, землетрясения классифицируются по величине максимальной амплитуды на сейсмограммах, полученных с помощью горизонтальных крутильных сейсмографов. За нулевую интенсивность шкалы магнитуд была принята магнитуда землетрясения, которая на расстоянии в 100 км на сейсмограммах вызывает максимальную амплитуду в один микрон.

Метод классификации землетрясений по их магнитуде в дальнейшем был подробно разработан в работах Б. Гутенберга и К. Рихтера. В 1945 г. Б. Гутенбергом была предложена формула для оценки магнитуды удаленных землетрясений на эпицентральных расстояниях $20 \div 180^\circ$ непосредственно по максимальным смещениям почвы в поверхностных волнах с периодом колебаний в 20 сек. При этом предложенный способ определения магнитуды землетрясений не зависит от показаний приборов Вуда-Андерсена. Б. Гутенберг получил также формулу для определения магнитуды землетрясений по записи объемных волн. В этом случае им используются максимальные значения не смещений, а скоростей колебаний.

Метод Б. Гутенберга и К. Рихтера в дальнейшем был развит и физически обоснован С. Л. Соловьевым, который в результате проведенной работы пришел к заключению, что в случае как объемных, так и поверхностных волн магнитуда землетрясения для эпицентральных расстояний 4° и больше определяется не смещением, а максимальной скоростью колебания.

При использовании записей однотипной аппаратуры магнитуда землетрясения, как показали С. Л. Соловьев и Н. В. Шебалин, может быть вычислена по максимальной амплитуде поверхностной волны.

В настоящее время на сейсмических станциях СССР магнитуда землетрясений определяется по записям объемных и поверхностных волн, полученным с помощью аппаратуры различных типов путем измерения амплитуды и соответствующего периода для максимального значения скорости колебания. При использовании любого типа волн магнитуда определяется по формулам:

для неглубоких землетрясений ($h \leq 60$ км)

$$M = \lg \left(\frac{A}{T} \right)_{\max} + \sigma(\Delta), \quad (1.3)$$

для глубоких землетрясений ($h > 60$ км)

$$M = \lg \left(\frac{A}{T} \right)_{\max} + \sigma(\Delta, h), \quad (1.4)$$

где A — амплитуда смещения почвы в микронах и T — соответствующий период в секундах, относящиеся к максимуму скорости в волне данного типа, $\sigma(\Delta)$ и $\sigma(\Delta, h)$ — калибровочные функции, выражающие изменение величины $\left(\frac{A}{T} \right)_{\max}$ с эпицентральной расстоянием и глубиной очага.

Для каждого типа волн калибровочные функции имеют различный вид. Их значения приведены в «Инструкции о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях единой системы сейсмических наблюдений СССР».

Расчет магнитуды для неглубоких землетрясений можно производить также с помощью специально рассчитанных номограмм.

В Японии для определения магнитуды неглубоких близких землетрясений на эпицентральных расстояниях до 2000 км широко используется формула Тсубои. Кавасуми предложил для определения магнитуды землетрясения использовать также продолжительность колебаний. С этой целью он вывел корреляционную зависимость между магнитудой и продолжительностью колебаний.

В Советском Союзе для Дальнего Востока построены калибровочные кривые для определения магнитуды неглубоких тихоокеанских землетрясений на эпицентральных расстояниях от $1-30^\circ$ по записям продольных и поперечных волн приборами общего типа (СК). Аналогич-

ные калибровочные кривые для определения магнитуд неглубоких близких землетрясений будут построены также и для других сейсмоактивных регионов Советского Союза.

Сейсмические станции у нас оснащены аппаратурой в широком частотном диапазоне. Однако, как показали исследования, проведенные в СССР и за рубежом, величины магнитуд, вычисленные по записям землетрясений на широкополосной и короткопериодной аппаратуре, получаются разными. При этом значения магнитуд, определенные по записи короткопериодных приборов, получаются заниженными.

Для одного и того же землетрясения величина магнитуды, определенная по записи объемных волн (m), отличается от магнитуды, определенной по записи поверхностных волн (M). Переход от одной магнитуды к другой производится по формуле:

$$m = 0,56M + 2,9. \quad (1.5)$$

Наблюдаются значительные расхождения в величинах магнитуд, определенных по сейсмограммам различных станций для одного и того же землетрясения, что, по-видимому, вызвано наличием различных грунтов под отдельными сеймостанциями, различием строения земной коры на пути от очага до отдельных станций, а также механизмом очага землетрясения. В связи с этим при определении магнитуды землетрясения вводятся станционные и эпицентральные поправки.

7. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КЛАСС ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Классификация несильных близких землетрясений у нас в стране в настоящее время производится по шкале энергетических классов $K = \lg E_{\text{дж}}$, где E — величина суммарного потока энергии сейсмических волн через некоторую сферу фиксированного радиуса, так называемую референц-сферу, условно принятую за границу очага землетрясения. Для определения K строится функция затухания плотности потока энергии в зависимости от гипоцентрального расстояния. Используя эту калибровочную функцию, значения плотности потока энергии, измеренные по сейсмограмме на любом гипоцентрального расстоянии, приводятся к их значениям на известном расстоянии, равном радиусу референц-сферы, и за-

тем производится интегрирование по сфере этого радиуса и таким путем определяются величина суммарного потока энергии сейсмических волн и класс энергии К.

Шкала энергетических классов была предложена в Таджикской комплексной сейсмологической экспедиции Т. Г. Раутиан первоначально для классификации слабых землетрясений в Средней Азии. В дальнейшем классификация землетрясений по шкале энергетических классов стала производиться во всех сейсмоактивных регионах Советского Союза. При этом для некоторых регионов имеются свои калибровочные функции затухания плотности потока энергии сейсмических волн.

Для некоторых сейсмоактивных регионов Советского Союза построены номограммы для определения энергетического класса землетрясений простым графическим путем. Так, для Средней Азии Т. Г. Раутиан построена номограмма, по которой, зная сумму максимальных смещений в продольной и поперечной волнах, выраженную в микронах, и эпицентрального расстояние, можно определить энергетический класс землетрясений. На этой номограмме имеются три горизонтальные шкалы расстояний, соответствующие различным видам частотной характеристики используемой сейсмической аппаратуры.

Для Дальнего Востока С. А. Федотовым составлена номограмма для определения энергетического класса землетрясений по отношению максимальной амплитуды смещений к ее периоду и разности времен пробега поперечных и продольных волн.

С. Л. и О. Н. Соловьевы построили номограмму для определения энергетического класса курильских землетрясений с глубиной очага 40 ± 30 км при эпицентральных расстояниях $0,5-7,0^\circ$. Энергетический класс землетрясений по этой номограмме вычисляется по максимуму отношения амплитуды в поперечной волне к ее периоду и эпицентральному расстоянию.

Номограмма для вычисления энергетического класса землетрясений Крыма составлена З. И. Арановичем. Для определения К по этой номограмме используются отношение максимальной амплитуды поперечной волны к ее периоду и гипоцентрального расстояние.

8. СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ МАГНИТУДОЙ, ЭНЕРГИЕЙ И ИНТЕНСИВНОСТЬЮ (В БАЛЛАХ) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Имеется большое число эмпирических формул, связывающих магнитуду с сейсмической энергией. Впервые одну из таких формул для сильных землетрясений опубликовали Б. Гутенберг и К. Рихтер в 1942 г. В этой же работе ими дана зависимость между энергией землетрясения, магнитудой, силой землетрясения, выраженной в баллах, и глубиной очага.

Для слабых и сильных землетрясений С. Л. Соловьевым предложены зависимости между энергией объемных волн и магнитудой землетрясений.

В Таджикской комплексной сейсмологической экспедиции Т. Г. Раутиан получено следующее соотношение между магнитудой M и потоком энергии E через сферу радиуса $R=10$ км для землетрясений с магнитудой $M < 6$:

$$\lg E_{\text{дж}} = 4 + 1.8 M. \quad (1.6)$$

Для землетрясений с магнитудой $M \geq 6$ эта зависимость имеет вид:

$$\lg E_{\text{дж}} = 8 + 1.1 M. \quad (1.7)$$

Формулы, полученные Т. Г. Раутиан, широко используются для изучения сейсмичности отдельных сейсмоактивных регионов Советского Союза.

Вопрос о связи между энергией (а также магнитудой), балльностью и глубиной очага землетрясений был детально изучен Н. В. Шебалиным.

Для землетрясений Армянского нагорья Н. К. Карапетян получена зависимость между магнитудой и балльностью в эпицентре землетрясения для глубин залегания очагов в 10—15 км в виде:

$$M = 0.47J + 1.66. \quad (1.8)$$

Используя это уравнение и формулы Т. Г. Раутиан, она получила зависимости между классом энергии $K = \lg E_{\text{дж}}$ и балльностью в эпицентре при глубине залегания очагов в 10—15 км в виде:

$$K = 7 + 0.85J \text{ при } M < 6 \quad (1.9)$$

$$K = 10 + 0.52J \text{ при } M \geq 6 \quad (1.10)$$

Н. К. Карапетян получены также зависимости предельной дальности регистрации (Δ_{max}) землетрясений

приборами общего типа от магнитуды M и энергетического класса K землетрясений для территории Армянского нагорья, которые выражаются следующими уравнениями

$$M = 2,08 + 1,66 \lg \Delta_{\max} \quad (1.11)$$

$$K = 7,74 + 3,0 \lg \Delta_{\max} \quad (1.12)$$

Используя полученные формулы, она для землетрясений Армянского нагорья составила энергетическую шкалу (таблица 3).

Составленная энергетическая шкала была апробирована при последних значительных землетрясениях Армении: спитакском 31 января 1967 г., зангезурском 9 июня 1968 г., ереванском 16 июня 1973 г. и др. Для этих землетрясений были определены магнитуда, балльность в эпицентре, энергетический класс и дальность регистрации.

Таблица 3

Соотношения между энергетическим классом, магнитудой и балльностью землетрясений

Энергетический класс	Магнитуда	Сила землетрясения, баллы	Предельная дальность регистрации, км
7	$1\frac{1}{2} \leq M < 2$	1	100
8	$2 \leq M < 2\frac{1}{2}$	2	200
9	$2\frac{1}{2} \leq M < 3\frac{1}{4}$	3	400
10	$3\frac{1}{4} \leq M < 3\frac{3}{4}$	4	800
11	$3\frac{3}{4} \leq M < 4\frac{1}{4}$	5	1600
12	$4\frac{1}{4} \leq M < 4\frac{3}{4}$	6	3200
13	$4\frac{3}{4} \leq M < 5\frac{1}{4}$	7	6400
14	$5\frac{1}{4} \leq M < 6$	8	—
15	$6 \leq M < 6\frac{3}{4}$	9	—
16	$6\frac{3}{4} \leq M < 7\frac{1}{2}$	10—11	—
17	$7\frac{1}{2} \leq M < 8\frac{1}{2}$	11—12	—
18	$8\frac{1}{2} \leq M$	12	—

Апробация показала надежность составленной шкалы при интерпретации наблюдений над землетрясениями Армянского нагорья.

9. СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОМЕНТ

Величину землетрясения в очаге в Советском Союзе и за рубежом в последние 15 лет стали характеризовать сейсмическим моментом M_0 . Сейсмический момент представляет собой скалярную величину и численно равен той энергии, которую необходимо затратить, чтобы преодолеть силы трения по поверхности S разрыва и вызвать смещение крыльев разрыва на расстояние D , в случае, когда поверхностная плотность сил трения равна модулю упругости μ на сдвиг, то есть

$$M_0 = \mu SD. \quad (1.13)$$

Площадь разрыва S может быть выражена через его длину L по простиранию и ширину W по падению, если известна форма разрыва. В случае прямоугольной формы разрыва

$$S = LW; \quad M_0 = \mu LWD. \quad (1.14)$$

Площадь разрыва любой формы можно выразить через ее средний радиус, если условно принять эту площадь круглой формы. Тогда

$$S = \pi R^2, \quad M_0 = \mu \pi R^2 D. \quad (1.15)$$

Сейсмический момент определяется непосредственно из длиннопериодной части спектра сейсмических волн.

Впервые величина сейсмического момента была рассчитана в 1966 г. японским сейсмологом К. Аки по спектрам длиннопериодных поверхностных волн ниагатского землетрясения 16 июня 1964 г.

Несколькими годами позже, в начале семидесятых годов, американскими сейсмологами были проведены определения сейсмического момента по длиннопериодной части спектров объемных волн: поперечных — Бруном, продольных — Виссом и Ханксом.

Указанный способ определения сейсмического момента, то есть по длиннопериодной части спектра волн, основывается на характеристике сейсмического момента как численной меры длинноволнового излучения из очага землетрясения.

Имея величину сейсмического момента и амплитудный спектр волны, можно определить размеры очага землетрясения. Так, средний радиус площади разрыва вычисляется по формуле Бруна

$$R = \frac{2,35v}{2\pi f_0}, \quad (1.16)$$

где v — скорость распространения волны; f_0 — частота, соответствующая точке пересечения на амплитудном спектре двух прямых, аппроксимирующих спектр: горизонтальной в области малых частот и наклонной в области больших частот.

Величина среднего радиуса или радиуса круговой дислокации, по Бруну, равна половине длины разрыва L . Следовательно, длина разрыва будет равна $L=2R$.

Величина смещения крыльев разрыва вычисляется по формуле:

$$D = \frac{M_0}{\mu S} = \frac{M_0}{\mu R^2 \pi}. \quad (1.17)$$

Величину снимаемого с поверхности разрыва в очаге землетрясения напряжения $\Delta\sigma$ можно определить по формуле Бруна:

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} \frac{M_0}{R^3}, \quad (1.18)$$

если известны значения сейсмического момента M_0 и среднего радиуса R , или же по формуле Кострова:

$$E_q = \frac{1}{\mu} \left(\frac{1}{2} \Delta\sigma - \sigma_r \right) M_0, \quad (1.19)$$

где E_q — энергия землетрясения, а σ_r — эффективное среднее напряжение радиационного трения при скольжении по разрыву, которое, согласно Б. В. Кострову, может не учитываться при больших очагах землетрясений.

В настоящее время для землетрясений многих сейсмоактивных районов мира уже вычислены значения сейсмического момента M_0 , среднего радиуса R площади разрыва, средней подвижки D , падения напряжений $\Delta\sigma$ на разрыве и установлены корреляционные зависимости этих величин от магнитуды M или энергетического класса K землетрясений.

Обобщив все эти результаты, Ю. В. Ризниченко для совокупности всех мировых данных дал следующие корреляционные зависимости между M_0 , $L=2R$, D , $\Delta\sigma$ и K или M :

$$\begin{aligned} \lg M_0 \pm 0,6 &= 11,842 + 0,0889 K = 15,4 + 1,6 M, \\ \lg L_{KM} \pm 0,5 &= -1,706 + 0,606 K = 0,880 + 0,371 M, \quad (1.20) \\ \lg D_{CM} \pm 0,4 &= -4,915 + 0,420 K = -3,235 + 0,757 M, \\ \lg \Delta \sigma \pm 0,5 &= 0,025 + 0,350 K. \end{aligned}$$

Сейсмический момент используется также для определения так называемого сейсмического течения горных масс.

Как известно, землетрясения являются следствием тектонических движений горных масс в недрах Земли. Однако землетрясения в свою очередь влияют на тектонические деформации земной коры, вызывая сейсмическое течение горных масс, то есть сейсмическую деформацию.

Общий количественный подход к проблеме сейсмического течения горных масс был разработан Ю. В. Ризниченко.

Скорость сейсмической деформации через сейсмические моменты землетрясений впервые была выражена Б. В. Костровым. При этом он вместо скалярной величины — сейсмического момента, ввел понятие тензора сейсмического момента, который определяет положение разрыва и подвижки в пространстве. Согласно Б. В. Кострову, тензор скорости сейсмической деформации $\dot{\epsilon}_{(q)}(q)_{ik}$ равен сумме тензоров сейсмического момента M_{oik} землетрясений, происходящих в единице объема ΔV за единицу времени Δt

$$\dot{\epsilon}_{(q)ik} = \frac{1}{2\mu\Delta V\Delta t} \sum_{re} M_{oik}^{(re)}. \quad (1.21)$$

Для подсчета долговременной средней скорости сейсмической деформации Б. В. Костров предлагает использовать корреляционную зависимость между сейсмическим моментом и магнитудой (или энергией), а также закон повторяемости землетрясений.

Глава 2

ПОСЛЕДСТВИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ АРМЕНИИ И ПРИЛЕГАЮЩИХ ОБЛАСТЕЙ

Армения — одна из тех стран, где имеется очень богатый исторический материал о сильных и разрушительных землетрясениях, происшедших за большой период времени, охватывающий более чем две тысячи лет.

Вначале сведения о землетрясениях в основном давались путешественниками и летописцами и носили описательный характер. Инженерный анализ землетрясений с описанием повреждений зданий и сооружений, характера этих повреждений и др. стал осуществляться начиная с конца прошлого столетия.

Наиболее полные данные о землетрясениях прошлых лет, происшедших на территории Армении и прилегающих областей, приведены в монографии В. А. Степаняна, в которой обобщен обширный материал по землетрясениям, имеющихсся в Научно-исследовательском институте древних рукописей АН Армянской ССР (Матенадаране). Описания этих землетрясений имеются также в «Хронологии землетрясений в Закавказье» Е. И. Бюса.

Опубликовано много других работ, в которых приводится инженерный анализ землетрясений, в том числе посвященных результатам исследований конкретных разрушительных землетрясений. Составлен и опубликован «Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР».

В этой главе нашей книги, на основании обобщения имеющихся в указанных работах сведений в хронологическом порядке дается описание характерных сильных и разрушительных землетрясений Армении и прилегающих областей, представляющих наибольший интерес.

1. Вайоцзорское землетрясение 21 июля 735 г. Это опустошительное землетрясение произошло в долине, расположенной к югу от озера Севан между Южно-севанским и Даралагызским хребтами и длилось 40 дней. В результате погибло 10 тысяч человек и произошли большие разрушения. Во многих местах образовались трещины и большое количество жителей вместе со своими домами погибло в расщелинах. После землетрясения эта долина была названа Вайоцзор (долина печали).

2. Двинское землетрясение 27 марта 893 г. произошло в ночное время и в одно мгновение вызвало в столице Армении городе Двине существенные разрушения. Была разрушена церковь Аствацашен, другие доброкачественные строения, дворцы и ограды. Образовались расщелины и пропасти, поглотившие большое количество людей. Человеческих жертв было так много, что не хватало места и времени для погребения. Число погибших составило более 70 тысяч человек.

3. Гянджинское землетрясение 1139 г. произошло в районе горы Алгарак (ныне Каписдаг). Во время землетрясения горы и долины были покрыты густым туманом. В результате землетрясения разрушились город Гянджа и церковь в Ахпате, многие другие строения. Бесчисленное множество людей (200—300 тысяч человек) погибло под развалинами построек. Произошли сильные обвалы, оползни и изменения рельефа. В результате обвалов горы Алгарак заполнилась долина и закрыла направление протекающей в ней реки, вследствие чего образовалось озеро Гейгель, существующее и в настоящее время.

4. Анийское землетрясение 1319 г. имело большую интенсивность и вызвало сильные разрушения на обширной территории. Эти разрушения произошли в ряде районов Армении и Закавказья, где многие города и селения были превращены в кучи развалин. Особенно много разрушений было в самом большом городе Армении того времени — Ани. Были уничтожены монастыри и другие исторические памятники. Разрушился также монастырь апостола Тадеоса.

5. Тавризское землетрясение 5 февраля 1641 г. вызвало сильные разрушения в Тавризе и его окрестностях, уездах Хосров, Шах и Урка, а также в селении Духуркан. Землетрясение сопровожда-

лось сильным гулом и грохотом. Разрушились все здания, ограды и высокие мечети Тавриза. Под развалинами погибло множество людей. В грунте образовались глубокие трещины, откуда стала вытекать вода; расположенное в долине село погрузилось в трещину и покрылось камнями и громадными глыбами. Сотрясения продолжались в течение шести месяцев, причем в первые два месяца повторялись довольно часто, иногда несколько раз в течение дня.

6. Ванское землетрясение 2 апреля 1646 г. произошло ночью и вызвало разрушения в городе Ване и в близлежащих селах. Оно разрушило большую часть крепости в Ване. Обвалилась часть городской стены. Обрушились монастыри Ванского уезда, много церквей и все мечети с минаретами. Под развалинами погибло большое количество людей. Появились новые родники, а существовавшие до землетрясения — высохли. Образовались глубокие расщелины. В районе Армянского ущелья образовалось озеро, которое существует по сей день.

7. Гарнийское землетрясение 4 июня 1679 г. вызвало разрушение города Еревана, сел Канакер, Норагавит, Норагюх, Дзорагюх, Норк, Гямрез и других в Араратской долине. Землетрясение сопровождалось ужасающим грохотом, поднялся очень сильный ветер с пылью, от чего стемнело в воздухе на большом протяжении от Гарни до горы Арагац. Образовались протяженные разрывы, разрушились горные склоны, развалились утесы и заполнили долины, нарушая во многих местах течение воды. Ряд родников исчез, в других местах возникли новые. Дороги изменили свое направление. Разрушились многие церкви и монастыри. Наибольшие разрушения произошли в Гарни. Погибло 7600 человек. Эчмиадзинский монастырь и церкви Гаяне и Рипсима при этом землетрясении не пострадали. Землетрясения продолжались до конца года. Наиболее сильными из них были землетрясения 12 июня и 8 сентября.

8. Тавризское землетрясение 27 декабря 1779 г. сопровождалось ужасающим грохотом и сильным ветром. Оно вызвало очень сильные разрушения в Тавризе и его окрестностях: Хое, Салмасте, Урмин, Гунае, Басуе и во многих селениях этой области. Особенно сильно разрушился город Тавриз. Превратились в груды развалин его великолепные постройки.

ки, палаты, крепость, мечети. Образовались широкие и глубокие разрывы и пропасти. От землетрясения погибло 100 тысяч человек. Это землетрясение восьмое по счету сильное землетрясение в Тавризе за историческое время. Оно причинило столько вреда, сколько предыдущие семь землетрясений вместе взятые. Это землетрясение продолжалось в течение более чем трех лет.

9. Араратское землетрясение 2 июля 1840 г. является одним из самых сильных землетрясений, происшедших на территории Армении и прилегающих областей. Разрушительное действие этого землетрясения охватило очень большую территорию, площадью около 5 тысяч квадратных километров, с городами Тавриз, Ордубад, Нахичевань, Шуша, Маку, Баязет, Ереван, Александрополь. В результате землетрясения со склонов горы Большой Арарат оторвались покрытые льдами и вечными снегами громадные скалы, которые заполнили ущелье, и под льдами и камнями исчезли большая деревня Акори (погибло около 1 тысячи человек) и церковь св. Акопа. Деревня Кара-Хасанлу в одно мгновение превратилась в груду развалин. Появились широкие разрывы, из которых извергались смешанные с песком большие водные фонтаны. Разрушилось очень много жилых домов, мельниц, церквей, мечетей. Исчезло большое количество родников, появились новые. Землетрясение сопровождалось извержением газов, паров и водяных потоков из горы Арарат.

10. Эрзерумское землетрясение 21 мая 1859 г. Это землетрясение произошло в Эрзеруме и его окрестностях, в особенности в горах Фалатокан и Ярлидаг и причинило очень сильные разрушения. Полностью или частично разрушились, а также получили существенные повреждения более 4 тысяч домов. Разрушилась армянская церковь св. Геворка. Греческие и французские церкви, а также несколько мечетей были сильно повреждены. При этом землетрясение проявилось по-разному. В высокой части города повреждений и жертв было несравненно больше, чем в нижней части. Общее количество погибших составляло около 600 человек.

11. Ленинканское землетрясение 22 октября 1926 г. началось в 16 час. 4 мин. слабым толчком силой в 4—5 баллов. Затем через 40 мин. по-

следовал второй толчок в 7—8 баллов. Наконец, основное землетрясение произошло в 19 ч. 59 мин. с максимальной интенсивностью 8—9 баллов. Координаты землетрясения 40,7°N; 43,8°E. Глубина очага 7 км. Магнитуда — 5,7.

Землетрясение охватило область, прилегающую к среднему течению реки Арпачай с площадью примерно 45 тысяч кв. км. Наибольшая интенсивность сотрясения 8—9 баллов наблюдалась от г. Ленинакана до села Казарабат. Перед землетрясением был слышен сильный гул, который заставил людей выйти из помещений и отойти от зданий. Уже при втором толчке (до главного толчка) в ряде мест появились значительные повреждения. Этот толчок, который произошел примерно за 3 часа до главного, также насторожил жителей, большинство из которых не заходили в помещения. От землетрясения пострадало несколько десятков сел, в которых разрушились полностью или частично многие дома. В Ленинакане дома получили очень существенные повреждения или разрушились.

Обследование зданий показало, что больше всего пострадали сельские здания из бута на глиняном растворе. Здания из кладок «мидис» на известковом растворе пострадали меньше. В результате землетрясения были человеческие жертвы.

12. Зангезурское землетрясение 27 апреля 1931 г. произошло в 16 ч. 51 мин. и имело координаты 39,3°N; 46,0°E, глубину очага 22 км, магнитуду 6,3 и максимальную интенсивность — 8—9 баллов. Землетрясение проявилось на большой площади (примерно 100 тысяч квадратных километров). Произошли разрушения (в различной степени) в селах Армянской ССР и Нахичеванской АССР. Из них больше половины стали непригодными для жилья. Население было эвакуировано. Разрушились церкви Татевского монастыря, церковь св. Минаса в деревне Татев и монастырь Большой Татевский анапат на берегу р. Воротан.

Причиной больших разрушений являлись и неблагоприятные инженерно-геологические условия, а также неудачные архитектурные и конструктивные решения зданий, большинство которых было расположено на косогоре. Пострадали и некоторые доброкачественно построенные здания, например, школы. Сохранились церк-

ви и мечеть с башнями и минаретом в Ордубаде, которые были выложены на известковом растворе.

13. Ереванское землетрясение 7 января 1937 г. Этому землетрясению предшествовали 4 толчка. Из них первый толчок имел интенсивность в 6 баллов, который вызвал повреждения и некоторые разрушения в г. Ереване и прилегающих районах, особенно в сел. Паракар. Последующие три толчка были намного слабее. Затем, через более чем 7 часов последовал основной толчок (в 20 час. 47 мин.) с эпицентром в сел. Паракар. Координаты землетрясения $40,1^{\circ}\text{N}$ и $44,4^{\circ}\text{E}$, глубина очага 10 км, магнитуда 4,6 и интенсивность 7 баллов. В селе Паракаре ряд домов получили различной степени повреждения. Это были в основном каменные дома из бута без перевязки с тяжелым земляным покрытием. В Ереване некоторые здания получили повреждения, что объясняется ветхостью старых построек, неблагоприятными грунтовыми условиями в некоторых частях города, а также низким качеством строительных работ. Часто происходило расслоение кладки «мидис» вследствие недостаточности тычковых камней, служащих для связи отдельных слоев кладки. Получили повреждения клинчатые перемычки. При этом землетрясении впервые прошли испытания железобетонные антисейсмические пояса. В том случае, когда здания имели антисейсмические пояса, каких-либо повреждений в стенах не произошло, и, наоборот, там где их не было, наблюдались отрывы стен друг от друга. В зданиях с железобетонным каркасом отмечались незначительные повреждения в виде трещин в местах примыкания заполнения к каркасу.

14. Бюраканское землетрясение 3 июня 1949 г. произошло в 6 ч. 24 мин., имело координаты $40,4^{\circ}\text{N}$ и $44,3^{\circ}\text{E}$, глубину очага 6 км, магнитуду 3,9 и интенсивность 7 баллов. Область наибольших повреждений охватила сравнительно малую территорию, примерно 150 квадратных километров, что может быть объяснено установленным для Кавказа быстрым затуханием сейсмической волны, а также поверхностным расположением очага землетрясения.

Землетрясение причинило некоторые разрушения в основном в селах: Бюракан, Инаклу, Оргов и Тегер. Особенно сильно пострадало село Бюракан, которое находилось в эпицентральной зоне землетрясения.

Основным видом строений в этих селах были одноэтажные здания из рваного бута, сложенные на глиняном растворе. Чрезмерная толщина земляной кровли (до 1 метра) в ряде случаев являлась основной причиной разрушения зданий. Другой не менее важной причиной разрушения являлась непрочность раствора, на котором была выложена бутовая кладка.

Разрушения произошли и в зданиях, стены которых были выложены из постелистого туфового камня на глиняном растворе по системе «мидис» при отсутствии сквозных тычковых камней, где имело место отклонение наружного слоя кладки.

В зданиях из постелистого туфа на известковом или сложном растворе, каковыми являлись здания обсерватории, повреждений не наблюдалось.

15. Игдырское землетрясение 4 сентября 1962 г. произошло в 22 часа 59 мин., имело координаты $39,9^{\circ}\text{N}$ и $44,0^{\circ}\text{E}$, магнитуду 5,2 и интенсивность 7—8 баллов. Максимальная интенсивность проявилась в районе г. Игдыр (Турция), расположенного в 50 км к югу от г. Еревана (в 15 км от границы СССР). Оно ощущалось на значительной части территории Армянской ССР с интенсивностью от 4 до 5—6 баллов. В пограничных селах Маркара, Ерасхаун, Вардашен, Арзаан, Пшатаван и Джинфрида сила землетрясения была оценена в 5—6 баллов; в Ереване, Арташате и Октемберяне — 5 баллов; в Ленинакане, Степанаване и Горисе — 4 балла. В г. Игдыре разрушились дома, в том числе здания муниципалитета, пожарной службы и почты, многие здания получили сильные повреждения. После землетрясения произошло большое количество повторных толчков, которые продолжались до конца года, некоторые из них с магнитудой 4—4,5.

16. Вартоское землетрясение 19 августа 1966 г. произошло в 12 час. 22 мин. с эпицентром в районе г. Варто (Турция). Координаты землетрясения $39,2^{\circ}\text{N}$ и $41,6^{\circ}\text{E}$, глубина очага 26 км, магнитуда 6,8 и интенсивность 9 баллов. Землетрясение вызвало сильные повреждения с большим количеством человеческих жертв в провинциях Муш, Эрзерум и Бингёль. Более 19 тысяч зданий были разрушены или сильно повреждены. Общее число погибших составляло более 2,5 тысячи человек, раненых — 1,5 тысячи человек. Произошло наибольшее количество разрушений зданий

со стенами из бута или кирпича на глиняном растворе. Имели место также разрушения зданий с несущими железобетонными конструкциями, из-за низкого качества бетона.

17. Зангезурское землетрясение 9 июня 1968 г. произошло в 0 ч. 56 мин., имело координаты $39,3^{\circ}\text{N}$ и $46,1^{\circ}\text{E}$, глубину очага 14 км, магнитуду 5 и интенсивность 7—8 баллов. Оно проявилось со значительной силой в Кафанском и Сисианском районах, а также в Нахичеванской АССР. Землетрясение это повторилось 1 сентября 1968 г. с магнитудой 4,8 (при глубине очага 4 км) и имело интенсивность в эпицентре 8 баллов.

Анализ поведения жилых, общественных и производственных зданий и сооружений при зангезурских землетрясениях показал, что наибольшие повреждения получили здания с несущими стенами из бутовой кладки, не обладающей достаточным сцеплением местного камня с раствором; здания из кладки системы «мидис», построенные в соответствии с требованиями норм сейсмостойкого строительства, при надлежащем качестве работ, показали себя достаточно сейсмостойкими; железобетонные и металлические каркасные здания и сооружения, а также деревянные дома в основном выдержали землетрясение без повреждений.

18. Чалдыранское землетрясение 24 ноября 1976 г. произошло в 12 ч. 22 мин. в провинции Ван (Турция), имело координаты $39,1^{\circ}\text{N}$ и $44,0^{\circ}\text{E}$, глубину очага 15 км, магнитуду 7,0 и максимальную интенсивность 9 баллов.

На основании изучения повреждений и деформаций грунта установлена эпицентральная область землетрясения в Чалдыране и ближайших к нему окрестностях, где землетрясение проявилось с интенсивностью в 9 баллов, обусловленное деформацией грунта и протяженностью трещины в грунте. Интенсивность в Мурадие была 7 баллов, а в Эрцисе и Диадине — 5 баллов.

Во время землетрясения образовался разрыв, который ранее не был отмечен на геологических и тектонических картах Турции. Это Чалдыранский разрыв, который простирается в СЗ—ЮВ направлении ($\text{N}70^{\circ}\text{W}$) на протяжении 53 км и лежит примерно в 30 км севернее известного Северо-Анатолийского разлома.

В результате землетрясения произошли сплошные разрушения превалирующего типа сооружений этого

района — зданий с несущими стенами из различных материалов (булыжника и сырцовых блоков) с деревянной кровлей, покрытой обмазанным глиной дерном. Во время землетрясения в Чалдыране было всего одно железобетонное здание, а в Мурадине — четыре. Эти здания были повреждены, но не разрушены. При землетрясении были разрушены или получили серьезные повреждения всего 9232 дома. Было убито 3840 человек и ранено 497 человек.

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В ОЧАГАХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И МЕХАНИЗМ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

Тектонические землетрясения являются следствием геологических процессов, совершающихся в недрах Земли. Установить причину того или иного землетрясения геологическими методами не всегда удается вследствие того, что большое число землетрясений столь слабо по силе, что не вызывает нарушений, видимых на земной поверхности.

В связи с этим изучение процессов в очаге землетрясения в основном проводится путем исследования формы и интенсивности сейсмических колебаний, вызванных землетрясением.

В настоящей главе приводятся основные направления исследований по изучению механизма землетрясений по сейсмическим данным, результаты определений дислокаций и напряженного состояния в очагах землетрясений Армении и прилегающих областей Азербайджана, Грузии и Турции.

1. НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ИЗУЧЕНИЮ МЕХАНИЗМА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

История исследования очагов землетрясений начинается в 1910 году, когда Рейд на основе изучения последствий калифорнийского землетрясения 18 апреля 1906 года выдвинул теорию упругой отдачи, согласно которой землетрясения возникают вследствие разрыва пород Земли под действием тектонических напряжений. Это землетрясение явилось следствием скольжения пород на протяжении примерно 350 км вдоль разлома Сан-Андреас, полная длина которого превышает 900 км. При

этом противоположные стороны разлома сдвинулись относительно друг друга на расстояние от 3 до 6 м. Разлом является поверхностным, хорошо прослеживается на поверхности земли и почти вертикален. Смещение же по разрыву было почти чисто горизонтальным, причем тихоокеанская сторона двигалась к северу относительно континентальной. До землетрясения 1906 г. на территории разлома дважды была произведена точная триангуляция (геодезическая съемка). Сразу же после землетрясения вновь была произведена съемка. Все это позволило представить картину происшедшего.

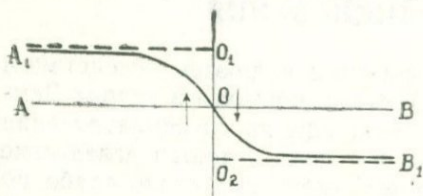


Рис. 1. Схема образования разрыва при калифорнийском землетрясении 18 апреля 1906 г.

На рисунке 1 линия O_1O_2 представляет разлом. Предположим, что линия AOB была проведена под прямым углом к разлому за примерно 100 лет до землетрясения 1906 года и, если бы имела возможность вести наблю-

дения за этой линией все время, то можно было бы увидеть ее постепенное изгибание до положения A_1OB_1 . Этого положения линия достигла бы утром 18 апреля 1906 г. При этом напряжения превысили бы прочность пород в области будущего разрыва, произошел бы разрыв-сдвиг по O_1O_2 . Линия A_1O заняла бы положение A_1O_1 , а линия $OB_1—O_2B_1$ и упругая деформация в этом участке полностью освободилась бы. Таким образом, постепенное накопление напряжений при смещении тихоокеанской стороны разлома Сан-Андреас по отношению к континентальной в течение 100 лет сменилось внезапным высвобождением этих напряжений путем сдвига по разрыву, вследствие чего и произошло землетрясение. Такой процесс постепенного накопления напряжений и их внезапного высвобождения является общим для большинства землетрясений. Теория, объясняющая возникновение землетрясений таким путем, была названа теорией упругого высвобождения или упругой отдачи.

Следующий шаг в изучении очагов был сделан в 20-х

годах нашего столетия, когда было открыто в основном усилиями японских сейсмологов закономерное распределение знаков первых вступлений продольных сейсмических волн и на основании этого введено понятие нодальных плоскостей.

Для объяснения понятия нодальных плоскостей рассмотрим область вблизи очага O землетрясения (рис. 2).

Линия O_1O_2 на этом рисунке дает направление разрыва, а стрелки показывают направление смещения. Область вблизи очага землетрясения делится на четыре квадранта попеременного сжатия (квадранты А и Б) и растяжения (квадранты В и Г) двумя плоскостями. При переходе через эти плоскости, которые разделяют области сжатия от областей растяжения, направление движения меняется, следовательно, на самих плоскостях оно должно обращаться в нуль. Поэтому эти плоскости называют узловыми или нодальными плоскостями. Следы пересечений этих плоскостей со сферической поверхностью Земли представляют собой дуги

окружностей — нодальные линии. Следовательно, область вокруг эпицентра также делится на четыре квадранта нодальными линиями, положение которых может быть определено по знакам первых вступлений продольных волн на сейсмограммах сейсмических станций, окру-

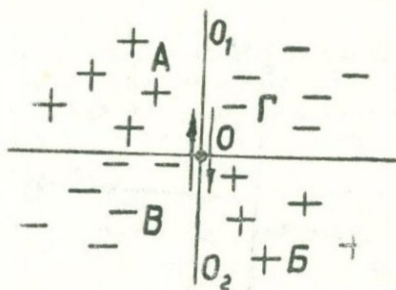


Рис. 2. Упрощенная модель области вблизи очага землетрясения.

жающих эпицентр, путем проведения пары взаимно-перпендикулярных линий, разграничивающих области волн сжатий и области волн растяжений.

В 1923 году для изучения очагов землетрясений японский ученый Накано предложил использовать теоретическую модель очага землетрясения, а именно — найти такой сосредоточенный источник возбуждения в упругой среде продольных и поперечных волн, для которого распределение знаков первых вступлений совпало бы с

наблюдаемым при землетрясениях. С этой целью он вычислил теоретические поля смещений, вызываемых в однородном упругом пространстве различными сосредоточенными источниками, и, сравнивая эти поля с наблюдаемыми полями смещений первых вступлений при землетрясениях, пытался установить тип источника и направление сил, действовавших в очаге землетрясения.

Работы Накано явились началом количественного изучения очагов землетрясений.

В дальнейшем исследования развивались в направлении разработки способов определения по знакам и отношениям амплитуд первых вступлений сейсмических волн характера и ориентации точечного источника, эквивалентного очагу землетрясения.

Анализируя в своих работах результаты исследований Накано, вначале Байерли, а затем и Ходжсон приходят к выводу, что среди возможных теоретических моделей очага землетрясения, рассмотренных Накано, действительной моделью очага является двойная сила

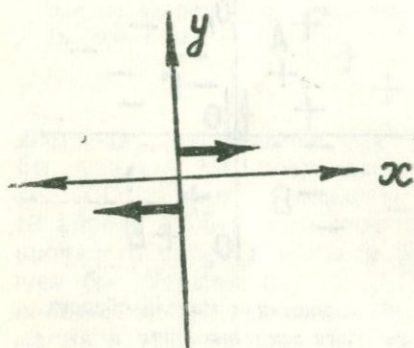


Рис. 3. Модель очага землетрясения в виде двойной силы с моментом.

с моментом (рис. 3). Такой выбор теоретической модели очага землетрясения был сделан ими на основании того, что как теоретическое поле смещений продольных волн в упругом пространстве при воздействии двойной силы с моментом, так и наблюдаемое поле смещений в первых

вступлениях в продольных волнах при землетрясениях имеют две взаимно-перпендикулярные нодальные плоскости, проходящие через очаг. При этом предполагалось, что та из нодальных плоскостей, которая перпендикулярна плечу пары и содержит вектор-момент, является плоскостью разрыва в очаге, а направление сил момента совпадает с направлением смещения разрыва. Для того, чтобы определить, которая из наблю-

даемых при землетрясении нодальных плоскостей совпадает с плоскостью разрыва в очаге, Байерли и Ходжсон пользовались геологическими данными по эпицентральной области.

Совершенно другую теоретическую модель очага землетрясения предложил в 1932 году японский ученый Хонда.

Модель очага представлялась в виде сферы малого радиуса, по поверхности которой действуют силы сжатия и растяжения (рис. 4).

При этом вся поверхность сферы разбита двумя взаимно - перпендикулярными плоскостями, проходящими че-

рез центр сферы на

четыре части, на которые действуют попеременно силы сжатия (части А и Б) и растяжения (части В и Г). Для выбранной модели очага Хонда построил теоретические поля смещений в продольных и поперечных волнах в упругой среде и установил, что эти теоретические поля

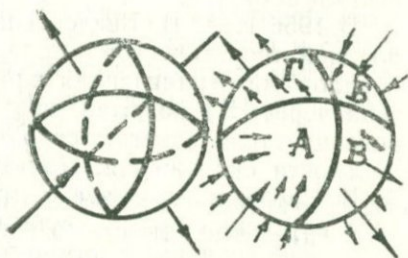


Рис. 4. Модель очага землетрясения, предложенная Хонда.

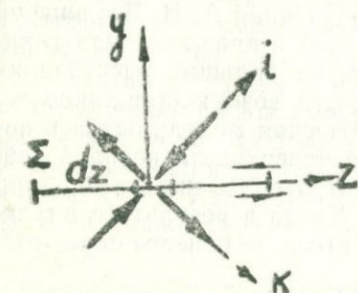


Рис. 5. Модель очага землетрясения, предложенная А. В. Введенской.

подобны наблюдаемым полям смещений продольных и поперечных волн при землетрясениях. Таким образом, предложив новую теоретическую модель очага землетрясения, Хонда подтвердил ее практическими данными по наблюдениям не только продольных, но и поперечных волн при землетрясениях.

У нас в Советском Союзе изучением процессов в очагах землетрясений по сейсмическим данным начали заниматься с 1948 г. в Геофизическом институте АН СССР. В. И. Кейлис-Бороком был разработан и в 1950 г. опубликован метод однозначного определения характера по-

движки в очаге землетрясений по записям продольных и поперечных волн, основанный на классической теории мультиполей и плоских волн, а также на работах по функционально-инвариантным решениям уравнений теории упругости. Согласно этому методу, в качестве модели очага землетрясения рассматривается любой точечный источник.

В 1956 г. А. В. Введенской в качестве наиболее вероятной теоретической модели очага землетрясения предложена ограниченная площадка (на рис. 5 обозначена через Σ) разрыва, противоположные грани которого внезапно сдвигаются одна относительно другой в плоскости скольжения. Пользуясь теорией дислокаций, А. В. Введенская показала, что поле смещений для такого источника будет аналогично полю смещений двух равных по величине взаимно-перпендикулярных двойных сил растяжения и сжатия без момента, направленных под углом 45° к площадке разрыва.

Согласно А. В. Введенской, эти силы равны и противоположны по направлению тем силам, которые до появления разрыва определяли в сплошной среде в каждой точке будущего разрыва тензор напряжений, снимаемых в момент появления разрыва, и, следовательно, эта система сил в пределах каждой элементарной площадки $d\Sigma$ образует тензор.

Система двух равных по величине перпендикулярных двойных сил без момента, полученная А. В. Введенской на основании теории дислокаций и предложенная в качестве силовой модели очага, на больших расстояниях по сравнению с величиной очага возбуждает такое же поле смещений, что и теоретическая модель очага в виде сферы малого радиуса, по поверхности которой действуют по направлению к центру силы сжатия и растяжения (рис. 4), построенная Хонда в результате анализа наблюдений над продольными и поперечными волнами.

Б. В. Костров в 1968—72 годах, рассмотрев общие принципы, лежащие в основе теории очага тектонического землетрясения, пришел к выводу, что очаг землетрясения представляет разрыв сплошности материала Земли по некоторой плоской площадке под действием тектонических напряжений. При этом разрыв, возникший в малой области, распространяется в среде со скоростью меньшей, чем скорость продольных волн.

Исследуя вопрос подбора теоретического очага землетрясения, поле смещений которого подобно наблюдаемому при землетрясении полю смещений объемных волн, Б. В. Костров показал, что такой подбор на основании только сейсмических наблюдений является неверным. Он предложил наблюдения над сейсмическими волнами использовать для получения некоторой интегральной характеристики очага землетрясения и с этой целью ввел понятие тензора сейсмического момента, который является обобщением величины сейсмического момента очага землетрясения.

2. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В ОЧАГАХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ АРМЕНИИ И МЕХАНИЗМ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

Нами проведено исследование 40 крупных землетрясений Армении и прилегающих областей Азербайджана, Грузии, Ирана и Турции, происшедших в период времени с 1959 по 1970 г. Исследуемая территория охватывает в основном Армянское нагорье и известна очень сильными землетрясениями в прошлом. Имеются сведения о разрушительных и сильных землетрясениях, происшедших на территории Армянского нагорья с начала нашего века.

Для определения элементов механизма очагов землетрясений использован метод А. В. Введенской, основанный на теории дислокаций. Изучение напряженного состояния в очагах землетрясений нами проводилось по распределению знаков смещений в первых вступлениях продольных волн. Данные о знаках первых смещений в продольных волнах взяты из сейсмограмм станций сейсмической сети Кавказа, станций телесеismicкой сети СССР, а также заимствованы из бюллетеней BCYS и Summagi.

Все определения динамических параметров очагов землетрясений производились в стереографической проекции на сетке Вульфа. Построения велись для верхней полусферы. Положение каждой условной точки, соответствующей определенной станции, на сетке Вульфа определено по двум угловым координатам: азимуту этой станции относительно эпицентра землетрясения и углу выхода продольной волны из очага землетрясения. Углы выхода из очага продольных волн при близких эпи-

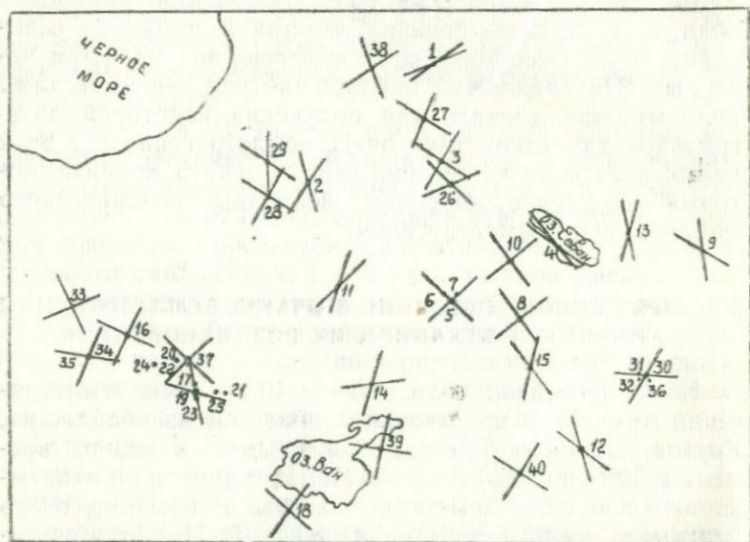


Рис. 6. Ориентация плоскостей разрывов в очагах землетрясений Армянского нагорья.

центральных расстояниях ($\Delta \leq 800$ км) определены путем геометрического расчета по известным глубине залегания очага землетрясения, эпицентральному расстоянию, а также скоростному разрезу земной коры. При больших эпицентральных расстояниях ($\Delta > 800$ км) угол выхода из очага продольных волн определялся из графика зависимости угла падения волн Р от эпицентрального расстояния.

Азимут с эпицентра на сейсмическую станцию при близких эпицентральных расстояниях определялся по карте, путем измерения угла между направлениями на север и на сейсмическую станцию. При больших эпицентральных расстояниях азимут с эпицентра на станцию определялся на сетке Вульфа, по известным координатам эпицентра землетрясения и эпицентральному расстоянию.

Модель очага землетрясений была принята в виде разрыва, сопровождающегося скольжением в плоскости

разрыва. Направление этого разрыва однозначно не определяется. Плоскостью разрыва в очаге землетрясения в равной мере могут быть оба разрыва, определяемые нодалными плоскостями $y=0$ и $z=0$.

В таблице 4 и на рисунке 6 даны результаты определения положений двух возможных плоскостей разрывов в очагах исследованных землетрясений. Для обеих возможных плоскостей в таблице 4 даны азимут падения плоскости разрыва A_z , угол ее падения α , то есть угол, образованный плоскостью разрыва с горизонтальной плоскостью, и угол между направлением падения плоскости разрыва и направлением движения верхнего крыла в этой плоскости разрыва (β_I и β_{II}). Возможные плоскости разрыва условно обозначены I и II. В тех случаях, когда нодалные плоскости невозможно было провести однозначно, в таблице даны все возможные варианты, а на рисунке 6 — только вариант, указанный в первой строке таблицы. На рисунке 6 не показаны положения плоскостей разрывов в очагах повторных толчков землетрясений. Эти данные приведены в таблице 4.

Таблица 4

Ориентация разрывов в очагах землетрясений

Дата и время возникновения землетрясения	Плоскость I			Плоскость II			Число знаков	Число несогласующихся знаков
	A_z^0	α	β	A_z^0	α	β		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
24/I 1959г. 16 ч.58 м ^в	156	40	6	329	51	4	9	1
29/III 1961 г. 07ч. 29м.	163	30	50	37	72	25	8	0
	294	42	38	68	58	29	8	0
	314	80	79	222	80	79	8	0
3/XII 1961 г. 18 ч.31 м.	215	74	68	120	70	72	24	3
10/III 1962 г. 07ч. 18 м.	320	43	74	128	80	42	10	0
4/IX 1962 г. 22 ч.59 м.	224	78	78	316	76	77	47	3
11/IX 1962 г. 00 ч.17 м.	326	58	42	204	50	46	20	1
19/IX 1962 г. 14 ч.13 м.	230	80	70	137	70	79	8	0
	288	34	31	71	62	19	8	0
9/X 1962 г. 06 ч.56 м.	329	70	79	234	80	69	6	0
18/II 1963 г. 14 ч.03 м.	354	52	39	122	52	38	9	0
17/IV 1963 г. 16 ч.25 м.	55	80	75	324	76	80	7	0
	60	50	39	293	54	37	7	0
	225	46	26	9	50	25	7	0

1	2	3	4	5	6	7	8	9
9/X 1963 г. 04 ч.36 м.	291	80	5	137	11	25	10	0
	316	66	11	111	26	23	10	0
31/XII 1963 г. 15 ч.18 м.	76	64	20	217	32	33	11	1
	41	50	84	135	86	49	11	1
5/II 1964 г. 11 ч.27 м.	285	45	17	82	47	16	9	0
5/VI 1964 г. 00 ч.11 м.	352	70	37	107	42	59	28	2
23/VII 1964 г. 23 ч.33 м.	328	40	41	195	61	28	4	0
	232	30	29	18	64	16	4	0
	354	70	58	252	60	66	4	0
31/VIII 1965 г. 07 ч.29 м.	296	84	66	202	66	82	50	5
7/III 1966 г. 01 ч.16 м.	11	76	80	278	80	75	72	14
27/IV 1966 г. 19 ч.48 м.	307	64	81	40	82	64	50	6
19/VIII 1966 г. 12 ч.22 м.	106	50	49	348	61	43	97	10
19/VIII 1966 г. 13 ч.15 м.	238	60	61	134	66	57	20	2
19/VIII 1966 г. 13 ч.54 м.	302	66	77	37	78	65	35	3
19/VIII 1966 г. 14 ч.17 м.	10	80	58	274	58	78	19	2
19/VIII 1966 г. 18 ч.41 м.	296	72	80	28	80	72	12	0
20/VIII 1966 г. 11 ч.59 м.	304	64	70	204	72	62	74	10
20/VIII 1966 г. 12 ч.01 м.	344	66	72	246	74	65	10	1
30/I 1967 г. 01 ч.20 м.	224	70	41	336	45	60	47	8
29/VI 1967 г. 08 ч.22 м.	30	78	61	294	62	76	25	3
25/V 1968 г. 00 ч.29 м.	298	80	85	29	86	80	22	1
26/V 1968 г. 05ч. 34 м.	91	82	14	211	16	58	20	1
9/VI 1968 г. 00ч. 56 м.	303	50	53	186	62	43	76	12
1/IX 1968 г. 05ч. 39 м.	350	56	72	249	75	54	53	7
16/IX 1968 г. 07ч. 10 м.	351	47	14	192	45	15	15	0
	281	52	50	38	60	45	15	0
18/IX 1968 г. 06ч. 17 м.	334	54	88	242	88	54	12	0
24/IX 1968 г. 04ч. 19 м.	7	70	57	110	60	66	28	6
25/IX 1968 г. 20ч. 52 м.	150	72	69	52	70	70	19	0
	57	89	65	149	66	88	19	0
1/X 1968 г. 18ч. 16 м.	320	44	64	211	72	41	15	2
10/IX 1969 г. 12ч. 13 м.	46	78	71	312	72	78	56	8
3/I 1970 г. 06ч. 54 м.	238	74	54	340	56	70	48	5
17/II 1970 г. 02ч. 59 м.	282	80	87	192	82	79	27	3
14/III 1970 г. 01ч. 51 м.	35	88	53	301	54	87	52	6

При рассмотрении плоскостей разрывов, представленных на рисунке 6, можно отметить, что в основном направление одной из плоскостей разрыва в очагах землетрясений примерно совпадает с направлением известных тектонических разломов на исследуемой территории. При этом падение плоскостей разрывов в основном крутое. Из 102 возможных плоскостей разрыва 83 имеют углы падения $\geq 50^\circ$; 16 имеют углы падения от 30 до 47° и только в 3 случаях они залегают почти горизонтально.

Согласно значениям углов β_I и β_{II} , в очагах землетрясений и их последующих толчков преобладают движения в основном типа сдвигов. Действительно, в 67 случаях преобладают компоненты подвижки по простиранию плоскости разрыва, а в 35 случаях преобладают компоненты подвижки по падению плоскости разрыва.

Выяснив положение нодальных линий на сетке Вульфа, а следовательно, и положение их полюсов, мы определили направления осей напряжений сжатия и растяжения, а также направления осей промежуточного или нулевого напряжения. Полученные результаты сведены в таблицу 5. В этой таблице даны значения азимутов A_z осей сжимающего, растягивающего и промежуточного (нулевого) напряжений, а также значения углов падения этих осей, то есть углов, составленных этими осями с горизонтальной плоскостью. При этом положение осей напряжений определено однозначно, согласно методу А. В. Введенской.

Таблица 5

Ориентация напряжений в очагах землетрясений

Дата и время возникновения землетрясения	Напряжения					
	сжатия		растяжения		промежуточное	
	A_z^o	e^o	A_z^o	e^o	A_z^o	e^o
1	2	3	4	5	6	7
24/I 1959 г. 16 ч. 58 м.	304	83	152	5	62	3
29/III 1961 г. 07 ч. 29 м.	199	22	70	57	299	23
	16	63	270	8	174	25
	178	0	268	15	88	75
3/XII 1961 г. 18 ч. 31 м.	168	27	77	2	342	64
10/III 1962 г. 07 ч. 18 м.	8	22	256	40	120	41

1	2	3	4	5	6	7
4/IX 1962 г. 22 ч. 59 м.	179	1	271	18	94	72
11/IX 1962 г. 00 ч. 17 м.	172	4	269	56	80	35
19/IX 1962 г. 14 ч. 13 м.	185	21	92	7	344	67
	32	67	266	14	170	17
9/X 1962 г. 06 ч. 56 м.	280	21	14	7	122	68
18/II 1963 г. 14 ч. 03 м.	328	1	58	60	238	29
17/IV 1963 г. 16 ч. 25 м.	10	18	279	3	182	73
	353	61	87	2	178	29
	207	2	305	72	116	19
9/X 1963 г. 04 ч. 36 м.	116	35	285	55	22	4
	128	19	338	68	221	10
31/XII 1963 г. 15 ч. 18 м.	109	66	241	16	337	17
	97	31	351	24	229	49
5/II 1964 г. 11 ч. 27 м.	274	1	9	78	184	12
5/VI 1964 г. 00 ч. 11 м.	145	17	34	51	248	35
	357	11	243	63	92	24
	349	67	211	18	116	15
23/VII 1964 г. 23 ч. 33 м.	307	37	211	5	115	53
31/VIII 1965 г. 07 ч. 29 м.	158	11	252	21	40	66
7/III 1966 г. 01 ч. 16 м.	324	18	54	3	155	72
27/IV 1966 г. 19 ч. 48 м.	356	24	262	12	147	62
19/VIII 1966 г. 12 ч. 22 м.	139	7	40	52	231	35
19/VIII 1966 г. 13 ч. 15 м.	278	3	185	40	10	50
19/VIII 1966 г. 13 ч. 54 м.	352	26	258	7	154	63
19/VIII 1966 г. 14 ч. 17 м.	328	30	229	14	116	56
19/VIII 1966 г. 18 ч. 41 м.	344	19	252	4	148	70
20/VIII 1966 г. 11 ч. 59 м.	346	5	251	33	84	56
20/VIII 1966 г. 12 ч. 01 м.	26	5	292	30	126	60
30/I 1967 г. 01 ч. 20 м.	16	14	268	48	116	38
29/VI 1967 г. 08 ч. 22 м.	346	29	250	10	142	58
25/V 1968 г. 00 ч. 29 м.	344	10	253	4	140	80
26/V 1968 г. 05 ч. 34 м.	106	52	260	35	359	14
9/VI 1968 г. 00 ч. 56 м.	337	7	237	52	73	37
1/IX 1968 г. 05 ч. 39 м.	33	12	295	35	140	52
16/IX 1968 г. 07 ч. 10 м.	181	1	278	80	91	11
	343	53	248	5	154	37
18/IX 1968 г. 06 ч. 17 м.	24	23	282	26	151	54
24/IX 1968 г. 04 ч. 19 м.	150	6	55	37	248	53
25/IX 1968 г. 20 ч. 52 м.	102	28	12	1	278	62
	100	18	195	15	326	66
1/X 1968 г. 18 ч. 16 м.	2	17	252	46	105	39
10/IX 1969 г. 12 ч. 13 м.	1	21	268	4	170	68
3/I 1970 г. 06 ч. 54 м.	22	11	282	37	126	51
17/II 1970 г. 02 ч. 59 м.	328	5	236	8	64	77
14/III 1970 г. 01 ч. 51 м.	356	26	254	22	130	54

Согласно данным, приведенным в таблице 5, оси напряжений сжатия, действовавших в очагах исследованных землетрясений, в основном ориентированы горизонтально, угол падения оси сжатия только в десяти случаях из 51 превышает 30° . При этом направление оси сжимающего напряжения примерно перпендикулярно простиранию структур. Как следует из таблицы, ориентация осей растяжения во всех рассмотренных случаях не одинаковая. В 30 случаях ось растяжения составляет с горизонтальной плоскостью углы не более 30° , а в 21 случае эти углы имеют значения от 33 до 80° . Оси промежуточных напряжений рассмотренных землетрясений ориентированы, в основном, в вертикальном направлении. В 27 случаях угол падения оси промежуточного напряжения превышает 50° .

С целью выявления связи между динамическими параметрами очагов главного толчка землетрясения и его афтершоками исследованы механизмы очагов игдырского землетрясения 1962 г., землетрясения в Варто 1966 г., зангезурского и турецкого землетрясений 1968 г. Как следует из таблиц 4 и 5, для рассмотренных четырех землетрясений абсолютной идентичности в расположении нодальных плоскостей и осей напряжений в очагах главного толчка землетрясения и его основных афтершоков не наблюдается.

3. МЕХАНИЗМ ОЧАГА ЕРЕВАНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 16 ИЮНЯ 1973 ГОДА

16 июня 1973 г. в 8 часов 56 минут гринвического времени в районе г. Ереван произошло землетрясение, которое ощущалось в г. Ереване силой в 5—6 баллов.

Это землетрясение было записано всеми сейсмическими станциями Кавказа и некоторыми телесеismicкими станциями Советского Союза и зарубежных стран. Наибольшая дальность регистрации составляет $25,1^\circ$ (станция Мокса). Самой близко расположенной к эпицентру станцией является сейсмическая станция «Ереван» ($\Delta = 9$ км).

Магнитуда ереванского землетрясения, определенная по данным восьми кавказских станций («Богдановка», «Бакуриани», «Гори», «Горис», «Кировабад», «Лагодехи», «Ленинакан», «Тбилиси»), в среднем равна $M = 4,0$.

Среднее значение класса энергии этого землетрясения, определенного по данным 11 станций («Абастумани», «Ахалкалаки», «Бакуриани», «Богдановка», «Гори», «Горис», «Душети», «Лагодехи», «Ленинакан», «Они», «Ткибули»), оказалось равным $K=11$.

Положение эпицентра и глубина залегания очага ереванского землетрясения 16 июня 1973 г. нами определены по палетке годографов для территории Армянского нагорья, а также по годографу Левицкой-Лебедевой и методу Вадати. Использованы сейсмограммы всех сейсмических станций Кавказа. Определение координат эпицентра и глубины залегания очага землетрясения 16 июня 1973 г. путем использования палетки годографов Н. К. Карапетян для территории Армянского нагорья для различных глубин очага показало, что наилучшее соответствие получается при использовании годографа для глубины залегания очага в 10 км, а затем несколько худшее для 20 км.

Для этих же глубин получилось лучшее соответствие также для величин моментов возникновения землетрясения 16 июня 1973 г., вычисленных как средние из времен пробега продольных волн согласно палетке годографов для различных глубин очага.

Следовательно, глубина залегания очага землетрясения 16 июня 1973 г. находится между 10 и 20 км и ближе к 10 км.

Действительно, глубина очага этого землетрясения, определенная по временам пробега прямых волн до сейсмической станции «Ленинакан», получилась равной 12 км, а по известной формуле Н. В. Шебалина — 9,4 км.

Эпицентр землетрясения принят в центре тяжести области пересечений засечек, полученных при использовании годографов для глубины залегания очага в 10 км. Эпицентр расположен в 9 км севернее г. Еревана. Координаты эпицентра при этом имеют следующие значения: $\varphi = 40^{\circ}15'$, $\lambda = 44^{\circ}31'$. Эпицентр ереванского землетрясения, определенный нами по методу Вадати, имеет координаты $\varphi = 40^{\circ}15'$, $\lambda = 44^{\circ}23'$. Таким образом, определенный по методу Вадати эпицентр расположен на той же широте, но на 8 минут западнее эпицентра, определенного по палетке годографов для Армянского нагорья.

Следует отметить, что при определении эпицентра землетрясения по годографу Левицкой-Лебедевой для

всего Кавказа получается большой разброс засечек, проведенных по эпицентральным расстояниям, а также величин момента возникновения землетрясения, вычисленных по временам пробега продольных волн.

Исследование механизма очага ереванского землетрясения 16 июня 1973 года проведено по методу А. В. Введенской.

Изучение напряженного состояния в очаге ереванского землетрясения нами проводилось по распределению знаков смещений в первых вступлениях продольных волн. Для проведения нодальных линий использованы знаки смещений в продольных волнах на сейсмограммах 14 станций сейсмической сети Кавказа и одной телесей-

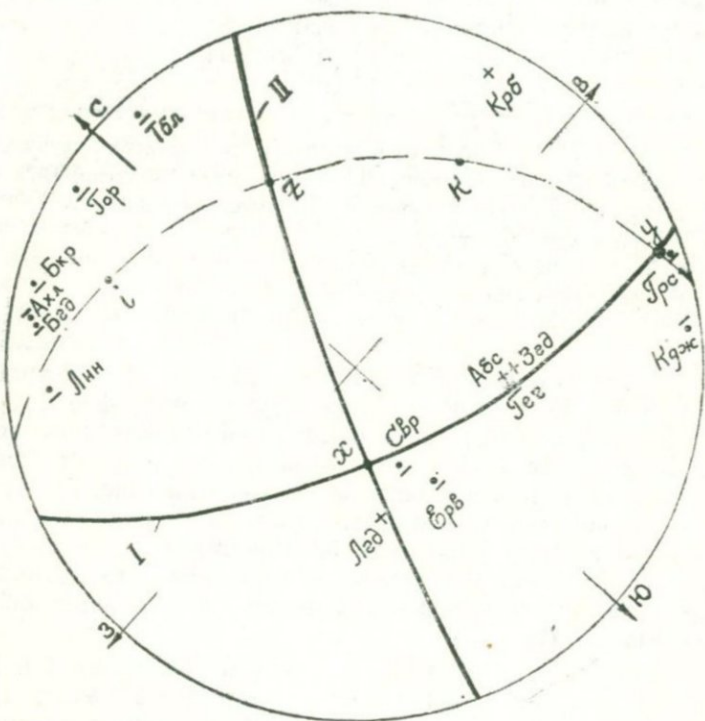


Рис. 7. Построение нодальных линий волн Р для ереванского землетрясения 16 июня 1973 года.

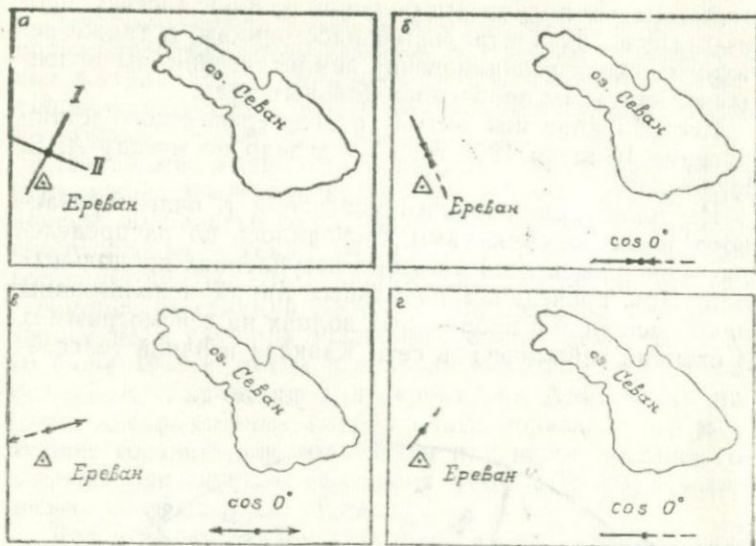


Рис. 8. Ориентация плоскостей разрывов и главных осей напряженного состояния в очаге ереванского землетрясения 16 июня 1973 г.
 а) ориентация двух возможных плоскостей разрывов,
 б) ориентация осей сжатия,
 в) ориентация осей растяжения,
 г) ориентация промежуточных осей.

смической станции «Свердловск» ($\Delta = 19,6^\circ$). Построения велись на сетке Вульфа для верхней полусферы.

Согласно методу А. В. Введенской, проведенные нодальные линии $y=0$ и $z=0$ в равной мере могут быть плоскостью разрыва в очаге землетрясения (рис. 7). Следовательно, для ереванского землетрясения плоскость разрыва в очаге имеет или близширотное направление или же близмеридиональное направление. Эти возможные плоскости разрыва на рисунках 7 и 8а условно обозначены I и II.

Азимуты простираний плоскостей разрывов I и II имеют значения $A_I = 114^\circ \pm 0^\circ$ и $A_{II} = 28^\circ \pm 2^\circ$. Углы падения этих плоскостей, т. е. углы, образованные плоскостями разрывов с горизонтальной плоскостью, равны, соответственно, $\epsilon_I = 60^\circ$ и $\epsilon_{II} = 84^\circ$, значит, падение плоскостей разрывов в обоих случаях крутое. Первая плос-

жность разрыва падает к северо-востоку, а вторая — к юго-востоку. Движение всякого крыла направлено вверх.

Определены направления осей главных напряжений в очаге ереванского землетрясения. Ось сжатия ориентирована к северо-западу (рис. 8б). Азимут оси сжатия составляет $A_1 = 337^\circ$. Угол падения этой оси, то есть угол, составленный с горизонтальной плоскостью, равен $e_1 = 16^\circ$. Ось растяжения направлена к северо-востоку (рис. 8в). Азимут этой оси равен $A_k = 76^\circ$, угол падения $e_k = 24^\circ$. Промежуточная ось или ось нулевых напряжений имеет азимут $A_x = 219^\circ$ и угол падения $e_x = 68^\circ$ (рис. 8г). Таким образом, оси напряжений сжатия и растяжения, действовавших в очаге ереванского землетрясения 16 июня 1973 г., ориентированы горизонтально, а ось нулевых напряжений ориентирована вертикально.

Компоненты подвижки по простиранию плоскости I разрыва составляют $+0,995$, а II разрыва — $-0,857$. Компоненты подвижки по падению плоскости I разрыва равны $+0,105$, II разрыва — $+0,515$. Таким образом, в обоих случаях преобладают компоненты подвижки по простиранию плоскости разрыва. Следовательно, в очаге ереванского землетрясения имели место движения типа сдвигов. При этом в случае I разрыва произошел чистый правосторонний сдвиг, а в случае разрыва II — левосторонний сдвиг, но со значительной долей взброса-надвига.

Глава 4

СЕЙСМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ АРМЯНСКОЙ ССР И ПРИЛЕГАЮЩИХ К НЕЙ ОБЛАСТЕЙ. СЕЙСМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ

Сейсмический режим определенного региона представляет собой закономерности проявлений пространственно-временной совокупности всех землетрясений, происшедших в этом регионе. Знание сейсмического режима имеет существенное определяющее значение при проведении сейсмического районирования и прогнозе землетрясений.

В этой главе приводятся некоторые результаты изучения сейсмического режима Армении и прилегающих областей Азербайджана, Грузии, Турции и Ирана по методике, разработанной Ю. В. Резниченко. Для исследуемой области определены основные параметры сейсмического режима, построены карты сейсмической активности, максимальных возможных землетрясений по сейсмическим и геолого-геофизическим данным, а также карты сейсмической сотрясаемости по сейсмолого-геолого-геофизическим данным. Рассмотрены вопросы сейсмического районирования и микрорайонирования.

1. СЕЙСМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ АРМЕНИИ И ПРИЛЕГАЮЩИХ ОБЛАСТЕЙ

Определение основных параметров сейсмического режима — углового коэффициента графика повторяемости γ , сейсмической активности A , максимального возможного землетрясения $K_{\max}$ и среднего значения меры рассеяния повторяемости землетрясений R — производилось по графикам повторяемости, построенным нами за различные периоды времени.

Анализ значений углового коэффициента графика повторяемости для различных периодов времени показал, что для получения достоверных результатов для всей исследуемой территории необходим период времени наблюдений не менее 15 лет. Значения γ , определенные из графиков повторяемости, построенных без повторных толчков землетрясений методом суммирования (распределение землетрясений по величине K берется в виде суммирования от данного класса и выше) для периодов времени наблюдений 15, 16 и 17 лет, получились равными $0,47 \div 0,49$, а методом распределения (поклассовое распределение землетрясений по величине K) — $0,45 \div 0,47$. При построении графиков повторяемости без исключения повторных толчков, как и следовало ожидать, наклон графиков повторяемости за те же периоды времени получился несколько больше, а именно — при использовании метода суммирования $\gamma = 0,50 \div 0,51$, метода распределения $\gamma = 0,48 \div 0,50$.

Нами построен также график повторяемости, где каждый энергетический класс K взят за один определенный период времени, в котором данный K является представительным. Полученные из графика повторяемости, построенного таким путем по данным наблюдений за 290 лет (с 1679—1968 гг.), значения γ равны 0,52 (по методу суммирования) и 0,51 (по методу распределения). Согласно этому графику, максимальным возможным землетрясением для исследуемой территории является землетрясение с $K_{\max} = 16$.

За единицу сейсмической активности A_{10} нами принято среднее годовое число землетрясений с энергией, равной 10^{10} дж, приходящееся на площадь 1000 кв. км. Этот уровень активности для всей исследуемой территории при периодах времени наблюдений 15—17 лет в случае, когда повторные толчки исключены при использовании метода суммирования, составляет $0,08 \div 0,09$, а при использовании метода распределения — $0,05 \div 0,06$. В случае, когда повторные толчки не исключены, уровень сейсмической активности равен соответственно $0,09 \div 0,11$ (по методу суммирования) и $0,06—0,07$ (по методу распределения).

Средние значения меры рассеяния повторяемости землетрясений $\bar{R}$, определенные нами, как для всей исследуемой территории, так и для отдельных ее частей за разные периоды времени наблюдений, при исключе-

нии из рассмотрения повторных толчков землетрясений, имеют примерно одинаковые значения в интервале от 1,0 до 1,4.

Согласно графикам временного хода сейсмической активности $A_{10}(t)$ и наклона графика повторяемости $\gamma(t)$, с увеличением периода времени наблюдений значение A_{10} увеличивается, а $\gamma(t)$ — уменьшается.

Карты сейсмической активности для всей исследуемой территории построены за периоды времени с 1952—1967 гг. (т. е. до зангезурского землетрясения 9/VI-1968 г.) и с 1952—1968 гг. Карты сейсмической активности построены в трех вариантах: 1) без повторных толчков, 2) с повторными толчками, 3) с учетом процента исключенных повторных толчков.

Для построения карт сейсмической активности использован метод суммирования с постоянной точностью. Число эпицентров землетрясений с $K \geq 10$ на площади осреднения круговой палетки принято равным 5. Изо-

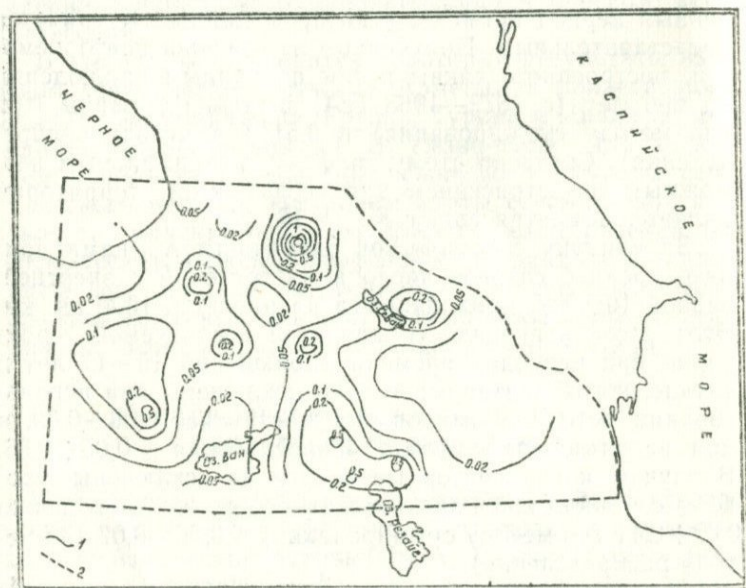


Рис. 9. Карта сейсмической активности Армянского нагорья:
1 — изолинии A , 2 — границы исследуемой территории.

линии на картах сейсмической активности проведены для значений 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5.

На картах сейсмической активности, при построении которых повторные толчки исключены (рис. 9), наибольшая сейсмическая активность наблюдается на Ахалкалакском нагорье в небольшой зоне, расположенной на границе между Арменией и Грузией. В этой зоне на каждые 1000 кв. км приходится ежегодно два землетрясения с $E \geq 10^{10}$ дж. На карте сейсмической активности, построенной по наблюдениям за 1952÷1968 гг., внутри этой зоны имеется совсем маленькая полоска площадью примерно в 150 кв. км, где сейсмическая активность доходит до 5.

Следующими по активности зонами в пределах СССР являются небольшая область, расположенная вблизи г. Еревана и участок, расположенный к северо-востоку от озера Севан, между г. Кировабадом и озером Севан. В этих двух зонах сейсмическая активность равна 0,2. В западной, зарубежной части исследуемой территории имеются довольно обширные зоны с $A=0,2$ и отдельные небольшие площадки с $A=0,5$ в районе Варто и севернее оз. Резайе.

На картах сейсмической активности, при построении которых повторные толчки не исключены, естественно, наблюдается повышение сейсмической активности в местах крупных землетрясений, сопровождавшихся повторными толчками с $K \geq 10$. Так, например, в районе зангезурского землетрясения 9 июня 1968 г. сейсмическая активность равна 0,5.

На картах сейсмической активности, построенных с учетом процента исключенных повторных толчков, искажающее влияние повторных толчков, в некоторой степени сглаживается.

При сравнении карт сейсмической активности, построенных без повторных толчков, по наблюдениям за 1952÷1967 гг. (т. е. до зангезурского землетрясения 9/VI 1968 г.) и за 1952÷1968 гг., можно отметить, что зангезурское землетрясение не вызвало существенных изменений в пространственном распределении сейсмической активности на исследуемой территории.

Построение карт максимальных возможных землетрясений по сейсмологическим данным нами проводилось по методике, также разработанной Ю. В. Ризниченко.

Используя корреляционную зависимость $\lg \bar{A}(K_{\max})$ для Средней Азии, мы построили карты максимальных возможных землетрясений для Армении и прилегающих областей в двух вариантах: в первом варианте применялись радиусы площадок подготовки землетрясений для Средней Азии, во втором варианте были приняты радиусы для Армянского нагорья. Используя данные о 22 сильных землетрясениях, происшедших на исследуемой территории, нами проведена корреляция $\lg \bar{A}$ с $K_{\max}$ и получено уравнение прямой регрессии для территории Армении в виде:

$$\lg \bar{A} = 2,75 + 0,14(K_{\max} - 15) \quad (4.1)$$

Полученное уравнение регрессии использовано нами для построения карты максимальных возможных землетрясений. При этом радиус соответствия определен нами по сопрягающей кривой для двух прямых

$$r^3 = 0,315 \cdot 10^{K-10} \text{ и } r = 20 \text{ км.}$$

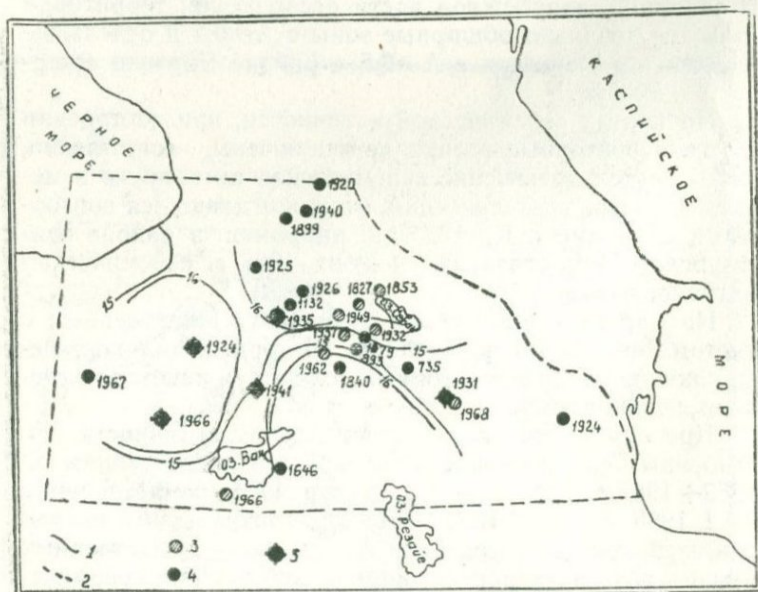


Рис. 10. Карта $K_{\max}$ (A) для Армянского нагорья.

1 — изолинии $K_{\max}$, 2 — границы исследуемой территории.

Эпицентры землетрясений: 3 — с $13 \leq K < 14$, 4 — с $14 \leq K < 15$, 5 — с $K \geq 15$.

На рисунке 10 дана карта максимальных возможных землетрясений Армении, при построении которой повторные толчки исключены и использована прямая регрессии для Армянского нагорья.

Построена также карта максимальных возможных землетрясений на территории Армении по среднеазиатско-японской корреляционной зависимости $\lg \bar{A}(K_{\max})$.

На построенные карты $K_{\max}$ нанесены все известные сильные землетрясения, произошедшие в этом регионе.

Рассматривая карты максимальных возможных землетрясений для территории Армении, построенные по различным корреляционным зависимостям $\lg \bar{A}(K_{\max})$ и различным γ , можно отметить, что на карте $K_{\max}$ построенной по корреляционной зависимости $\lg \bar{A}(K_{\max})$ для Армянского нагорья, максимальное возможное землетрясение имеет $K_{\max} = 16$, на картах $K_{\max}$, построенных по среднеазиатской и среднеазиатско-японской зависимостям $K_{\max} = 17$, что является мало вероятным, так как за все историческое прошлое здесь такой силы землетрясения ($K_{\max} = 17$) не наблюдалось.

Следует отметить также, что при сопоставлении расположения полученных изолиний $K_{\max}$ с эпицентрами крупных землетрясений прошлых лет, произошедших на исследуемой территории, наилучшее соответствие (как и следовало ожидать), наблюдается на карте $K_{\max}$, при построении которой была использована полученная нами для Армении корреляционная зависимость между средней долговременной сейсмической активностью и $K_{\max}$.

2. МАКСИМАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПО СЕЙСМОЛОГО-ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Величина максимального возможного землетрясения в определенном регионе может быть значительно уточнена, если при ее определении использовать не только сейсмическую информацию, но и геолого-геофизические данные.

Ю. В. Ризниченко разработал метод построения карты максимальных возможных землетрясений по комплексным сейсмолого-геолого-геофизическим данным. Согласно этому методу, производится сопоставление определенного геологического или геофизического пара-

метра Φ непосредственно с величиной энергетического класса K для наиболее надежных и крупных землетрясений исследуемого региона и строится корреляционное поле в системе координат $\lg \Phi, K$. Затем определяется положение предельного контура $K_{\max}(\Phi)$ и таким образом устанавливается связь геологического или геофизического параметра Φ с максимальными землетрясениями $K_{\max}$.

Имея корреляционные зависимости максимальных возможных землетрясений от тех или иных геолого-геофизических параметров, строятся отдельные карты максимальных возможных землетрясений по каждому из этих параметров.

Расчет в каждой точке максимального возможного землетрясения по комплексным сейсмолого-геолого-геофизическим данным производится по формуле:

$$K_{\max}^k = \frac{K_{\max} - \frac{n}{\sum_{i=1}^n} K_{\max i} P_i}{1 + \frac{n}{\sum_{i=1}^n} P_i} \quad (4.2)$$

где P_i — веса определения $K_{\max}$ по геолого-геофизическим данным. Вес сейсмологического определения $K_{\max}$ принят равным 1.

Нами проведено непосредственное сопоставление геофизических и геологических параметров с величиной K для наиболее крупных землетрясений Армении. В таблице 6 для этих землетрясений даны значения магнитуды M , энергетического класса K и балльности в эпицентре J_0 .

Для определения максимального возможного землетрясения $K_{\max}$ на территории Армянской ССР по гравиметрическим данным нами использована карта аномалий силы тяжести Δg в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя $2,67 \text{ г/см}^3$. По этой карте определялось среднее значение градиента Δg в области эпицентров крупных землетрясений исследуемой территории. С этой целью использована методика Ю. В. Ризниченко, а именно: для каждого крупного землетрясения на карте проводился круг радиуса R области, ответственной за землетрясение данного энергетического класса и с центром в эпицентре этого землетрясения.

Определялось максимальное значение разности Δg на проведенном круге и затем среднее значение модуля градиента Δg , которое условно принято равным $\frac{\Delta g}{2R}$.

Построения велись для двух случаев. В первом случае радиусы R площадок, ответственных за землетрясения, определялись по формуле Ю. В. Ризниченко для среднеазиатско-японских землетрясений:

$$\lg R = 1,505 + 0,111(K - 15).$$

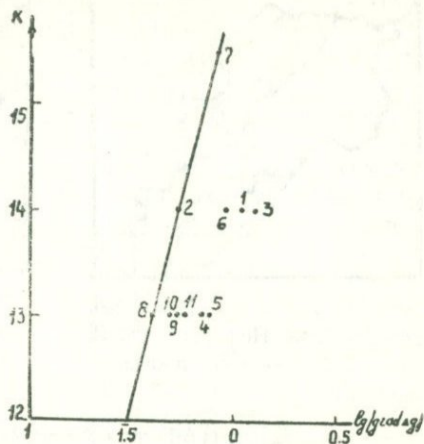


Рис. 11. Корреляция величины K с $|\text{grad } \Delta g|$. R — для среднеазиатско-японских землетрясений.

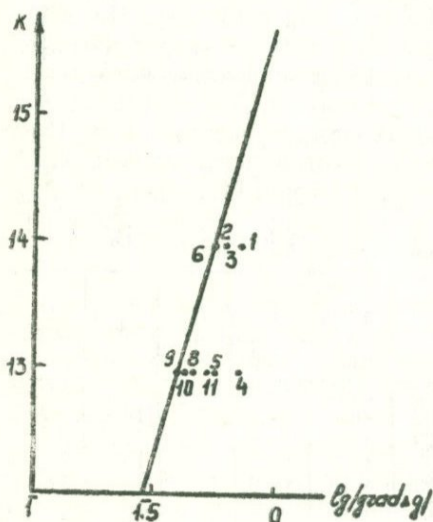


Рис. 12. Корреляция величины K с $|\text{grad } \Delta g|$. Использованы R для землетрясений Армении.

Во втором случае использованы радиусы R , полученные нами для территории Армянского нагорья:

$$R = 30 + 20(K_{\text{max}} - 12).$$

Используя данные о сильных землетрясениях Армении (таблица 6), нами проведена корреляция $\lg/\text{grad } \Delta g$ с K_{max} (рис. 11, 12) и получены уравнения регрессии для указанных выше двух случаев.

Эти уравнения, соответственно, имеют вид:

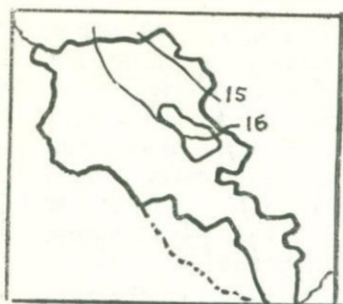


Рис. 14. Карта $K_{\max} |\text{grad } \Delta g|$ для Армении. Использованы R для среднеазиатско-японских землетрясений.

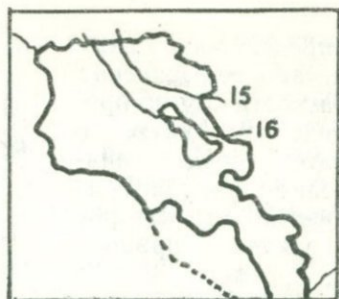


Рис. 13. Карта $K_{\max} |\text{grad } \Delta g|$ для Армении. Использованы R для землетрясений Армении.

$$\lg |\text{grad } \Delta g| = 1,84 + 0,12(K_{\max} - 15), \quad (4.3)$$

$$\lg |\text{grad } \Delta g| = 1,88 + 0,14(K_{\max} - 15) \quad (4.4)$$

Используя полученные зависимости (4.3) и (4.4), а также карту аномалий силы тяжести способом, аналогичным построению карты $K_{\max} (\bar{A})$, для рассмотренных двух случаев построены карты максимальных возможных землетрясений для территории Армянской ССР по сейсмогравитационным данным (рис. 13, 14). На этих картах проведены изолинии 15 и 16-го энергетических классов. При этом изолиния 15-го энергетического класса в случае использования радиусов R , определенных для среднеазиатско-японских землетрясений (рис. 13), проходит выше, чем в случае, когда использованы значения R для Армянского нагорья (рис. 14).

Таблица 6

Сильные землетрясения Армении

Название землетрясения	Год	Координаты эпицентра		М	К	J_0
		Φ_N^0	λ_E^0			
Вайоцзорское	735	39,7	45,5	$5\frac{1}{2}$	14	8
Двинское	893	40,0	44,6	$5\frac{1}{2}$	14	8
Гаринское	1679	40,1	44,8	$5\frac{1}{2}$	14	8
Дарачичагское	1827	40,6	44,7	5	13	7
Чибухлинское	1853	40,6	44,9	5	13	7
Ленинаканское	1926	40,7	43,8	$5\frac{3}{4}$	14	8
Зангезурское	1931	39,3	46,0	$6\frac{3}{4}$	15,5	8—9
Кызыл-Дагское	1932	40,2	41,9	$5\frac{1}{4}$	13	7
Ереванское	1937	40,1	44,4	5	13	7
Бюраканское	1949	40,4	44,3	5	13	7
Зангезурское	1968	39,3	46,1	5	13	7—8

Для определения максимального возможного землетрясения по магнитометрическим данным использована карта аномального магнитного поля (ΔT_a) при относительной высоте съемки 1000—1200 м.

Построения велись тем же путем, что и в предыдущем случае при определении $K_{\max} |\text{grad } \Delta g|$.

Построены корреляционные поля K , $|\text{grad } T|$ также для двух случаев (рис. 15, 16) и получены уравнения сейсмомангнитного предельного контура, соответственно, в виде:

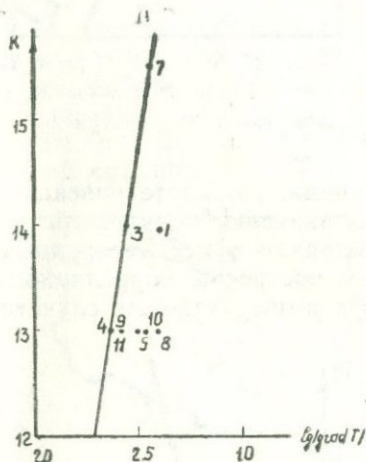


Рис. 15. Корреляция величины K с $|\text{grad } T|$. Использованы R для среднеазиатско-японских землетрясений.

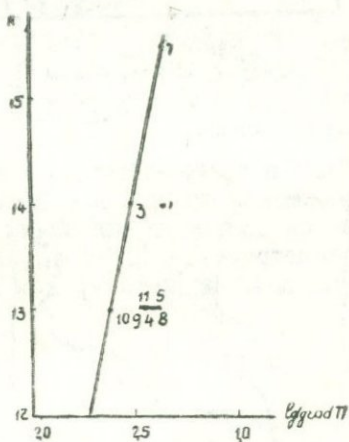


Рис. 16. Корреляция величины K с $|\text{grad } T|$. Использованы R для землетрясений Армении.

$$\lg |\text{grad } T| = 2,53 + 0,08 (K_{\max} - 15) \quad (4.5)$$

$$\lg |\text{grad } T| = 2,58 + 0,10 (K_{\max} - 15) \quad (4.6)$$

Используя полученные зависимости (4.5) и (4.6), а также карту аномального магнитного поля, построены карты максимальных возможных землетрясений для территории Армянской ССР по сейсмомангнитным данным (рис. 17, 18).

Согласно этим картам, изолинии 15 и 16 энергетических классов в случае использования R для среднеазиатско-японских землетрясений (рис. 17) расположены выше, чем соответствующие изолинии в случае, когда использованы радиусы R для землетрясений Армении (рис. 18).

В качестве изучаемого геологического параметра выбраны новейшие движения на территории Армянской

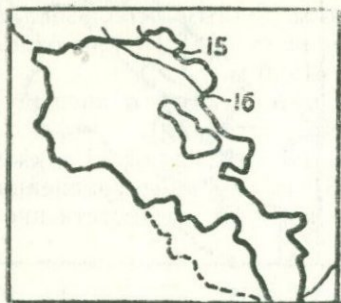


Рис. 17. Карта $K_{\max} |\text{grad } T|$ для Армении. Использованы R для среднеазиатско-японских землетрясений.

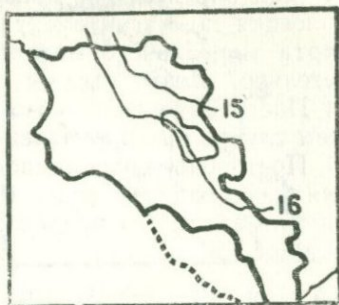


Рис. 18. Карта $K_{\max} |\text{grad } T|$ для Армении. Использованы R для землетрясений Армении.

ССР в неоген-четвертичное время. По карте новейших движений определены средние значения модулей градиентов амплитуд новейших поднятий в местах крупных землетрясений $|\text{grad } v|$, затем построены корреляционные поля $K, |\text{grad } v|$ для двух вышеуказанных случаев

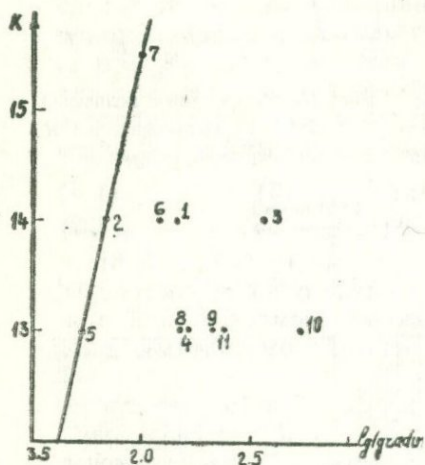


Рис. 19. Корреляция величины K с $|\text{grad } V|$. Использованы R для среднеазиатско-японских землетрясений.

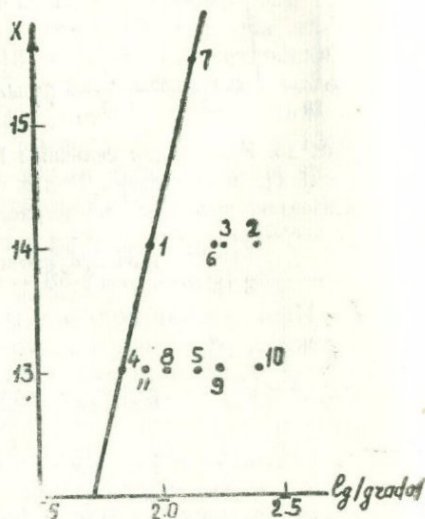


Рис. 20. Корреляция величины K с $|\text{grad } V|$. Использованы R для землетрясений Армении.

(рис. 19, 20) и получены уравнения предельного контура, соответственно, в виде:

$$\lg |\text{grad } v| = \bar{3},94 + 0,11(K_{\text{max}} - 15), \quad (4.7)$$

$$\lg |\text{grad } v| = \bar{2},08 + 0,12(K_{\text{max}} - 15) \quad (4.8)$$

Используя полученные зависимости (4.7) и (4.8), а также карту новейших движений, для территории Армянской ССР построены карты максимальных возможных землетрясений по этим данным (рис. 21, 22). В этом случае, как и в двух предыдущих, изолинии 15 и 16-го энергетических классов при использовании R для среднеазиатско-японских землетрясений располагаются выше (рис. 21), чем при использовании R для землетрясений Армении (рис. 22).

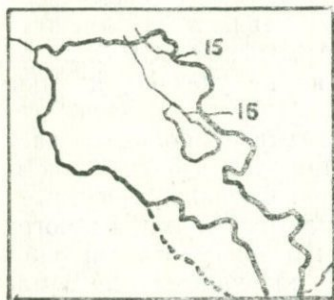


Рис. 21. Карта $K_{\text{max}} |\text{grad } V|$ для Армении. Использованы R для среднеазиатско-японских землетрясений.

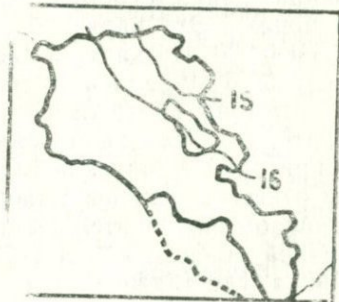


Рис. 22. Карта $K_{\text{max}} |\text{grad } V|$ для Армении. Использованы R для землетрясений Армении.

Таким образом, использование радиусов R среднеазиатско-японских землетрясений при построении карт максимальных возможных землетрясений для Армении вызывает искусственное повышение сейсмоопасности исследуемого региона.

По полученным в отдельных точках значениям K_{max} по сейсмогравитационным и сейсмоманнитным данным и новейших движений вычислены величины максимальных возможных землетрясений K_{max}^k по комплексу сейсмолого-геолого-геофизических данных.

3. СЕЙСМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ АРМЯНСКОЙ ССР

При проектировании зданий и сооружений, возводимых в сейсмических районах, основой для принятия величины сейсмической нагрузки служат карты сейсмического районирования. Таким образом, карта сейсмического районирования территории СССР является нормативным документом, обязательным для всех проектных и строительных организаций СССР при планировании, проектировании и осуществлении мероприятий по сейсмостойкому строительству.

На картах сейсмического районирования указана сила сотрясения на поверхности Земли ожидаемых землетрясений в баллах.

Первая карта сейсмического районирования СССР была опубликована в 1940 г. в «Инструкции проектирования зданий и сооружений, возводимых в сейсмических районах». Эта карта была составлена в масштабе 1:5 000 000. На карте в части Армянской ССР были выделены 6—9-балльные зоны, но не указано, к каким грунтам на карте отнесена балльность. Согласно этой карте, 6—7-балльная зона охватывает большую часть территории Армянской ССР. При этом к 6-балльной зоне отнесены районы Вайоцзора, Сисиана, известные в прошлом разрушительными землетрясениями, а к пограничной области к 6 и 7-балльным зонам отнесен район Двина, где также имели место разрушительные землетрясения. К восьмибалльной зоне отнесены районы Мегри, Каджарана и Кафана на юге республики и район Ленинакана, Спитака, Кировакана, Артика, В. Талина и Октемберяна на северо-западе республики. К девятибалльной зоне отнесены два небольших района, где при Зангезурском землетрясении 1931 г. наблюдались максимальные сотрясения в 9 баллов.

Второй вариант карты сейсмического районирования СССР был опубликован в 1951 г. в «Правилах проектирования и строительства в сейсмических районах СССР». На этой карте балльность также не отнесена к какому-либо определенному, конкретному грунту. В части Армянской ССР этот вариант карты сейсмического районирования сильно отличается от карты 1940 г. В этом втором варианте карты на территории Армянской ССР выделены 6—8-балльные зоны, вытянутые в направлении простираания Малого Кавказа. При этом

6-балльная зона занимает незначительную площадь на северо-востоке республики. Семибалльная зона охватывает значительную часть территории Армянской ССР и протягивается широкой полосой с севера на юг с озером Севан в середине и вдоль этого озера. Кроме этого, на юго-западе республики также имеется семибалльная зона, которая проходит полосой вдоль государственной границы, начинаясь сразу же за Ереваном, охватывая район Двина, Веди и продолжаясь в Нахичеванскую АССР. Между этими двумя семибалльными зонами расположена восьмибалльная, которая протягивается неравномерной по ширине полосой вдоль Малого Кавказа.

Третий вариант карты сейсмического районирования территории СССР был составлен в связи с разработкой «Норм и правил строительства в сейсмических районах СССР» и опубликован в 1957 г. в указанных нормах. Балльность на карте отнесена к средним грунтовым условиям. Эта карта сейсмического районирования, как и две предыдущие, составлена в очень мелком масштабе 1:5000000. В пределах Армянской ССР эта карта мало отличается от карты сейсмического районирования 1951 г. На ней имеются те же 6—8-балльные зоны, направленные по простиранию Малого Кавказа, но при этом проведено значительное расширение 8-балльной зоны за счет семибалльных, а именно северо-восточная граница восьмибалльной зоны проходит вдоль западного берега оз. Севан, а на юго-западе республики почти не осталось семибалльной зоны.

Работы по составлению IV уточненного варианта карты сейсмического районирования территории СССР были начаты в 1961 г. и завершены в конце 1966 г. В работе принимали участие все сейсмологические, геологические и геофизические учреждения АН СССР и АН союзных республик. Работы велись по единой «Инструкции» по сейсморайонированию, составленной ведущим Институтом физики Земли АН СССР с целью единого подхода к составлению карт сейсмического районирования территорий отдельных сейсмоактивных зон Советского Союза. Такая инструкция была разработана впервые и полностью себя оправдала, так как карты сейсморайонирования отдельных зон строились разными составителями и поэтому единость подхода к построению отдельных карт на местах в регионах имела существенное значение для дальнейшего составления сводной

обзорной карты сейсморайонирования территории СССР, которое проводилось уже в Москве, в Институте физики Земли АН СССР при участии всех ответственных за регионы составителей. Согласно этой «Инструкции», построение карты сейсмического районирования определенного региона проводилось на основании совместного анализа сейсмических, инженерно-сейсмологических и геологических материалов. При этом работы по сейсмическому районированию имели две стадии. На первой стадии по сейсмическим и геологическим данным решался вопрос прогноза места землетрясений, отнесенного к зоне очагов—гипоцентральной области. На второй стадии оценивались зоны сотрясения на земной поверхности. Оконтуривание зон одинаковой сейсмической опасности производилось на основании распределения очагов землетрясений, сейсмического режима и геологических данных. Сила ожидаемых в этих зонах землетрясений определялась на основании инженерно-сейсмологических данных о происходивших ранее в них землетрясениях наибольшей силы.

Карта сейсмического районирования СССР, составленная таким путем в масштабе 1:2500000, после широкого обсуждения была одобрена Межведомственным советом по сейсмологии и сейсмостойкому строительству (МСССС) при Президиуме АН СССР и с уточнениями была введена в «Строительные нормы и правила» в главу 12 по Строительству в сейсмических районах (СНиП II-A.12—69). В СНиП-е, кроме карт сейсмического районирования, приведены также списки основных населенных пунктов СССР, расположенных в сейсмических районах с указанием силы ожидаемых в этих пунктах наибольших землетрясений. Для Армянской ССР указаны 60 таких населенных пунктов с силой ожидаемых землетрясений 7 и 8 баллов (47 пунктов — 8 баллов и 13 пунктов — 7 баллов). Балльность, указанная на карте сейсмического районирования, отнесена к участкам со средними геологическими условиями, характеризующимися песчано-глинистыми грунтами и низким (на глубине 6 м и более от поверхности земли) уровнем грунтовых вод. Согласно составленной карте сейсмического районирования, территория Армянской ССР в основном отнесена к восьмибалльной зоне. Только на северо-востоке республики имеется узкая семибалльная полоса, в которую входят населенные пункты Алаверди, Идже-

ван, Дилижан, Ахтала, Узунтала, Туманян, Колагеран, Красносельск и др.

При сравнении этой карты сейсморайонирования с ранее действующей (1957 г.), можно отметить, что на новой карте сильно возросла восьмибалльная зона в южной части территории Армянской ССР: район Зангезура целиком включен в восьмибалльную зону. Расширение восьмибалльной зоны в районе Зангезура было вызвано тем обстоятельством, что на карте сейсмического районирования 1957 г. не полностью были учтены последствия разрушительного зангезурского землетрясения 1931 г. (самого значительного сейсмического события в истории Кавказа в течение нашего века) и особенности структурно-тектонического строения Армении. Правильность включения территории Зангезура целиком в восьмибалльную зону в последующем подтвердилась зангезурскими землетрясениями 1968 г.

В 1973 г. были начаты работы по составлению новой карты сейсмического районирования СССР. В начале работ были составлены «Методические рекомендации по сейсмическому районированию территории СССР», которые после широкого обсуждения специалистами были утверждены директором Института физики Земли АН СССР академиком М. А. Садовским.

Руководствуясь этими «Методическими рекомендациями», большой группой специалистов Советского Союза на основании детального анализа материалов по сейсмологическим, геолого-геофизическим и инженерно-сейсмологическим исследованиям была составлена карта сейсмического районирования СССР в масштабе 1:2500000 (СР-78).

Выделение зон возникновения очагов землетрясений проводилось по сейсмологическим и геолого-геофизическим данным. Проведена дифференциация этих зон по вероятным значениям максимальной магнитуды $M_{\max}$:

- 1) $M \geq 8,1$; 2) $8 \geq M \geq 7,1$; 3) $7 \geq M \geq 6,1$

На карте сейсмического районирования территории СССР выделены VI—IX-балльные зоны. Баллы определены в соответствии со «Шкалой сейсмической интенсивности — MSK—1964».

Указанная на карте сейсмического районирования балльность относится к участкам, характеризваемым грунтами II категории. К грунтам II категории, согласно

СНиП, относятся выветренные и сильновыветренные скальные грунты; крупнообломочные грунты с содержанием больше 30% песчано-глинистого заполнителя; пески гравелистые, крупные и средней крупности, плотные и средней плотности независимо от влажности; пески мелкие и пылеватые, плотные и средней плотности, маловлажные; глинистые грунты с показателем консистенции $\leq 0,5$ при коэффициенте пористости $\leq 0,9$ для глин и суглинков и $\leq 0,7$ для супесей; вечномерзлые не- скальные грунты с сохранением грунтов основания в мерзлом состоянии в процессе строительства и эксплуатации здания или сооружения, если грунты находятся в пластично-мерзлом или сыпуче-мерзлом состоянии.

На карте сейсмического районирования в разных участках очаговых зон оценена вероятность возникновения разрушительных землетрясений и введена категория повторяемости сотрясений 1, 2 и 3, для которых средние периоды повторения землетрясений нормативной интенсивности принимаются равными, соответственно, один раз в 100, 1000 и 10000 лет.

Средние периоды повторения землетрясений могут быть получены путем расчета сейсмической сотрясаемости по методике Ю. В. Ризниченко.

Сейсмическая сотрясаемость $B_{\Sigma J}$, то есть суммарная частота повторения землетрясений заданной силы и выше, согласно Ю. В. Ризниченко, определяется по формуле:

$$B_{\Sigma J} = \frac{1}{10^{0,5\gamma} - 10^{-0,5\gamma}} \iint_S A [10^{-\gamma(K_J - K_0)} - 10^{(K_{\max} - K_0)}] dS, \quad (4.9)$$

где γ — наклон графика повторяемости; K_0 — энергетический класс землетрясений, по которому определена сейсмическая активность A ; $dS = dx dy$ — элементарные площадки, на которые разбита вся область S , окружающая исследуемую точку; K_J — энергетический класс землетрясения, эпицентр которого расположен на площадке dS и которое вызывает в данной точке сотрясение заданной силы J ; $K_{\max}$ — максимальное возможное землетрясение на площадке dS .

По полученным значениям $B_{\Sigma J}$ строятся карты сейсмической сотрясаемости, где изолиниями показывают-

ся средние периоды повторения при 7-, 8- и 9-балльных землетрясениях.

Карты сейсмической сотрясаемости могут быть значительно уточнены, если при расчете сейсмической сотрясаемости использовать не только сейсмологическую

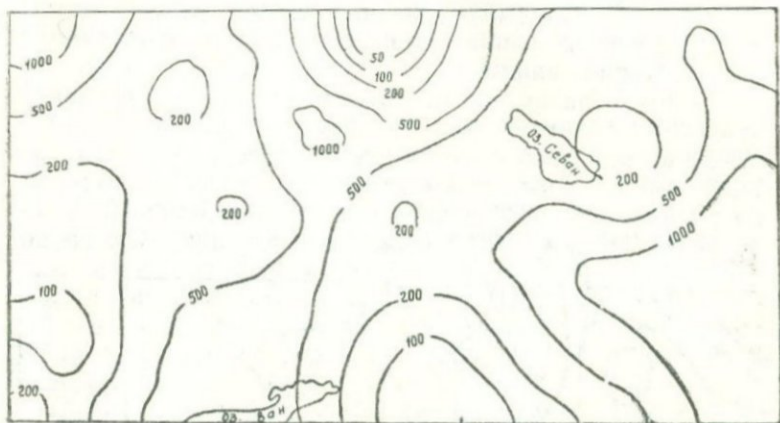


Рис. 23. Карта сейсмической сотрясаемости Армении для 7-балльных землетрясений по сейсмолого-геолого-геофизическим данным. При построении карты использован закон затухания балльности для Кавказа.

информацию, но и геолого-геофизические данные. При этом учет геолого-геофизических информации производится во время построения исходной карты максимальных возможных землетрясений, а именно: строится карта максимальных возможных землетрясений по комплексным сейсмолого-геолого-геофизическим данным.

Используя полученные нами значения максимальных возможных землетрясений по сейсмолого-геолого-геофизическим данным, наклон графика повторяемости, карты сейсмической активности, а также затухание сотрясений с удалением от гипоцентра землетрясений, вычислены величины сейсмической сотрясаемости территории Армении по сейсмолого-геолого-геофизическим данным.

Расчет сейсмической сотрясаемости производился по программе, составленной С. С. Сейдузовой и А. И. Захаровой на ЭВМ-220 в Вычислительном центре Института кибернетики АН Уз.ССР в гор. Ташкенте.

Ввиду того, что исходные карты максимальных воз-

можных землетрясений были получены в двух вариантах, то и карты сейсмической сотрясаемости были рассчитаны в двух вариантах. Каждый из этих двух вариантов также рассчитывался дважды: в первом случае использовался закон затухания балльности для Малого Кавказа, полученный нами, во втором случае — тот же закон для всего Кавказа, полученный Н. В. Шебалиным и В. Г. Папалашвили.

Таким образом, были рассчитаны четыре варианта значений сейсмической сотрясаемости территории Армении по сейсмолого-геолого-геофизическим данным для 7-, 8- и 9-балльных землетрясений. В качестве примера на рисунках 23 и 24 приведены карты сейсмической сотрясаемости для 7-балльных землетрясений. Как видно

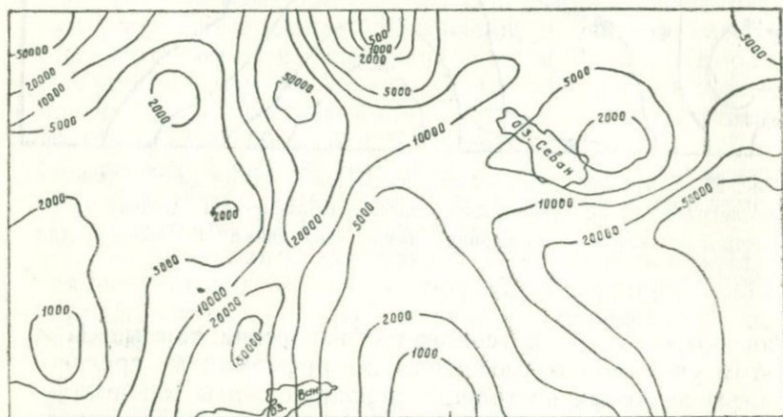


Рис. 24. Карта сейсмической сотрясаемости Армении для 7-балльных землетрясений по сейсмолого-геолого-геофизическим данным. При построении карты использован закон затухания балльности для Малого Кавказа.

из этого рисунка, при использовании закона затухания балльности для всего Кавказа (рис. 23), периоды повторения землетрясений получаются значительно меньше, чем при использовании закона затухания балльности для Малого Кавказа (рис. 24).

Новая карта сейсмического районирования территории СССР с нанесенными на нее зонами возникновения очагов землетрясений и категорий повторяемости была одобрена МСССС и введена в новые подготовленные к

изданию «Строительные нормы и правила. Строительство в сейсмических районах». Таким образом, новая карта сейсмического районирования территории СССР (СР-78) стала нормативным документом. В нормах, кроме карты сейсмического районирования, приведен также список основных населенных пунктов СССР, расположенных в сейсмических районах, с оценкой интенсивности в баллах ожидаемых в них наибольших землетрясений.

На новой карте сейсмического районирования в части Армянской ССР выделены две зоны: семи- и восьмибалльная. Восьмибалльная зона охватывает Средне-Араксинскую, большую часть Севанской и Ленинakanскую впадины, южную часть Ахалкалакского вулканического нагорья и большую часть Зангезура. В пределах восьмибалльной области на карте выделена зона вероятного возникновения очагов землетрясений с магнитудой 6,1—7,0. Семибалльная зона охватывает центральную и северо-восточные районы Армении.

Отличие зон интенсивности ожидаемых землетрясений на этой карте и карте сейсмического районирования 1969 г. (СНиП П-А.12—69) заключается в смещении на юг границы семибалльной зоны.

В настоящее время в Советском Союзе ведутся работы по детальному (среднемасштабному) сейсмическому районированию с целью уточнения степени сейсмической опасности в районах развития больших городов и промышленных комплексов.

Детальное сейсмическое районирование будет основано на совместном анализе комплекса данных геологических, геофизических, сейсмологических, а также данных смежных направлений наук о Земле. Детальное районирование отличается от общего привязкой к геологическим структурам. Однако оно не настолько подробно, чтобы учитывать грунтовые особенности и рельеф, как это делается при микрорайонировании.

4. СЕЙСМИЧЕСКОЕ МИКРОРАЙОНИРОВАНИЕ

Указанные на карте сейсмического районирования СССР интенсивности максимальных возможных землетрясений вследствие мелкомасштабности этих карт, а также из-за приуроченности их к конкретным грунто-

вым условиям, не могут быть непосредственно использованы при проектировании зданий и сооружений для строительства в различных грунтовых условиях сейсмоактивных районов.

Исходя из этого, составляются карты сейсмического микрорайонирования, в которых исходят из балльности, приведенной на карте сейсмического районирования, но при этом учитываются инженерно-геологические, гидрогеологические, геоморфологические условия, инструментальные записи, полученные на данной территории, а также уточняются макросейсмические сведения региона, в результате чего устанавливаются балльности отдельных территорий, отмечаются участки, благоприятные для строительства и, наоборот, не рекомендуемые для строительства районы. Эти карты крупномасштабные (1:10000, 1:5000), и ими с большим успехом пользуются при проектировании зданий и сооружений.

Большие работы в этом направлении проведены в Институте физики Земли АН СССР (С. В. Медведевым и его сотрудниками). Работы по сейсмическому микрорайонированию фактически проводятся во всех республиках, расположенных в сейсмических районах СССР.

В настоящее время имеется много методов сейсмического микрорайонирования, получивших отражение в Инструкции по осуществлению сейсмического микрорайонирования, которой широко пользуются при проектировании зданий и сооружений для строительства в сейсмических районах.

Не имея возможности останавливаться на описании всех этих методов, в этом параграфе приводим метод сейсмического микрорайонирования, разработанный в Армянской ССР Б. К. Карапетяном совместно с А. Г. Назаровым и С. А. Пирузяном, согласно которому наиболее достоверным путем сейсмического микрорайонирования принимается накопление фактических сравнительных данных об интенсивности землетрясения в различных локальных условиях на инструментальной основе и их статистическая обработка.

Необходимо при этом условиться, что понимать под интенсивностью землетрясения. Поскольку в основу расчета сооружений принимается спектр приведенных сейсмических ускорений (T) или его модификации, за меру интенсивности землетрясения естественно принять этот же спектр.

Под приведенным сейсмическим ускорением τ понимается максимальное значение сейсмической силы при данном землетрясении, отнесенной к единице сосредоточенной массы линейного осциллятора при заданном демпфировании.

Таким образом, если вес груза линейного осциллятора равен Q , то полная сейсмическая сила есть

$$S = \frac{\tau}{g} Q. \quad (4.10)$$

Функцию $\tau(T)$, где T — период свободных колебаний линейного осциллятора, заданную при данном фиксированном значении демпфирования, называем спектром приведенных сейсмических ускорений или сокращенно спектром $\tau(T)$.

Спектр $\tau(T)$ связан с коэффициентом динамичности $\beta(T)$ и коэффициентом сейсмичности K_c соотношением:

$$\tau(T) = K_c g \beta(T). \quad (4.11)$$

Спектры $\tau(T)$ могут быть получены с помощью инструментальных измерений непосредственно с помощью маятниковых сейсмометров, содержащих в себе систему упругих маятников с различными периодами свободных колебаний T_i по записям акселерографов, на основе интегрирования акселерограмм или приближенно на основе обработки сейсмограмм.

Для получения инструментальных материалов для целей сейсмического микрорайонирования расположение сейсмической аппаратуры должно подчиняться определенным закономерностям. При сопоставлении интенсивностей землетрясения в различных пунктах в зависимости от локальных условий мы получим тем большую информацию, чем разнообразнее эти условия для различных площадок, на которых должна быть расположена сейсмическая аппаратура.

Сопоставление интенсивностей землетрясений для различных пунктов осуществляется следующим образом. По показаниям приборов определяются спектры $\tau(T)$. Исходный балл сейсмической карты должен быть отнесен к определенным грунтовым условиям, при горизонтальной площадке и отсутствии грунтовых вод. По-видимому, за таковые лучше всего принять коренные скальные породы (истинная сейсмическая интенсивность

по Зибергу). В настоящее время исходный балл карты сейсмического районирования отнесен к средним грунтовым условиям.

Обозначим через $\tau_c(T)$ спектр, отнесенный к грунтам, к которым привязана балльность карты сейсмического районирования. Тогда уточнение интенсивности землетрясения для данного локального условия, характеризующегося спектром $\tau(T)$, осуществляется с помощью множителя

$$B_c(T) = \frac{\tau(T)}{\tau_c(T)}. \quad (4.12)$$

Для получения устойчивых данных необходимо определение B_c данного пункта при различных землетрясениях с последующей статистической обработкой. Ясно, что функции $\tau(T)$ и $\tau_c(T)$ формулы (4.12) определяются для одного и того же землетрясения. Расчетное значение динамического коэффициента $\beta_1(T)$ с учетом локальных условий данной площадки устанавливается по стандартному значению $\beta(T)$, принятому в нормах, по следующей формуле

$$\beta_1(T) = B_c(T)\beta(T). \quad (4.13)$$

В случае отсутствия достаточного количества подробных данных об относительных значениях интенсивностей землетрясения, определяемой формулой (4.12), допускается более грубая оценка. Поскольку спектры в общем носят гиперболический характер, т. е. приближаются к зависимости

$$\tau(T) = \frac{C}{T}, \quad (4.14)$$

где C — постоянная, то величину C можно принять за осредненную меру интенсивности землетрясения, отнесенную к гиперболу.

Величина C для данного реального спектра τ определяется по способу наименьших квадратов

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\tau_i}{T_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i^2}}. \quad (4.15)$$

Допускается также приближенное определение C по формуле:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i T_i}{n} . \quad (4.16)$$

При введении средней меры интенсивности поправочный коэффициент B_c , согласно формуле (4.12), упрощается и превращается в постоянное число для всего спектра

$$B_c = \frac{C}{C_c} . \quad (4.17)$$

где C — средняя мера для рассматриваемого пункта, а C_c — средняя мера, отнесенная к грунту, к которому привязана исходная балльность карты сейсмического районирования.

При невозможности постановки инструментальных исследований с целью накопления фактических сравнительных данных об интенсивности землетрясения в различных локальных условиях рекомендуется осуществление приближенного сейсмического микрорайонирования территорий населенных пунктов и строительных площадок по нижеследующим правилам.

Осуществляется инженерно-геологическое изучение территории, подлежащей сейсмическому микрорайонированию, и определяются скорости распространения продольных сейсмических волн в грунтах. Относительная сейсмичность отдельных участков территории определяется в зависимости от их основных инженерно-геологических, гидрогеологических и геоморфологических характеристик. Указанные локальные характеристики учитываются путем введения нижеследующих трех коэффициентов: k_r — учитывающего тип грунта в сухом состоянии в основании сооружения; k_b — учитывающего уровень грунтовых вод; K_p — учитывающего рельеф местности.

Общая характеристика k , учитывающая изменение интенсивности землетрясения с учетом локальных условий, представляется в виде произведения этих коэффициентов:

$$k = k_r k_b k_p . \quad (4.18)$$

Путем помножения сейсмического коэффициента

«Норм и правил строительства в сейсмических районах» K_c на соответствующий коэффициент получается коэффициент сейсмичности K_c^1 для отдельных участков:

$$K_c^1 = k \cdot k_c \quad (4.19)$$

Для приближенного определения коэффициента k_r , учитывающего вид грунта данного участка, предлагается следующая формула, полученная на основе сохранения потока сейсмической энергии, без учета отражения и рассеяния ее в вышележащих от гипоцентра слоях земной коры:

$$k_r = \sqrt{\frac{\rho_c v_c}{\rho v}} \quad (4.20)$$

где ρ_c — плотность исходного грунта, к которому привязана балльность по карте сейсмического районирования; v_c — скорость распространения сейсмических волн (продольных) в исходном грунте; ρ — плотность грунта данного участка; v — скорость распространения сейсмических волн (продольных) в грунте данного участка.

Величины плотностей грунтов и скоростей распространения сейсмических волн в них могут быть найдены, при возможности, путем осуществления прямых замеров в полевых условиях или используя имеющиеся литературные данные.

На основании анализа полученных результатов по измерениям землетрясений и взрывов с помощью многомаятниковых сейсмометров, а также используя другие инструментальные материалы, получены приближенные значения коэффициента k_r для различных грунтов по отношению к суглинкам-супесям. Эти значения меняются в пределах 0,35—2,5.

При принятии коэффициента k_r по возможности следует учесть, что на его величину существенное влияние будет оказывать спектральный состав колебаний грунта, а также вид сооружения, возведенного на нем. Например, необходимо учесть, что жесткие сооружения на скальных грунтах и гибкие на податливых ведут себя хуже по сравнению со средними грунтовыми условиями.

Коэффициент k_v , учитывающий сейсмический эффект, обусловленный наличием грунтовой воды, предлагается определять по формуле, полученной в результате анализа данных землетрясений и взрывов, регистрированных с помощью многомаятниковых сейсмометров:

$$k_B = \frac{3}{1 + \frac{H}{8}} . \quad (4.21)$$

При $H > 16$ м, $k_B = 1$, где H — уровень грунтовой воды (предельное значение $H = 16$ м, ниже которого наличие воды не оказывает влияния).

Следует учесть, что зависимость (4.21) дана для га-лечников, покрытых слоем лёсса, при возведении на них зданий средней жесткости.

Принимая, что сейсмический эффект в зависимости от рельефа может возрасти в два раза, рекомендуется коэффициент k_p , учитывающий рельеф местности, определять по формуле:

$$k_p = 1 + \operatorname{tg} \alpha, \quad (4.22)$$

где α — угол наклона, меняющийся от 0 до 45° (при угле наклона $45-90^\circ$ принимается $k_p = 2$).

В случае склонов, сложенных из рыхлых современных отложений, следует запретить капитальное строительство. Необходимо учесть возможность увеличения сейсмического эффекта для жестких сооружений на отдельно стоящих скальных останцах, узких скальных водоразделах и уступах скальных обрывов. Не рекомендуется строительство на склонах, сложенных из нескальных пород, в особенности при угле наклона большем 30° .

Глава 5

ПОИСКИ ПРЕДВЕСТНИКОВ И ПРЕДСКАЗАНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Работы по поиску предвестников землетрясений в СССР начали проводиться с 1949 г. под руководством академика Г. А. Гамбурцева, вскоре после ашхабадского землетрясения 1948 г. Они получили свое дальнейшее развитие в связи с ташкентским землетрясением 1966 г.

В настоящее время в СССР эти работы проводятся широким фронтом под руководством академика М. А. Садовского. Исследования осуществляются как в теоретическом плане, так и в полевых и лабораторных условиях. С этой целью организованы прогностические полигоны в Гарме — Душанбе, Фрунзе, Ташкенте, Ашхабаде, Алма-Ате, на Токтогульской ГЭС, Карпатах, Камчатке и др. Начаты работы по созданию прогностического полигона в г. Ереване.

Работы по прогнозированию землетрясений в Армении проводятся под руководством академика АН Армянской ССР А. Г. Назарова. Им разработана программа работ по выявлению прогностических критериев возникновения сильных разрушительных землетрясений на территории Армении.

В трех километрах к северо-западу от Гарни, вдали от промышленных объектов и железной дороги, построена подземная геофизическая обсерватория, основной задачей которой является комплексное изучение на территории Армении предвестников с целью прогноза сильных землетрясений. Область вокруг села Гарни известна разрушительными землетрясениями в прошлом, из которых наиболее сильное произошло в 1679 году и вызвало большие повреждения в Ереване.

Геофизическая обсерватория состоит из туннеля со

штреками длиной 350 метров, главного и лабораторного корпусов, магнитного абсолютного павильона, павильонов земных токов, сильных движений, геофизической скважины глубиной в один километр и вспомогательных служб.

Составленные в СССР, Японии (1962), США (1964) многолетние программы по прогнозированию землетрясений включают в себя выполнение ряда исследований по изучению сейсмического режима и динамики сейсмических процессов, в том числе изменения скоростей распространения продольных и поперечных сейсмических волн, временных флуктуаций геофизических полей (гравитационного, магнитного, электрического, термического); современных деформаций и наклонов земной коры; геохимических и гидрогеологических процессов; биологических, а также некоторых других факторов, служащих предвестниками землетрясений.

Работы по прогнозированию землетрясений в настоящее время ведутся совместными усилиями советских и зарубежных ученых. Организуются научные конференции и симпозиумы, осуществляется взаимный обмен информацией, проводятся совместные исследования. Например, по советско-американскому соглашению, с 1972 г. американские ученые работают в Таджикистане на полигоне Гарм-Душанбе, а советские — в Калифорнии.

В результате проведения работ по поиску предвестников сильных землетрясений, неоднократной их проверки, необходимо добиться того, чтобы прогнозируемая вероятность возникновения землетрясения стала достоверной. Только в этом случае можно с уверенностью оповещать население об ожидаемом землетрясении и осуществлять соответствующие мероприятия, возникающие из прогноза землетрясений. Иначе может повториться случай, имевший место в Сан-Франциско (США), когда в связи с предполагаемым землетрясением все население было выселено, а землетрясения не произошло.

В качестве несравненно более печального примера можно привести землетрясение, происшедшее 27 июля 1976 г. в Китае. В то время как перед этим землетрясением 4 февраля 1975 г. в южной части провинции Ляонин (Ляодунский полуостров) с $M=7,3$ было предсказано и тем самым предотвращены человеческие жертвы, землетрясение 27 июля 1976 г. с $M=7,7$ не было предсказано и повлекло за собой гибель 600 тысяч человек.

В этой главе сделана попытка дать современное состояние исследований по изучению предвестников землетрясений и пути проведения работ с целью предсказания сильных землетрясений.

1. ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Скорости распространения продольных и поперечных сейсмических волн имеют различные значения. Однако их отношения в среднем остаются постоянными и равняются $\sqrt{3}$. В таком же соотношении находятся времена их пробега.

Изменения величин скоростей продольных и поперечных волн и их отношения, полученные для слабых землетрясений, как показали исследования, могут служить предвестниками возникновения сильных землетрясений.

Исходя из этого, проводится изучение скоростей распространения продольных и поперечных волн в полевых (очаговых зонах землетрясений) и лабораторных условиях.

Начало этих работ у нас в СССР положено в Комплексной сейсмологической экспедиции в Гармском районе Таджикской ССР. Эти работы проводятся коллективом сотрудников под руководством И. Л. Нерсесова путем интерпретации записей местных слабых ($K=6 \div 10$) и сильных ($K \geq 11$) землетрясений, полученных на сейсмических станциях Комплексной сейсмологической экспедиции. При этом определяется величина отношений времен пробега поперечных — t_s и продольных — t_p волн из графика Вадати, выражающего зависимость между временем прихода продольной волны и разностью времен прихода продольной и поперечной волн.

Для определения изменения отношений t_s/t_p было проведено изучение их пространственного распределения для эпицентров землетрясений Гармского района по площади и для различных глубин: 5, 10, 15 и 20—35 км. В результате получена резкая дифференциация значений отношений времен t_s/t_p по площади и глубине, которая хорошо коррелируется с сейсмической активностью. При этом границы с пониженными отношениями

t_s/t_p могут служить вероятными участками возникновения сильных землетрясений.

С целью установления изменений t_s/t_p во времени были рассмотрены пять сильных землетрясений с $K \geq 11$, происшедших в Гармском районе. В результате выявлены четыре стадии подготовки сильных землетрясений: 1) изменений t_s/t_p нет, что соответствует их статическому состоянию; 2) уменьшение t_s/t_p до некоторого минимального значения с последующим его возрастанием; 3) возрастание t_s/t_p достигает статического состояния; 4) землетрясение завершается и возникают афтершоки. При этом чем сильнее землетрясение, тем большее время требуется для его подготовки.

На основании анализа полученных данных установлено, что перед землетрясениями с $K=12-13$ изменения отношения времен пробега поперечных и продольных волн доходят до 10% и отмечаются за 2—3 месяца до землетрясения.

Пространственно-временное распределение отношений времен пробега поперечных и продольных сейсмических волн для различных глубин очагов местных землетрясений с $K=6-9$ получено и на Фрунзенском полигоне. Установлены участки пониженных значений t_s/t_p , к которым приурочены сильные землетрясения с $K=11-12$, происшедшие в этом районе. При этом наблюдается «бухтообразное» изменение v_p/v_s во времени перед указанными сильными землетрясениями.

Американские ученые Я. П. Агарвал и Л. Р. Сайкс определяли времена пробега поперечных и продольных волн на малых эпицентральных расстояниях до 6 км в районе Голубого горного озера в Нью-Йорке. Как отмечают авторы, и в этом случае характер изменения отношения t_s/t_p получается, как в Гарме, а именно это отношение сначала уменьшалось, а затем непосредственно перед землетрясением восстанавливалось до нормального значения. При этом продолжительность наблюдаемой аномалии возрастала с увеличением интенсивности землетрясения. На основании того, что наблюдавшееся 30 июля 1973 г. среднее значение $t_s/t_p = 1,75$, а в последующие 2—3 дня уменьшилось до 1,5, 1 августа было предсказано землетрясение с магнитудой 2,5—3,0, которое должно было произойти в ближайшие

несколько дней. Действительно, 3 августа 1973 г. в 23 ч. 10 мин. произошло землетрясение с магнитудой 2,6. Авторы отмечают, что для предсказания времени и величины предстоящих землетрясений могут быть использованы не только временные, но и пространственные вариации t_s/t_p .

Аналогичную картину изменения отношения скоростей продольных и поперечных волн в земной коре наблюдал Дж. Х. Витком при изучении скоростей распространения сейсмических волн до и после землетрясения 1971 г. в Сан-Фернандо.

Поиски предвестников землетрясений, в том числе по временам пробега волн Р и отношениям времен пробега S и Р волн, ведутся систематически в Калифорнии. Р. Л. Вессоном на основании изучения большого количества слабых землетрясений, происшедших на 400-километровом участке системы разломов Сан-Андреас, была установлена возможность прогнозирования ряда сильных землетрясений с магнитудой порядка 5.

Одной из задач прогнозирования сильных землетрясений на Камчатском полигоне является установление изменений отношений скоростей продольных и поперечных волн. При этом значения v_p/v_s устанавливались на основании данных одной станции по полученным разностям вступлений волн Р и S и времени пробега волны Р, а также времени в очаге — t_0 , которое определялось по данным сети станций. По единичным значениям, v_p/v_s для конкретной станции определялись их изменения во времени. Работы проводились (Г. А. Соболев и Л. Б. Славина) по данным двух станций (Петропавловск-Камчатской и Шипунской). При использовании этой методики вследствие большого разброса единичных значений v_p/v_s были осуществлены статистические осреднения. На основании проведенных исследований на Камчатке выделены отдельные зоны с повышенными и пониженными единичными значениями v_p/v_s мигрирующие по площади и во времени, к границам которых приурочены землетрясения с $K \geq 14$. Указывается, что полученные данные в основном могут быть использованы для долгосрочного прогноза с целью уточнения места будущего землетрясения. Что касается временной зависимости единичных значений v_p/v_s , то их аномальные значения наблюдались задолго до землетрясения. Быстрые вариации

$\sum_s$, по-видимому, связаны с изменением напряженного состояния среды. Авторы считают, что локализованные в пространстве пониженные значения отношения v_p/v_s и зоны высоких градиентов поля v_p/v_s могут служить предвестниками места и времени сильных землетрясений Камчатки с $K \geq 14$.

Такая методика определения v_p/v_s также была применена С. Суэхиро к конкретному сильному землетрясению, происшедшему на Японских островах, за два месяца перед которым это отношение сильно возросло.

Лабораторные работы у нас в СССР, в основном в ИФЗ, а также в США проводились с целью изучения процессов разрушения горных пород в условиях одно-, двух- и трехосного давления, образования при этом трещин, изменения величин амплитуд и скоростей распространения ультразвуковых волн, проходящих через трещины, изменения скоростей продольных и поперечных волн перед образованием трещин и разрушением, влияния водонасыщения и увеличения порового давления.

В основе объяснения изменений скоростей продольных и поперечных волн в период подготовки сильных землетрясений, полученных в результате проведенных полевых и лабораторных работ, заложены две различные гипотезы процесса подготовки землетрясения. Одна из гипотез, советская, исходит из основных положений механики разрушения, а другая, американская, ставит в основу диффузию воды в дилатирующей пористой среде.

2. ВРЕМЕННЫЕ ФЛУКТУАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Систематические исследования геофизических полей Земли (магнитного, электрического и гравитационного) и установленные в результате их временные флуктуации могут служить предвестниками возникновения сильных землетрясений. Приводим некоторые данные, полученные в этом направлении, по каждому из указанных геофизических полей в отдельности.

Магнитное поле. Случаи, когда в период землетрясения возникали магнитные возмущения, известны давно. Наиболее ярко это выразилось при известном лигурийском землетрясении 11 февраля 1887 г., которое сопровождалось большими изменениями магнитного поля,

зарегистрированными на магнитных обсерваториях Франции, Италии, Швейцарии, Испании и России.

Исключительно сильные возмущения магнитного поля наблюдались и при верненском землетрясении 1887 г., записанные магнитными обсерваториями России.

Наблюдения вариаций геомагнитного поля у нас в СССР были осуществлены в Гарме и Алма-Ате с помощью магнитоиндукционных станций более четверти века тому назад. На обеих станциях были получены более трехсот записей слабых землетрясений и сделана попытка сопоставить их с наблюдаемым изменением геомагнитного поля с целью установления магнитосейсмического эффекта. Трудность заключается в том, что на магнитоиндукционных станциях магнитосейсмический эффект должен быть выявлен на большом числе случаев на фоне огромного количества ионосферных помех, очень сильно превышающих магнитосейсмический эффект.

В указанный период известный советский магнитолог А. Г. Калашников предложил производить комплексные измерения на одной станции трех основных геофизических полей: сейсмологического, магнитного и электрического в узком диапазоне частот с целью корреляции изменений этих полей и выявления их вариации перед сейсмическим толчком.

Даже в настоящее время не все разделяют мнение о том, что вариации геомагнитного поля могут служить надежным предвестником землетрясения, хотя неоднократно отмечались случаи изменения геомагнитного поля в эпицентральной зоне сильного землетрясения. Некоторая уверенность в этом появилась после того, как были произведены многоточечные наблюдения с помощью протонных магнитометров над изменением магнитного поля Земли в сейсмоактивных районах СССР, США, Японии.

По показаниям протонных магнитометров, установленных в пяти точках вдоль разлома Сан-Андреас, на участке примерно 100 км, в течение двух лет (1965—1967 гг.) были зарегистрированы локальные изменения магнитного поля, которые во всех случаях сопровождались внезапными смещениями земной поверхности. При этом происходило падение напряжения магнитного поля в период подготовки землетрясения.

За час до аляскинского землетрясения 27 марта 1964 г. в г. Каднак было зарегистрировано резкое возмущение геомагнитного поля с амплитудой до 100 гамм.

По данным протонных магнитометров (точность ± 1 гамм), установленных в ряде пунктов Японии, выявлены изменения геомагнитного поля в пределах 5—15 гамм во время умеренных землетрясений.

Такого же характера наблюдения проводятся и на полигонах СССР. Так, например, на Ташкентском полигоне в результате работ, проведенных в течение 6 лет (1968—1974 гг.), с помощью протонных магнитометров получен сейсмамагнитный эффект в пределах 20—30 гамм при двух землетрясениях с магнитудой 3,7 и 4,2. На Карпатском полигоне на основании пятилетних наблюдений геомагнитного поля выявлены аномальные участки векового хода интенсивностью до 30 гамм и локализованы места возможных землетрясений.

Изучения изменений магнитного поля Земли проводятся и после сильных землетрясений с целью прогнозирования времени и интенсивности последующих толчков (афтершоков). Такие работы были осуществлены в Армянской ССР после зангезурского землетрясения 9 июня 1968 г. с магнитудой порядка 5 и интенсивностью в эпицентре 7—8 баллов. С этой целью с 22 июня 1968 г. по инициативе А. Г. Назарова в эпицентральной зоне землетрясения (сел. Гярд) и на расстоянии 40 км (гор. Горис) с помощью двух магнитовариационных станций МВС-2М замерялись изменения геомагнитного поля. Было зафиксировано 6 случаев геомагнитных аномалий перед афтершоками зангезурского землетрясения. Из-за большого влияния атмосферных токов локальные возмущения нельзя было однозначно приписывать сейсмамагнитному эффекту. Тем не менее во всех случаях наблюдался некоторый спад магнитного поля перед толчком, который в последующем после толчка постепенно восстанавливался.

Обобщая изложенное, необходимо отметить, что с точки зрения предвестника преимущественно магнитного поля перед другими геофизическими полями является независимость его изменений от уровня всесторонних давлений, которым подвержена горная порода, и они (эти изменения) связаны только с односторонними напряжениями. Флуктуации магнитного поля на поверхности Земли обусловлены изменениями магнитных ха-

рактистик горных пород во времени, вызванными возрастанием напряжений перед землетрясением, в связи с чем и проводятся широкие лабораторные эксперименты по изучению магнитных свойств горных пород.

Электрическое поле. Перед землетрясениями часто наблюдаются возмущения земного электрического поля, появление электромагнитных волн, свечение неба, теллурические и атмосферно-электрические явления. Отсюда и появляется надежда использовать их в качестве предвестников землетрясений.

Работы по установлению связи между земными токами и землетрясениями у нас в СССР начаты в пятидесятых годах под руководством А. Н. Тихонова. Наблюдения проводились в районе Гарма с помощью четырех станций, расположенных по профилю длиной 180 км, а также несколькими станциями в районе Алма-Аты.

За четыре часа до катастрофического землетрясения на острове Тайвань 24 ноября 1951 г. на станции Алма-Ата была получена электрограмма с очень сильным электрическим возмущением.

В Гарме наблюдались два случая сильных электрических возмущений перед местными землетрясениями 28 сентября и 12 октября 1950 г. силой 6 и 5 баллов, произошедших в непосредственной близости от точки наблюдения. Электрограммы с резкими возмущениями различного характера были получены при большом количестве и других землетрясений. Однако при этом были и случаи, когда землетрясениям не предшествовали электрические возмущения. Тем не менее, возможная связь между распространением сейсмических и электромагнитных возмущений была установлена через сейсмо-электрический эффект, выражающийся в возникновении электромагнитного возмущения за счет энергии распространяющейся упругой волны.

В качестве предвестника землетрясений в ряде случаев было использовано изменение так называемого градиента электрического потенциала атмосферы, определяемого разностью электрического состояния между Землей и атмосферой на расстоянии одного метра по вертикали. Впервые такой эффект возрастания градиента был установлен Е. А. Чернявским за 4 часа перед джалалабадским землетрясением 1924 г. интенсивностью в 8 баллов.

Возрастание градиента электрического потенциала атмосферы также наблюдалось за полтора-два часа при 22 последующих толчках катастрофического хайтского землетрясения 10 июля 1949 г., имевших интенсивность 5—6 баллов, которые были зарегистрированы в Гарме, расположенном в 50 километрах от эпицентра. В последующем под руководством В. Ф. Бончковского была организована более совершенная запись изменений градиента электрического потенциала атмосферы на пяти станциях, в том числе в Гарме, перед рядом землетрясений. В результате получено, что для слабых неощутимых местных землетрясений нет явно выраженных изменений градиента, в то время как при ощутимых землетрясениях силой 4—6 баллов возмущения в ходе градиента могут служить их предвестником.

Наблюдениями Г. А. Соболева и В. Н. Морозова по четырем станциям регистрации земных токов, расположенным на восточном побережье Камчатки, установлено, что при ряде землетрясений появляются локальные электрические поля, которые могут служить геоэлектрическим предвестником землетрясений. При этом получены довольно большие электрические возмущения за несколько часов перед зарегистрированными землетрясениями, вызванные электрической поляризацией пород вблизи очаговой зоны и эффектами, связанными с развитием трещин.

На Гармском полигоне в течение 1967—1969 гг. в результате исследований электропроводности горных пород была установлена ее связь с процессами подготовки землетрясения, а именно: за 2—2,5 месяца до землетрясений класса $K=9$ сопротивление пород уменьшалось на 15—18%. Лабораторными опытами по изучению электрических свойств горных пород при высоких давлениях и температурах установлено, что электрическое сопротивление пород существенно меняется с температурой и незначительно с давлением.

Гравитационное поле. Выделение потенциально сейсмогенных структур методами гравиметрии проводится при наличии линейно вытянутых зон высоких горизонтальных градиентов гравитационного поля или же участков нарушения простираций гравитационных аномалий, а также при наличии резкой смены общего характера гравитационного поля.

Вариации гравитационного поля определенного ре-

тиона во времени могут быть увязаны с изменением сейсмической активности этого региона. Следовательно, систематическое изучение этих вариаций также может иметь значение при поисках предвестников сильных землетрясений. Следует отметить, что еще в 1911 г. Б. Б. Голицын в числе направлений, которые могли бы способствовать решению проблемы прогноза землетрясений, указал и проведение гравиметрических измерений. В настоящее время в соответствии с программой работ по поиску предвестников сильных землетрясений осуществляются также и гравиметрические измерения. Так, например, на Ашхабадском геодинамическом полигоне с учетом геологических и геофизических особенностей территории были выбраны более пятидесяти пунктов и несколько участков для изучения изменения аномалий силы тяжести во времени. Гравиметрические измерения проводились гравиметрами GS-12 с ошибкой измерения 0,02—0,03 мгл. За 1967—1971 гг. в отдельных районах территории полигона обнаружены приращения аномалий силы тяжести, достигающие 0,10—0,15 мгл. Эти аномальные районы приурочены к сейсмоактивным зонам земной коры за указанный период времени.

Изменение силы тяжести медленное, непрерывное и длительное, а также краткосрочное, соответственно 0,13 и 0,19 мгл, наблюдались перед тяньшанским землетрясением 28 июля 1976 г. в области эпицентра этого землетрясения. Изменения силы тяжести в этой области наблюдались и после землетрясения.

3. СОВРЕМЕННЫЕ ДЕФОРМАЦИИ И НАКЛОНЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Современные деформации земной коры, выражаемые поднятием или опусканием ее отдельных частей, устанавливаются с помощью высокоточных приборов путем измерения изменений относительных высот точек земной поверхности, которые весьма незначительны и протекают очень медленно. Они, в частности, определяются при наклономерных измерениях или устанавливаются при повторных высокоточных нивелировках. Последние дают наиболее точные результаты при выявлении деформаций Земли. Особый интерес представляет про-

ведение нивелировочных работ до и после землетрясения, а также измерение поднятий и опусканий участков поверхности Земли, разделенных глубокими разломами с помощью наклономеров. Так, например, изучение деформаций на разломе Сан-Андреас проводилось еще до катастрофы 1906 г. путем измерения расстояний между специально сооруженными контрольными вышками. После землетрясения в Сан-Франциско в 1906 г. эти измерения были повторены и в результате установлено, что расстояния между противоположными от разлома точками изменились (до 6 м). Последующие топографические измерения показали, что противоположные стороны разлома перемещаются со скоростью 5 см в течение года. Таким образом, при равномерном протекании деформаций необходимо было бы 100 лет для того, чтобы деформации достигли такой критической величины в 6 м. Однако по всем признакам этот процесс неравномерный, и существенная часть деформаций происходит в течение сравнительно малого промежутка времени непосредственно перед землетрясением.

Напряжения в земной коре, помимо деформаций, также проявляются в виде наклонов земной поверхности, которые очень медленно, но постоянно меняются. Исследования наклонов земной коры в Японии впервые были начаты еще в 1910 г. В последующем, в 30-е годы, по построенным векторным диаграммам наклонов японские ученые установили наличие «бурь наклонов» и их связь с землетрясениями. В дальнейшем в результате проведенных наблюдений было установлено, что аномальные наклоны перед землетрясениями могут быть различными по продолжительности, форме и величине, начиная от нескольких часов (по форме похожие на букву S) с максимальным наклоном $0,1''$ дуги при магнитудах 6—8 и эпицентральных расстояниях до 100 км, затем за несколько дней или месяцев с величиной наклона до $10''$ дуги и почти за полгода с еще большими величинами наклонов. Так, например, первое аномальное изменение деформаций перед разрушительным нигатским землетрясением 1964 г. с $M=7,5$ было обнаружено за 9 часов до землетрясения.

В Новой Зеландии с помощью наклономера, установленного в 1972 г. в штольне (подземной станции), в результате четырехлетних наблюдений были получены аномалии наклонов, через месяц после возвращения

которых к норме произошли два сильных землетрясения с магнитудами 5,5 и 6,2 на расстоянии 65 км в противоположных направлениях от станции. Однако другое землетрясение глубокого залегания с магнитудой 5,9 не сопровождалось очевидной аномалией наклона.

У нас в СССР впервые наклономерные наблюдения начали проводиться в г. Алма-Ате в 1937—1939 гг., но в прогностических целях они осуществлялись там же в 1946 г. и в результате В. Ф. Бончковским была установлена связь во времени «бурь наклонов» (изменения в направлении и величине наклонов) с местными землетрясениями. В дальнейшем с 1947 г. такие наблюдения стали проводиться и в Гармской экспедиции на нескольких наклономерных станциях. Анализ полученных за 3 года материалов показал, что бури наклонов возникали в периоды сейсмической активности, сопровождающиеся землетрясениями, в то время как при отсутствии бурь наклонов землетрясений не было. При этом бури наклонов перед землетрясением наблюдались на всех станциях одновременно, но с различными формами и величинами.

Изменения в деформациях и наклонах также были установлены при записи удаленных землетрясений. Так, например, перед аляскинским землетрясением 28 марта 1964 г. ($M=8,6$) на станции Талгар (вблизи г. Алма-Аты), находящейся на расстоянии 7 тыс. км от эпицентра, за месяц до землетрясения наблюдалась смена деформаций сжатия на растяжение, достигшая в момент землетрясения величины $6 \cdot 10^{-8}$ с последующим изменением знака деформаций после землетрясения. На этой станции также были получены аномальные деформации с изменением знака перед землетрясением на Южном Тянь-Шане 4 мая 1965 г. с магнитудой 6 и эпицентральной расстоянием 200 км.

На станции Кондара (вблизи г. Душанбе) были зарегистрированы изменения деформации (по двум взаимно перпендикулярным деформографам) за 4 дня перед землетрясением 14 марта 1965 г. с магнитудой 7,5, происшедшем в 300 км от этой станции. При этом за сутки до указанного землетрясения наблюдался и аномальный наклон земной поверхности по показаниям наклономеров, установленных на расстоянии 50 км от станции. На этой станции также было записано землетрясение 3 октября 1967 г. (лугобское) с $K=13$ и

98

$\Delta = 20$ км, за четыре месяца перед которым началось весьма существенное изменение деформации. За шесть дней до землетрясения сильно изменилась и скорость наклонов в том же направлении.

Обобщая, можно отметить, что аномальные наклоны и деформации наблюдаются перед многими землетрясениями. Полевыми наблюдениями и лабораторными экспериментами установлено, что значительная часть деформаций происходит за определенный период времени перед землетрясением, величина которого может быть разной продолжительности, измеряемой от нескольких лет до часов и даже минут. Однако бывают случаи, когда такие изменения не приводят к землетрясениям. Поэтому очень важно суметь выделить из полученных данных те, которые вызваны изменениями в земной коре, в связи с предстоящим землетрясением. Для этого требуется в первую очередь точная и совершенно надежная аппаратура, а также осуществление частых наблюдений на нескольких станциях с дублирующей аппаратурой. В качестве примеров точной и надежной аппаратуры можно привести кварцевые деформографы с базой 20—25 м, имеющие две системы регистрации: оптико-механическую и фотоэлектрическую, с чувствительностью 10^{-8} и 10^{-9} на 1 мм записи соответственно, лазерные устройства для измерения деформаций на больших базах, японские деформометры с точностью $5 \cdot 10^{-9}$, наклонометры А. Е. Островского с фотоэлектрической регистрацией, в 10—20 раз чувствительнее кварцевых наклонометров Исимото, которыми оборудованы наклономерные станции в Японии. При этом наряду с измерениями деформаций и наклонов также необходимо осуществлять повторные нивелировочные и триангуляционные наблюдения с использованием светодальномеров с точностью 10^{-6} для измерения смещений земной поверхности.

4. АНОМАЛИИ В ГЕОХИМИЧЕСКИХ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Резкое возрастание деформаций земной коры перед сильными землетрясениями приводит к изменению уровня грунтовых вод и режима минеральных источников. Сильно изменяются и дебиты нефтяных и газовых сква-

жин. Происходит изменение химического состава воды и газов и отмечается увеличение температуры минеральных вод на 1—2°C.

Земная кора непрерывно выделяет в атмосферу значительное количество природных газов. Это явление В. И. Вернадским образно было названо «газовым дыханием земли». Такое выделение происходит неравномерно по всей площади литосферы. Увеличение интенсивностей газовыделений и изменение состава газового потока приурочены главным образом к зонам глубинных разломов, к сопровождающим их разрывным нарушениям различных размеров.

Н. И. Хитаров, Г. И. Войтов, В. С. Лебедев на основании проведенных исследований анапского (1966 г.), ташкентских (1966—1967 гг.) и дагестанского (1970 г.) землетрясений пришли к выводу, что геохимические аномалии, такие, как газовые, гидрологические, изотопные и радиологические, образующиеся в гипоцентрах землетрясений и их окружениях, являются результатом интегрального отражения физико-механических и радиохимических процессов, которые происходят в породах, испытывающих упругие деформации перед землетрясениями. При этом они считают, что наибольший интерес представляют вариации химического состава газов, а также стабильных и радиогенных изотопов.

На Фрунзенском полигоне перед сильными землетрясениями наблюдались изменения дебита термальных вод в глубоких скважинах, расположенных в исследуемом районе.

В. Л. Барсуковым, В. С. Серебренниковым, Г. М. Варшалом и А. В. Гараниным с целью изучения закономерных изменений химического состава подземных вод в период подготовки сильных землетрясений в 1977 и 1978 гг. были проведены наблюдения на Душанбинском опытном полигоне за водами в самоизливающих буровых скважинах на месторождениях термальных вод. При этом пробы вод для химического анализа отбирались с частотой от 3 до 7 раз в неделю. Аномальным значением в содержании основных гидрохимических компонентов подземных вод считалось содержание с трехкратным превышением фоновых колебаний данного компонента.

В результате анализа данных наблюдений был сделан вывод, что в радиусе до 300 км от точки наблюдения

ния наиболее надежным геохимическим предвестником землетрясений в исследуемом регионе являются аномально-высокие содержания гелия в подземных водах, а также аномалии в температуре подземных вод. Момент землетрясения, как правило, совпадает с моментом снижения аномально-высоких содержаний гелия до верхнего уровня фоновых значений. При этом, чем дольше отмечаются аномально-высокие содержания гелия в подземных водах, тем большей силы ожидается землетрясение. Глубина ожидаемого землетрясения определяется аномалиями в значениях компонентов минеральной составляющей подземных вод.

П. И. Чалов, Т. В. Тузова, В. М. Алехина на основании анализа радиоизотопных показателей вод разломов земной коры сейсмических районов Северной Киргизии установили, что прогноз землетрясений во времени может быть достоверным по установлению увеличения содержания гелия и радона. Такой прогноз наиболее вероятен, когда медленное возрастание содержания гелия непосредственно перед землетрясением заканчивается большими кратковременными вариациями импульсного характера, которые могут сопровождаться вариациями того же характера и для радона.

Х. К. Касимовым, В. И. Уломовым и Б. З. Мавашевым установлена корреляционная зависимость между вариациями концентрации радона в термоминеральной воде Ташкентского артезианского бассейна и проявлением сейсмичности в Ташкенте, наблюдавшейся во время землетрясения 26 апреля 1966 г. и его афтершоков.

Впоследствии Г. А. Мавлянов, В. И. Уломов и А. Н. Султанходжаев в результате анализа вариаций газового состава на Ташкентском полигоне установили, что перед крупными землетрясениями происходит постепенный рост концентрации инертных газов: гелия, радона и др. При этом также получена корреляционная зависимость между силой землетрясения и ростом концентрации радона перед землетрясением (во времени и по величине). Также наблюдалось изменение магнитных свойств воды и изотопного состава урана, гелия, аргона, содержания ртути, углекислого газа и других элементов в подземных водах.

В Казахстане ежемесячные наблюдения за химизмом термальных вод, содержанием в них радона, фтора,

гелия и др. микрокомпонентов проводятся в 12 пунктах, в том числе в источниках Медеу, Тургень, Горелик, Алма-Асараи.

С. С. Сардаровым в качестве информаторов, характеризующих изменения сил в недрах Земли, используются потоки гелия и аргона с глубины Земли на ее поверхность. На основании непрерывных полевых круглосуточных масспектрометрических измерений концентрации гелия и аргона в природных газах непосредственно у скважин в различных районах Дагестана установлена зависимость интенсивности глубинных потоков газов от суточного вращения Земли, связанного с наличием приливно-отливных явлений в недрах Земли. Получена корреляция между интенсивностью глубинных газовых потоков и взаимным положением Луны, Земли и Солнца. При этом получено, что минимальный поток бывает при полнолуниях, а максимальный — при новолуниях. На фоне суточных и месячных вариаций глубинных потоков газов установлена динамика их изменений перед слабыми землетрясениями, которая заключается в том, что поток вначале растет, затем снижается до фонового значения и, наконец, на выравнившемся его участке происходит землетрясение. Поскольку весь этот процесс длится более 30 часов, удалось таким путем предсказывать землетрясения за 6—30 часов до их проявления.

А. И. Кравцов и А. И. Фридман на основании проведенных ими исследований геологии и геохимии природных газов ряда площадей Северного Кавказа, расположенных в зонах глубинных разломов, во время анапского (1966 г.) и дагестанского (1970 г.) землетрясений установили, что интенсивность газового потока и его состав существенно меняются при увеличении сейсмической активности.

А. И. Кравцовым, М. И. Кучером и А. И. Фридманом проведены двухлетние (полевые сезоны 1974 и 1975 гг.) режимные исследования вариаций изотопного состава углерода метана и углекислого газа в сейсмоактивной зоне Кавказа. В результате этих исследований ими установлено, что углерод метана за несколько дней до землетрясения сильно облегчается, а затем к моменту землетрясения резко утяжеляется, углерод же углекислого газа, наоборот, к моменту землетрясения облегчается. При этом изменение углерода при далеких

102

землетрясениях составляет 0,2—0,3%, а при близких и сильных землетрясениях доходит до 1%. Таким образом, авторы считают, что изотопные отношения углерода природных газов могут быть использованы в качестве геохимических предвестников для прогноза землетрясений.

Исследования по поискам геохимических предвестников землетрясений в Армении ведутся на Зангезурском полигоне, начиная с 1968 г., и на Приереванском полигоне, начиная с 1974 г.

По данным В. А. Игумнова и Э. С. Халатяна, зангезурские землетрясения 1968 г. заметно активизировали выделение газов в минеральных источниках этой зоны и перераспределили более стабильные компоненты, такие, как хлор, что объясняется притоком более минерализованных глубинных вод.

Д. Г. Осика, А. Б. Мегаев и др. путем анализа нефтепромысловых данных установили увеличение в 4—5 раз относительно фона содержания хлоридов в подземных водах за несколько дней до дагестанского землетрясения 14 мая 1970 г. Ими также было установлено, что незадолго до киятлинского (13.X.1974 г.), салатаустского (23.XII.1974 г.) землетрясений четырнадцатого энергетического класса и чернолесского землетрясения 28 июля 1976 г. пятнадцатого энергетического класса в водах минеральных источников и скважин повысилась минерализация за счет резкого увеличения содержания хлоридов натрия и калия и отчасти кальция относительно фона. Они отмечают, что, как правило, через сутки после землетрясения химический состав вод принимает фоновые значения, но перед афтершоками снова возникают геохимические аномалии.

В результате изучения ряда землетрясений Северного Кавказа (терского — 1912 г., гудермесских — 1950 и 1955 гг., красно-полянских — 1956 и 1971 гг., анапского — 1966 г., старогрозненского — 1970 г. и дагестанских — 1966, 1970, 1974 и 1975 гг.) Д. Г. Осика и др. установлено, что большинству их предшествовало резкое уменьшение дебитов нефти, газа и воды в скважинах и минеральных источниках в эпицентральных зонах, а также на значительных от них расстояниях, достигающих до 300 км. Подтверждено, что газовые аномалии возникают за 5—10 суток, а гидрохимические аномалии — за 3—5 суток до землетрясения. Принято, что

прогноз времени возникновения землетрясения может осуществляться по продолжительности существования геохимических аномалий.

В качестве предвестника землетрясений может служить изменение гидродинамического режима подземных вод, которое наблюдается не только в результате землетрясения (эти данные приведены в действующих сейсмических шкалах), но и в процессе его подготовки, когда вследствие деформаций земной коры происходит изменение порового и пластового давления в жидкой подземной среде, приводящее к изменению уровня воды.

М. А. Садовский, Ф. И. Монахов, И. Г. Киссин и Б. Д. Широков в своем докладе о краткосрочных гидрогеодинамических предвестниках землетрясений, представленном на международный симпозиум по прогнозированию землетрясений, который был созван ЮНЕСКО в Париже в апреле 1979 года, приводят результаты изучения гидрогеодинамических предвестников на наблюдательном полигоне, расположенном на островах Кунашир, Итуруп и в южной части Сахалина. Для наблюдений были использованы скважины глубиной от 500 до 697 м, которые расположены друг от друга на больших расстояниях (230—450 км).

В результате наблюдений на полигоне в течение последних 2—3 лет установлено, что за несколько дней до землетрясения в скважинах начинается снижение уровня воды, которое происходит до определенного уровня, после чего начинается подъем воды. В начале такого подъема и происходит землетрясение. При этом, чем дальше расположены эпицентры землетрясений от скважин, тем выше энергетический класс землетрясений, подготовка которого отражается на уровне воды в этих скважинах, тем на меньшую величину снижается уровень подземных вод и тем меньше промежуток времени между началом снижения уровня воды в скважине и землетрясением; так, перед землетрясением 15 сентября 1978 г. с магнитудой $M=6,5$ снижение уровня подземных вод началось в итурупской скважине, расположенной от эпицентра землетрясения на расстоянии 600 км, за 8 дней до землетрясения, в кунаширских скважинах, расположенных на расстоянии 800 км от эпицентра, за 5 дней и в сахалинской скважине, расположенной на расстоянии 940 км от эпицентра, за 3 дня.

С другой стороны, гидрогеодинамический предвест-

ник сильного землетрясения проявляется не только на больших эпицентральных расстояниях, но также при больших глубинах залегания очага землетрясения. Так, перед землетрясением 21 июня 1978 года с магнитудой $M=7,0$ четкий гидрогеодинамический предвестник наблюдался на расстояниях 450 и 640 км. Глубина залегания очага этого землетрясения составляла 200 км.

Авторы доклада считают, что наблюдаемый гидрогеодинамический предвестник обусловлен изменением напряженного состояния и развитием упругих деформаций в обширной области подготовки землетрясения. Согласно М. А. Садовскому и др., снижение уровня подземных вод в скважинах указывает «на наличие в приповерхностной зоне кратковременных деформаций растяжения, которые приводят к увеличению пор и трещин. При подготовке сильного землетрясения эти деформации сначала образуются вблизи будущего эпицентра и в течение нескольких дней распространяются на сотни километров от него».

Как указывают авторы доклада, гидрогеодинамический предвестник может быть использован для краткосрочного прогноза землетрясений. При этом, если имеются несколько пунктов наблюдений над уровнем подземных вод в скважинах, достаточно удаленных друг от друга, то можно прогнозировать не только время возникновения ожидаемого землетрясения, но и, анализируя характер гидрогеодинамического эффекта в скважинах, указать примерно место и силу этого землетрясения.

Гидрогеодинамический эффект авторами доклада с успехом был использован для краткосрочного прогноза землетрясений в районе южных Курильских островов. Были предсказаны за 2—3 дня время, место и сила двух крупных южно-курильских землетрясений, произошедших 15 сентября и 11 октября 1978 года.

Гидрогеодинамический эффект в виде изменения уровня или давления подземных вод за несколько суток или часов до землетрясения наблюдался также в других сейсмоактивных областях. Так, Б. З. Мавашев наблюдал и описал изменение давления термальной минеральной воды в период ташкентских землетрясений 1966—1969 годов; Р. Ишанкулов и Г. Калугин наблюдали резкое снижение уровня воды в скважине перед

землетрясением 17 мая 1976 года в Газли в Узбекистане.

Такого характера работы проводятся и за границей. В качестве примера можно привести исследования А. Нур и Р. Ковач, которые на основании проведенных наблюдений над изменениями уровня воды в 150-метровой скважине, пробуренной в зоне разлома Сан-Андреас, определили, что изменения порового давления связаны с ползучестью разлома.

Изменения в концентрации радона имели место перед землетрясением в Идзу-Осима (Япония), которое произошло 14 января 1978 г. с магнитудой $M=7,0$. Эти изменения были установлены по непрерывным наблюдениям в течение более двух лет над концентрацией радона в грунтовых водах из колодца глубиной 350 м, расположенного в 25 км от эпицентра этого землетрясения.

Снижение уровня воды наблюдалось также в трех скважинах перед хэнченским (Китай) землетрясением 4 февраля 1975 года с магнитудой $M=7,3$. Наблюдая характер изменения уровня воды в глубоких скважинах до и после таншаньского (Китай) землетрясения 28 июля 1976 года с магнитудой $M=7,8$, было отмечено, что в районе эпицентра в течение 3—4 лет до землетрясения уровень воды непрерывно падал и за 3—4 месяца до землетрясения скорость этого падения сильно повысилась; затем за несколько дней до землетрясения началось мгновенное повышение уровня воды в скважинах.

5. БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Животные, рыбы и птицы перед сильными и разрушительными землетрясениями начинают вести себя необычно. Случаев такого аномального поведения животных перед землетрясениями наблюдалось очень много и известно об этом уже около 200 лет. Однако, несмотря на это, до настоящего времени не сделано существенных шагов для использования этого явления в целях прогнозирования времени возникновения сильных разрушительных землетрясений.

В большинстве случаев о таком поведении животных становится известно после землетрясений. Иногда об

этом узнают до землетрясений, но и оно не встречает должного внимания. Следует отметить, что при этом в основном приводятся одни только качественные признаки, говорящие об аномальном поведении животных, без каких-либо количественных показателей.

По данным Ц. И. Андерсона, полученным в результате обобщения большого материала исторического характера, перед землетрясением животные в зоопарках упорно отказываются заходить в свои убежища, особенно ночью, крупный рогатый скот разбегается в панике и стремится к возвышенностям, домашние животные сильно возбуждаются, собаки лают и скулят, кошки шипят и возвращаются домой лишь после завершения толчков, дикая птица покидает свои обычные жилища, змеи, ящерицы и мелкие млекопитающие эвакуируются из своих подземных нор, насекомые скапливаются в огромные кучи около морских берегов.

В книге П. Руссо «Землетрясения» с ссылкой на другие источники приводятся описания поведения животных перед некоторыми землетрясениями. Так, за день до панамского землетрясения 1882 г. обычно болтливые попугаи замолкли, стали грустными и беспокойными, жалобно и протяжно завывали собаки, забеспокоились в своих стойлах лошади, как бы предчувствуя надвигающуюся опасность. Очень образно описано, как повела себя собака перед мессинской катастрофой. В гостинице Мазотти остановилась труппа комедиантов, в составе которой были два подростка — братья Микеле и Альфредо Гамбия. Под утро 28 декабря 1908 г. вся гостиница была погружена в глубокий сон. Спали и мальчики. Вдруг братьев разбудил собачий лай их пса Менелика, растянувшегося у ног своих хозяев. Дети рассердились и велели ему замолчать, но Менелик не слушался, продолжал лаять еще громче, метаться, прыгать, тащить их с постели. В результате вся гостиница проснулась. Люди не могли понять, что случилось. Но Менелику наконец удается заставить их понять, что он хочет. Он начинает тянуть Микеле и Альфредо к двери, выводит их на улицу, заставляет выйти из города в сопровождении всех остальных пораженных комедиантов. Как только эта странная процессия вышла из города, произошло землетрясение, превратившее Мессину в груды развалин. Так, благодаря собаке Менелику вся труппа комедиантов была спасена от неизбежной смерти.

Имеются описания поведения животных и перед от-
носительно недавними землетрясениями.

По сведениям очевидцев, перед ашхабадским землетрясением 5 октября 1948 года змеи и ящерицы стали уходить из своих нор, лошади конного завода стали проявлять сильное беспокойство, сорвались с привязей и разбежались, собаки начали скулить, вынуждая в некоторых случаях своих хозяев выйти из помещений.

Перед землетрясением в Скопле 26 июля 1963 г. наблюдалось сильное беспокойство животных зоологического сада: трагически стал выть потомок дикой собаки динго, жалобно кричал слон, громко выла гиена, были в беспокойстве тигр, лев, леопард, бегемот выскочил из воды и перепрыгнул через высокую ограду. К ним присоединились птицы. Спустя некоторое время все звери умолкли, забившись вглубь клеток. Вслед за этим произошло землетрясение.

Я. Суэхиро указывает на очень большое количество случаев необычного поведения рыб перед сильными землетрясениями. В частности, за два дня перед катастрофическим землетрясением 1 сентября 1923 г. возле пляжа под Токио была обнаружена рыба, которая водится только на большой глубине, в день же сильного землетрясения 1933 г. на побережье был обнаружен глубоководный угорь. Пойманная у острова Ниидзима 9 ноября 1963 г. очень большая глубоководная рыба оказалась предвестником сильного землетрясения, которое произошло спустя два дня.

На Международном симпозиуме по прогнозу землетрясений, который состоялся в Париже в апреле 1979 г., были представлены два доклада (от Китая и США), в которых описываются биологические предвестники землетрясений.

Анализ поведения животных перед сильными землетрясениями, которые имели место в Китае за последние 12 лет, показал, что аномальное поведение различных животных в большинстве случаев находится в пределах 24 часов до землетрясения. Однако бывают случаи, когда биопредвестники проявляются за несколько минут или несколько дней и даже более до сильного землетрясения. При этом аномальное поведение животных начинается перед землетрясениями с магнитудой 5 и более.

Описывается созданная в США (по примеру Китая)

есть квалифицированных наблюдателей-добровольцев в составе до 300 человек, проживающих вдоль сейсмически активных зон Калифорнии. Работа наблюдателей состоит в ежедневном собирании сведений о поведении животных, которое оценивается по балльной системе от 0 до 4 (от обычного до весьма необычного поведения). Целью работы является подтверждение возможности использования биопредвестников для прогнозирования времени возникновения сильных землетрясений.

Реакция животных на землетрясения, по-видимому, различная. Например, змеи о предстоящем землетрясении узнают по слабым подземным толчкам и вибрации земли; собаки могут услышать микроразломы пород до сильного землетрясения и появления разрывов на поверхности, маленькая белая аквариумная рыбка (в Японии) за несколько часов до землетрясения начинает вести себя очень беспокойно, мечется в аквариуме, делает резкие движения, создавая волны, и т. д.

По всей вероятности, есть и общие признаки, которые воздействуют на животных, имеющих высокодифференцированную нервную систему и органы чувств.

Одной из основных задач в рассматриваемой проблеме является определение параметров землетрясений, вернее, параметров процессов, предшествующих землетрясениям, на которые реагируют животные. Многие, в том числе и американский геофизик Р. В. Симон, считают, что на животных воздействуют изменения электромагнитного поля. Ч. А. Асабаевым и Ю. А. Холодовым были проведены модельные лабораторные работы, заключающиеся в исследовании электроэнцефалограммы кроликов и двигательной активности различных птиц при воздействии искусственно создаваемых слабых электромагнитных полей. Указанные физиологические показатели были выбраны в связи с тем, что они достаточно точно отражают деятельность нервной системы животных и могут регистрироваться непрерывно. В результате получено изменение электроэнцефалограммы кроликов и увеличение двигательной активности птиц. Наряду с этим также велись наблюдения над контрольными животными, которые не находились под воздействием электромагнитного поля, и у них этих реакций не возникло. Другие исследователи придерживаются мнения о воздействии на животных ультразвука, увеличения электрических токов, возбуждаемых в

недрах земли, при разрядке которых в атмосфере происходит изменение концентрации электронов и возникают свечения, усиления ионизации воздуха и т. д.

Другим направлением проблемы является изучение механизма реакции животных на указанные параметры. Считается, что живая клетка является электрическим механизмом, в котором макромолекулярная структура служит основой для преобразования одного вида энергии в другую. Так, например, изменения электронной энергии могут быть интерпретированы животными, особенно те, которые вызваны явлениями, аномальными в обычной окружающей среде.

Следующим аспектом проблемы является создание инструментальных возможностей для записи указанных выше изменений в поведении животных перед предстоящими сильными землетрясениями.

Таким образом, чтобы иметь возможность прогнозировать землетрясения по поведению животных, в первую очередь следует изучить с большой полнотой природу землетрясений с целью выявления параметров, к которым восприимчивы различные животные. Затем необходимо в лабораторных условиях воспроизвести эти параметры и изучить их действие на животных.

Изучение поведения животных перед землетрясением может послужить основой и для разработки сейсмических приборов для записи сильных землетрясений, в основном в эпицентральных областях, а также на удаленных от эпицентра расстояниях (на телесеизмических станциях). В последнем случае, например, можно использовать то обстоятельство, что водяной жук чувствует волны высотой в $4 \cdot 10^{-8}$ мм, а саранча — механические колебания с амплитудой, равной диаметру атома водорода.

Кроме указанного глубокого научного подхода, для решения рассматриваемой проблемы уже сейчас можно организовать сеть биосейсмических станций, на которых проводить визуальные наблюдения над поведением животных, фиксируя каждый раз их аномальное поведение. Такими станциями могут служить зоопарки, питомники, животноводческие фермы, птицефабрики, экспериментальные базы научно-исследовательских институтов, словом, все те места, где имеется скопление животных. Можно создать также сеть корреспондентов из лиц, имеющих домашних животных. Помимо этого

целесообразно иметь животных (собак, рыбок в аквариуме и т. д.) на всех сейсмических станциях, находящихся в сейсмоактивных районах, где можно контролировать их поведение по последующей сигнализации и записи самого землетрясения.

Для выполнения всех перечисленных работ необходимо привлечь широкий круг специалистов в области геофизики, сейсмологии, сейсмометрии, биофизики, зоологии, этологии, бионики и инженерной сейсмологии. Проблема очень сложная, она требует глубокого всестороннего изучения, составления детальной программы и осуществления работ по прогнозированию землетрясений на основании поведения животных.

6. НЕКОТОРЫЕ ДРУГИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Связь между солнечной активностью и землетрясениями отмечена еще в начале нашего века. Было установлено, что сейсмические возмущения наблюдаются главным образом в периоды ослабления солнечной активности.

В конце 30-х годов Пьером Бернаром, на основании обработки большого количества записей, полученных примерно за тридцать лет, были построены кривые солнечной активности и микросейсмической активности и показано, что они очень похожи, а солнечная активность опережает микросейсмическую примерно на два года.

В последующем П. Руссо построил график зависимости между сейсмической и солнечной активностями и определил, что максимум сейсмической почти совпадает с минимумом солнечной активности. Это особенно четко проявилось на кривой для 1923 г.

А. Д. Сытинский связь между солнечной активностью и сейсмичностью Земли объясняет атмосферными возмущениями, возникающими вследствие изменения солнечной активности, которые вызывают нарушения установившегося движения в атмосфере и приводят к перераспределению массы атмосферы по земному шару и, следовательно, нарушению равновесия фигуры Земли. Он считает, что эти атмосферные возмущения и являются одной из причин возникновения наиболее сильных землетрясений.

Можно считать установленным, что неравномерность солнечной активности приводит к аномалиям вращения Земли и ее сейсмичности. Следовательно, солнечная активность может служить в качестве предвестника сильных землетрясений.

В 1974 г. В. А. Широков выявил, что почти все сильные землетрясения Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии произошли в определенных фазах лунных приливов, имеющих период 18,6 года. Пользуясь этой зависимостью, он для Камчатки определил годы, в которые вероятность сильных землетрясений возрастает. Активные периоды для Камчатки получены В. А. Широковым длительностью в 3 года, в которых вероятность землетрясений с магнитудой больше 7 примерно равна 0,8, а спокойные периоды получены им с той же длительностью в 3 года, в которых вероятность землетрясений с магнитудой больше 7 равна примерно 0,1.

Советскими исследователями Я. Г. Бирфельдом и А. В. Таранцевым впервые было установлено, что сейсмичность Земли оказывает влияние на ионосферу, которая весьма чувствительна к воздействию акустических волн, образуемых землетрясением. В связи с этим Я. Г. Бирфельдом предлагается использовать ионосферные эффекты для прогнозирования изменений сейсмического режима Земли, поскольку малые колебания Земли возрастают в ионосфере на несколько порядков. Установлено, что за 22, 20, 2—5 часов до землетрясения возмущенность ионосферы, как правило, повышается, а за 12—14 и 1 час до момента землетрясения, наоборот, ослабевает; после же землетрясения в большинстве случаев возмущенность сильно возрастает. Таким образом, ионосферные возмущения могут служить предвестниками сильного землетрясения.

Приливы и отливы, вызываемые притяжением Солнца и Луны, образуются под действием сил притяжения, действующих как на океаны, так и на твердую землю. При этом в океанах высота приливной волны достигает 15 метров, а суша в течение суток может подниматься и опускаться до нескольких десятков сантиметров.

Представляют большой интерес проведенные советскими учеными работы по определению приливных напряжений на различных глубинах и при различной

ориентировке площадок для отдельных районов и сопоставление хода этих напряжений с моментами землетрясений, которые могут послужить основой для представления приливных напряжений в качестве предвестника землетрясений.

Г. П. Тамразяном изучен вопрос о связи сейсмичности Земли с лунно-солнечными приливами. С этой целью им рассмотрены все сильнейшие землетрясения мира с магнитудой $M \geq 7,9$, происшедшие за 80 лет, с 1897—1976 гг. Им выделены такой силы 214 землетрясений, которые произошли в шести главных сеймотектонических областях, из которых пять являются материковыми (или их обрамлениями). Для всех сеймотектонических областей были построены графики выделения сейсмической энергии в течение лунных суток. Согласно построенным графикам, оказалось, что для всех материковых областей и их бортовых окаймлений наибольшая сейсмическая энергия выделяется в период нахождения Луны у горизонта при ее восхождении и в первые 3—4 часа движения Луны от горизонта к зениту. Следовательно, на материках и их окаймлениях приливные усилия Луны имеют наибольшее воздействие, когда горизонтальные усилия имеют максимальные значения, а вертикальные — минимальные. Для океанической Западно-Тихоокеанской области наблюдается обратная картина, а именно, сейсмичность этой области максимальна при нахождении Луны вблизи зенита, т. е. когда вертикальные усилия имеют максимальные, а горизонтальные — минимальные значения.

Автором исследована также зависимость сейсмичности Земли от солнечных приливов. Однако, как указывает он, во внутрисуточном распределении энергии по местному солнечному времени не наблюдается максимумов. Это объясняется тем, что приливообразующая сила Луны в 2,2 раза больше, чем приливообразующая сила Солнца, и поэтому влияние Солнца оказывается подавленным приливообразующей силой Луны. Однако учет определенного солнечного времени усиливает связь сейсмоактивности с приливными силами, а именно, влияние приливных усилий Луны на сейсмичность материков и их окаймлений сильно (в 4—12 раз) увеличивается при нахождении у горизонта Луны и одновременно Солнца.

Г. П. Тамразяном сделана попытка выявить связи

землетрясений Армении с космическими условиями. Им рассмотрено распределение сильных землетрясений в Армении с $K \geq 11$ во времени и в пространстве, в основном, под влиянием Луны. В результате проделанной работы он пришел к выводу, что число сильных землетрясений в Армении резко увеличивается при нахождении Луны у горизонта.

Другим возможным фактором на пути предсказания землетрясений может служить установление характера распределения и механизма накоплений температурных напряжений. При этом представление о температурном поле в верхних слоях Земли можно получить в результате изучения тепловых потоков, идущих из недр Земли, и установления их вариаций. В соответствии с этим у нас в СССР и в Японии проводятся работы по определению характера изменения термического поля Земли в период подготовки землетрясений с целью выяснения возможности использования его в качестве предвестника землетрясений.

Одним из возможных и уже давно высказываемых путей прогнозирования является использование в качестве предвестника сильных землетрясений геошумов, возникающих в земной коре в результате мелких нарушений в виде отдельных сдвигов, трещин и т. д., являющихся подготовительным для землетрясения процессом. Эти звуки или шумы улавливаются с помощью чувствительных звукоприемников.

Таким путем итальянские ученые старались предсказать извержение вулканов, а американцы — возникновение землетрясений. Однако ни те, ни другие не пришли к положительному результату. Помимо сомнений по существу, само техническое осуществление таких работ связано с большими трудностями и огромными затратами.

В качестве предвестника сильного землетрясения могли бы служить возникающие перед землетрясением все возрастающие по силе предварительные толчки — форшоки, которые начинаются за несколько дней, а иногда и за несколько лет до основного толчка. К сожалению, пока еще не установлена определенная последовательность в форшоках или какие-либо закономерности в их проявлениях, которые явились бы надежным предвестником землетрясения.

Вообще-то трудно отличить форшоки от основного

землетрясения, ибо часто колебания так и затухают, не вызывая серьезных последствий. Однако бывает и наоборот. В качестве примера можно привести известное японское землетрясение 1 сентября 1923 г., которому в течение ряда лет предшествовали все усиливающиеся толчки и, наконец, в 1922 г. после особенно сильного толчка было высказано мнение, что это и есть основной толчек. Все успокоились, а через год произошла ужасная катастрофа.

Детальное изучение сейсмического режима позволяет проследить его изменение во времени и выявить определенные закономерности в период подготовки сильного землетрясения. В результате изучения сейсмического режима на Гармском, Карпатском и других геодинамических полигонах нашей страны оказалось, что перед сильным землетрясением с магнитудой $M \geq 5$ наступает сейсмическое «затишье» в эпицентральной области этого землетрясения. Такая же картина затишья перед сильным землетрясением наблюдалась и в зарубежных сейсмоактивных районах.

В качестве примера можно привести наблюдавшуюся аномальную фоновую сейсмическую активность, предшествовавшую землетрясению в Сонгпан-Пингву (Китай), которое произошло 16 августа 1976 г. с магнитудой 7,2. В эпицентральной области этого землетрясения сейсмическая активность понизилась, т. е. наступило сейсмическое «затишье», а непосредственно перед началом землетрясения появились форшоки в виде толчков малой интенсивности, причем частота их повторений все более увеличивалась. На основе такой аномальной сейсмической активности, с учетом также других предвестников, это землетрясение заблаговременно было предсказано.

Таким образом, одним из сейсмологических предвестников сильных землетрясений в определенном районе, по-видимому, может служить затишье в сейсмическом режиме этого региона.

Ценную информацию о подготовке сильного землетрясения можно получить, изучая частотный состав сейсмических колебаний при слабых землетрясениях в этом же районе. Было отмечено, что соотношение амплитуд высокочастотных и низкочастотных компонент колебаний в период подготовки сильного землетрясения резко изменяется, а именно: если в обычное время за-

пись большей части слабых землетрясений характеризуется преобладанием низкочастотных составляющих, то в момент подготовки сильного землетрясения наблюдается значительное уменьшение низкочастотной и резкое увеличение высокочастотной составляющих записи колебаний. Такое изменение частотного состава сейсмических колебаний начинает проявляться за 3—4 месяца в зоне будущего сильного землетрясения 12—13 энергетических классов.

Весьма интересные результаты получены при изучении механизма слабых землетрясений с точки зрения их использования для прогноза сильных землетрясений. Определение механизма землетрясений на Гармском полигоне И. Л. Нерсесовым и И. Г. Симбиревой, а также на Душанбино-Нурекском геофизическом полигоне О. В. Соболевой, Г. П. Шклер и Е. Э. Благовещенской показало, что сильные землетрясения 12—13 энергетических классов возникают вблизи границ зон с различным характером подвижек в очагах. Как показали исследования, Гармский район по механизму очагов может быть разбит на блоки. В каждом блоке наблюдается упорядоченное направление осей сжатия. Примерно за два-три месяца до момента возникновения землетрясения 12—13 энергетических классов на значительной большей площади по сравнению с размерами будущего очага землетрясения это направление осей сжатия меняется. Причем новое, возникшее в период подготовки сильного землетрясения, направление оси сжатия соответствует ориентации оси сжатия в очаге будущего сильного землетрясения.

Следовательно, непрерывное изучение напряженного состояния в очагах слабых землетрясений сейсмоактивного региона позволит своевременно узнать о предстоящем сильном землетрясении в этом регионе.

7. ПУТИ ПРЕДСКАЗАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Предсказание сильных и разрушительных землетрясений — одна из трудных задач современной науки, имеющая важное крупное народнохозяйственное значение. Необходимость проведения работ по прогнозу землетрясений отмечалась еще Б. Б. Голицыным в 1911 году.

Попытки прогнозирования сильных землетрясений делались многими учеными. Наиболее известными в этом смысле являются работы Г. Беньоффа, предложившего высвобождение упругих деформаций, сопровождающее землетрясение или вызывающее его, выражать графически в зависимости от времени. При этом высвобожденная деформация выражается через энергию E следующим образом:

$$E^{1/2} = \epsilon C, \quad (5.1)$$

где $C = (\frac{1}{2} \mu V)^{1/2}$. Здесь V — объем горных пород, а μ — упругая константа этих пород.

Таким образом, корень квадратный из энергии землетрясения прямо пропорционален высвобожденной упругой деформации.

График Беньоффа строится в виде зависимости накопленной суммы приращений $\Sigma E^{1/2}$ от времени и представляет собой характеристику высвобождения упругих деформаций при землетрясениях. График Беньоффа состоит из чередующихся интервалов сейсмической активности и относительного покоя. При этом начальные точки активных интервалов соответствуют тем моментам времени, когда деформация, накопленная в земной коре, достигает максимального значения, а конечные точки активных интервалов соответствуют моментам времени, когда накопленная в земной коре деформация имеет минимальные значения. Если соединить точки минимальных и максимальных деформаций соответственно двумя прямыми, то расстояние между этими прямыми по вертикали в каждый момент времени будет соответствовать величине накопившихся в земной коре деформаций, способных вызвать землетрясение определенной магнитуды.

Японский ученый Цубои предложил для прогнозирования землетрясений использовать график хода выделения суммарной сейсмической энергии с течением времени. С этой целью он построил график выделения суммарной сейсмической энергии ΣE по наблюдениям сильных землетрясений в Японии и ее окрестностях за 100-летний период времени. Согласно Цубои, этот график сверху и снизу жестко ограничен двумя наклон-

ными прямыми, расстояние между которыми по вертикали соответствует энергии самого крупного землетрясения, возможного в данном сейсмоактивном регионе. Из этого графика для любого момента времени определяется максимальное землетрясение, которое может произойти в Японии и ее окрестностях. Энергия этого землетрясения будет равна расстоянию по вертикали от кривой суммирования ΣE до верхней ограничивающей прямой. Но будет ли это одним землетрясением или оно окажется разбитым на много мелких — предсказать согласно этой методике невозможно. Поэтому сам Цубои называет свой метод «отрицательным методом прогноза».

А. Г. Назаровым проблема прогноза землетрясений рассмотрена с точки зрения теории подобия твердых деформируемых тел. Земная кора принята как полупространство, занятое однородным материалом. Введен множитель геометрического подобия α и исследованы два частных случая механического подобия.

В первом случае материалы оригинала и модели подчинены одинаковым соотношениям напряжений и деформаций, в частности, модули упругости модели и оригинала равны, а ускорение силы тяжести для модели в α раза меньше, чем для оригинала. При этом масштаб времени и геометрические характеристики очага, то есть линейный размер и глубина очага, для модели в α раза больше, чем соответствующие величины для оригинала.

Во втором случае материалы оригинала и модели подчинены таким соотношениям напряжений и деформаций, при которых напряжение для модели в α раза больше, чем для оригинала, а деформации модели и оригинала равны. Модуль упругости для модели в этом случае в α раз больше модуля упругости для оригинала. Ускорения силы тяжести для модели и оригинала одинаковы. При этом масштаб времени для модели в $\sqrt{\alpha}$ раз больше, чем для оригинала. Геометрические характеристики очага для модели, как и в первом случае, в α раз больше, чем для оригинала.

Рассмотрев эти два случая подобия применительно к землетрясениям, А. Г. Назаров показал, что в первом случае в земной коре могут существовать сейсмические очаги малой протяженности. Соответствующие этим очагам землетрясения он назвал землетрясениями первого класса.

Во втором случае в земной коре могут существовать сейсмические очаги большой протяженности. Отвечающие этим очагам землетрясения он назвал землетрясениями второго класса. При этом для землетрясений первого класса ускорение меняется обратно пропорцио-

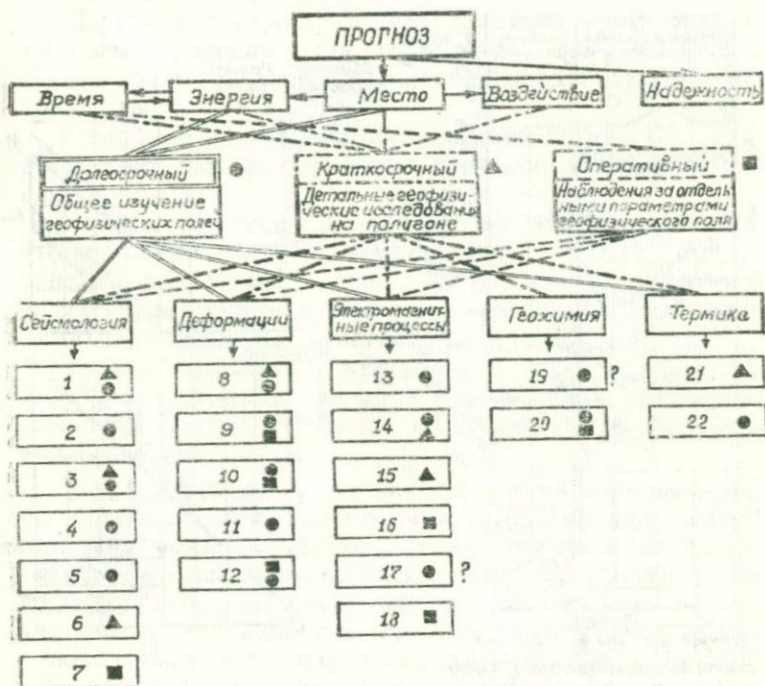


Рис. 25. Общая схема прогнозных наблюдений. Знаком вопроса отмечены методы, требующие проверки. 1 — пространственный режим (x, y, H, t, E); 2 — $v_p/v_s, A_s/A_p$; 3 — механизм очагов; 4 — сброс напряжения в очаге; 5 — частотный анализ; 6 — прозвучивание; 7 — акустика; 8 — геодезия, нивелировка, триангуляция; 9 — наклоны земной поверхности; 10 — деформация; 11 — дебет скважин и источников; 12 — пластовое давление; 13 — теллурические токи; 14 — зондирование на переменном и постоянном токе; 15 — магнитные вариации; 16 — дифференциальные магнитные наблюдения; 17 — электропроводность воды источников; 18 — атмосферное электричество; 19 — сорбированные газы в породах, радон, гелий, CO_2 , ртуть; 20 — химический состав источников и скважин, радон, CO_2 , и др.; 21 — тепловой поток в скважинах; 22 — температурный режим источников.

нально линейным размерам очага, а для землетрясений второго класса ускорение не зависит от размеров очага.

Основываясь на соотношениях, установленных Н. В. Шебалиным, между периодом длиннопериодных колебаний и размерами очага, а также между магнитудой и

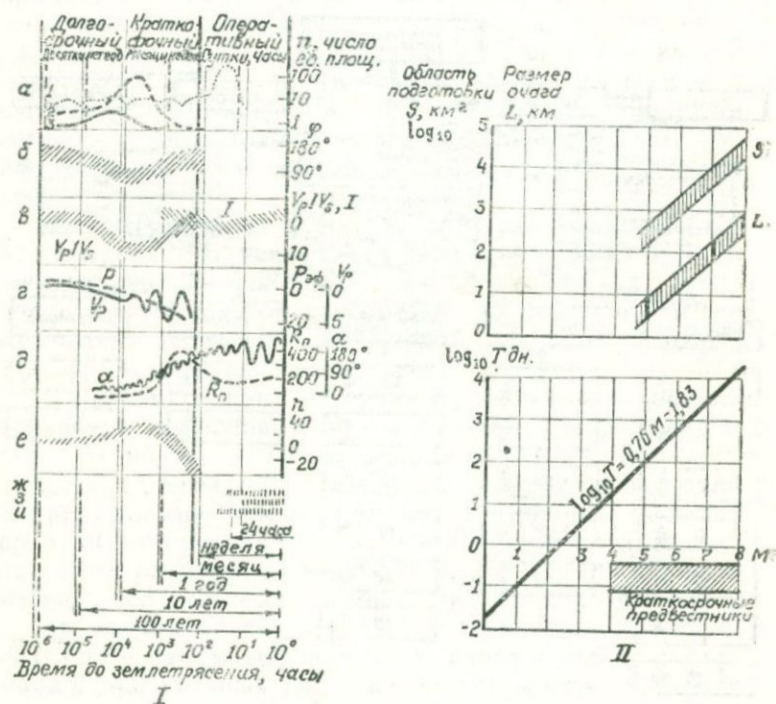


Рис. 26. Характер прогнозных сигналов в зависимости от времени (I) и зависимости: размера L очага, области подготовки землетрясения S и времени наблюдений предвестников T от магнитуды землетрясения (II). а) сейсмический режим: 1 — очень слабые землетрясения $M \leq 1$; 2 — слабые $M = 1.5-2$; 3 — средние $M = 3-4$; б) изменение азимута осей напряжения; в) 1 — отношение скоростей продольных и поперечных волн и изменение теллурического тока; г) изменение электрического сопротивления и скорости продольных волн от искусственных источников; д) наклоны земной поверхности и содержание радона в источниках; е) нивелирование; ж) аномальное поведение биоорганизмов; з) свечение атмосферы; и) ультразвук. Заштрихованный участок нижнего графика II на рисунке указывает область существования быстротекущих предвестников.

длиной очага, А. Г. Назаровым определены отрезки времени Δt_0 от начала предвестника землетрясения до начала самого землетрясения в зависимости от магнитуды или длины разлома, на основании которых можно прогнозировать землетрясение.

Первая программа исследований по прогнозированию землетрясений была составлена у нас в Советском Союзе сразу же после ашхабадского землетрясения 1948 года.

Подобные программы исследований по прогнозу землетрясений начали составлять в Японии и США только спустя 15 лет.

Работы советских и зарубежных ученых показали, что проблема прогноза землетрясений может быть с успехом разрешена только при условии комплексного ее изучения силами сейсмологов, геологов, геофизиков, химиков, метеорологов, астрофизиков, биологов и т. д.

Главной трудностью при решении этой задачи является невозможность ведения наблюдений непосредственно в земных глубинах, в области очага будущего землетрясения.

Таким образом, за состоянием земной коры возможно наблюдать лишь косвенными методами. На основании этих методов разработана модель процесса подготовки землетрясения, согласно которой сильному землетрясению предшествуют различного рода предвестники: изменения скоростей распространения продольных и поперечных волн, появление магнитных возмущений, теллурические и атмосферно-электрические явления, возмущения земного электрического поля, изменения аномалий силы тяжести, резкое возрастание деформаций и наклонов земной коры, изменение уровня грунтовых вод и режима минеральных источников, предварительные толчки — форшоки, биологические и т. д.

На рисунке 25 дана общая схема прогнозных наблюдений, предложенная М. А. Садовским и И. Л. Нерсисовым.

На этой схеме представлен весь комплекс наблюдений, необходимый для проведения долгосрочного, краткосрочного и оперативного прогноза. При этом время долгосрочного прогноза от 1 года до 10 лет, краткосрочного прогноза от 1 до 6 месяцев и оперативного прогноза от нескольких часов до 1—2 дней. Ими же разра-

ботаны все те возможные защитные мероприятия, которые необходимо проводить при каждом виде прогноза.

На схеме рис. 26, заимствованном из вышеуказанной работы М. С. Садовского и И. Л. Нерсесова, по материалам Гармского полигона дана форма сигналов, предшествующих землетрясениям, и средние зависимости между временем появления предвестников и магнитудой землетрясения. На этой же схеме указаны примерные размеры очагов землетрясений при различных магнитудах, а также соответствующие области, где можно ожидать появления предвестников. При этом на схеме выделены все три этапа прогноза: долгосрочный, краткосрочный и оперативный.

На основании наблюдений на Гармско-Душанбинском полигоне М. А. Садовским и И. Л. Нерсесовым показана возможность прогнозирования сильных землетрясений по совокупности предвестников. Ими проведен детальный анализ характера изменения геофизических величин на Гармском полигоне перед сентябрьским землетрясением 1976 г. с $M=5,2$ и декабрьским землетрясением 1977 г. с $M=5,0$. При этом долгосрочными предвестниками явились отношения скоростей продольных и поперечных волн, краткосрочными — изменение скорости деформации и кажущееся сопротивление, а также «затишье» землетрясений, оперативными — изменение магнитного поля и форшоки перед землетрясением 1976 г. и быстрые изменения наклонов и деформаций, а также электрические сигналы в атмосфере перед декабрьским землетрясением 1977 г.

В результате М. А. Садовский и И. Л. Нерсесов приходят к выводу, что «длительные предвестники (скорости упругих волн) дают информацию об общей критической ситуации в районе «затишья» — районе возможного землетрясения: скорость деформации, кажущееся сопротивление и магнитное поле поддерживают предположение о готовящемся землетрясении, а быстрые изменения наклонов земной поверхности, деформаций земной коры и электрического тока в атмосфере дают довольно точное значение момента землетрясения».

Гармские землетрясения 1976 и 1977 гг. являются не единичными случаями подтверждения прогноза землетрясений. Имеется ряд землетрясений, заранее предсказанных по изменению тех или иных геофизических ве-

личин. В частности, по наблюдениям изменения уровня вод в скважинах и электрического сопротивления горных пород на острове Кунашир 14 февраля 1979 года был сделан прогноз сильного землетрясения, который спустя шесть дней подтвердился, а именно, вблизи юго-восточного побережья японского острова Хоккайдо произошло землетрясение, сила которого в эпицентре была равна десяти баллам по 12-балльной сейсмической шкале.

В Институте физики Земли Академии наук СССР составлено техническое задание на разработку макета системы комплексных базисных наблюдений прогностического полигона, согласно которому необходимо создание пунктов наблюдений, предназначенных для комплексной регистрации параметров различных полей и процессов, используемых при решении задач проблемы прогноза землетрясений, в цифровой форме с целью непосредственного ввода в ЭВМ.

На территории Армянской ССР в области прогнозирования землетрясений проводится ряд работ в геологическом, геофизическом, сейсмологическом и инженерно-сейсмологическом направлениях.

Завершается строительство комплексной Гарнийской подземной геофизической обсерватории, проводится оснащение ее необходимой аппаратурой и оборудованием, и под руководством академика АН Армянской ССР А. Г. Иосифяна на базе этой обсерватории создается центр сейсмо-космических исследований с целью прогнозирования землетрясений.

Проектируются и строятся новые сейсмические станции: «Джермук», «Иджеван», «Арарат», «Бюракан», а также проводится дооснащение существующих станций аппаратурой и оборудованием для записи как сильных, так и очень слабых землетрясений с целью изучения изменений сейсмического поля, в частности отношения скоростей продольных и поперечных волн.

Организуются группы передвижных комплексных геофизических, сейсмологических и инженерно-сейсмологических станций для срочной регистрации сопутствующих сильному землетрясению серий повторных толчков непосредственно в эпицентральной зоне и проведения детальных наблюдений за динамикой сейсмоактивных разломов.

Проводятся исследования режима гидро-газо-геохи-

мических изменений в сейсмических очаговых зонах.

Исследуются физико-механические свойства горных пород сейсмоактивных районов республики в условиях относительно высоких давлений и температур.

Намечается создание биосейсмической сети для изучения поведения животных перед землетрясением.

Проводятся высокоточные геодезические, гравиметрические, электромагнитные и другие режимные наблюдения. Изучается сейсмический режим территории республики. Намечается составление ряда детальных карт тектонической, трещинной тектоники, новейшей тектоники, линсаментов и разломной тектоники.

На основании анализа и обобщения комплекса полученных данных с учетом механизма очагов землетрясений составляется карта сейсмической опасности.

Проводятся работы по физическим основам прогнозирования.

В настоящее время существуют две теории, объясняющие процесс подготовки сильного землетрясения и характер изменения различных геофизических величин — предвестников землетрясений. Одна из этих теорий, так называемая теория дилатансии (неупругого расширения пород), первоначально предложенная Нуром и в последнее время получившая широкое распространение среди американских сейсмологов. Сущность этой теории заключается в следующем. В районе очага перед землетрясением происходит образование трещин и увеличивается объем пород. Это ведет к уменьшению порового давления, что приводит к некоторому упрочнению пород зоны и в сущности задерживает землетрясение. Последующий приток воды из окружающих толщ вследствие процессов диффузии и подтока жидкости в природных условиях со стороны является причиной нового возрастания порового давления, которое резко ускоряет процесс сейсмического разрушения. Таким образом, заполнение пор и вновь образовавшихся трещин водой создает ту критическую добавку, которая приводит в действие спусковой механизм образования сильного землетрясения.

Лабораторные исследования, проведенные К. Хэдли и У. Ф. Брейсом, подтвердили модель дилатансии. Однако еще не совсем ясно, в какой мере может осуществляться механизм дилатансии при различной глубине очагов. Ведь количество и состояние воды в горных по-

родах изменяются с глубиной. Кроме того, рассматриваемая модель не учитывает главного действующего фактора — тектонических напряжений.

Вторая теория, объясняющая процесс подготовки сильного землетрясения в виде процесса трещинообразования, разработана у нас в Советском Союзе В. И. Мячкиным, Б. В. Костровым, Г. А. Соболевым, О. Г. Шаминой и названа ими лавинообразным нарастанием трещинообразования (ЛНТ). Согласно этой теории, «подготовка собственно землетрясения начинается с лавинообразного нарастания числа и величины трещин после достижения их «критической» плотности в некотором объеме и заканчивается образованием нескольких «стартовых» трещин в плоскости будущего магистрального разрыва. Этот разрыв — землетрясение — образуется разрушением перемычек между зародышевыми трещинами».

Эта теория хорошо объясняет ход различных предвестников землетрясений во времени. Авторами настоящей теории проведен детальный анализ временного хода скоростей упругих волн, энергии землетрясений, наклона графика повторяемости, концентрации радона, электросопротивления и теллурических потенциалов, деформаций и других предвестников и сделан вывод о том, что теория ЛНТ позволяет объяснить все существенные явления при подготовке землетрясения.

Следует отметить, что теория лавинообразного нарастания трещинообразования находит все более широкое признание у специалистов не только у нас в стране, но и за рубежом.

Таким образом, как следует из всего изложенного, имеются все предпосылки для того, чтобы сделать реальной возможность предсказания времени возникновения сильных и разрушительных землетрясений. Более того, как указывает академик М. А. Садовский, в принципе не исключена возможность вмешательства человека и в развитие процесса в очаге будущего землетрясения с целью предотвращения землетрясений инженерными методами.

Глава 6

ОСНОВЫ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ В СЕЙСМИЧЕСКИХ РАЙОНАХ

Расчет на сейсмические воздействия принципиально отличается от любого другого вида расчета при статических или динамических воздействиях. Если в последних случаях внешнее воздействие известно и описывается вполне четкой закономерностью, то в первом случае внешнее сейсмическое воздействие не известно, оно весьма неопределенно и приходится часто им задаваться исходя из записей, в лучшем случае уже происшедших в данном месте землетрясений.

Таким образом, первым основным затруднением при сейсмических расчетах является вопрос правильного выбора сейсмического воздействия. Другим не менее важным вопросом при этом является правильное установление расчетных схем инженерных сооружений, представляющих собою сложные пространственные системы, подвергающиеся действию сейсмических сил.

В этих направлениях проведено очень много исследований, в особенности во второй половине нашего века, в результате чего внесена определенная ясность в указанные вопросы.

Важное значение в сейсмостойком строительстве имеют вопросы проектирования. На основании результатов научных исследований, опыта проектирования и строительства, а также анализа последствий разрушительных землетрясений разработаны принципы проектирования зданий и сооружений в сейсмических районах. Соблюдение этих принципов обеспечивает надежность заданий и сооружений при сейсмических воздействиях.

В этой главе дана история развития методов расчета на сейсмические воздействия, описан спектральный ме-

тод расчета, принятый в строительных нормах и правилах (СНиП) по сейсмостойкому строительству, рассматриваются вопросы учета нелинейных деформаций при расчетах на сейсмические воздействия, приводятся основные принципы, которых следует придерживаться при проектировании зданий и сооружений для строительства в сейсмических районах.

1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ РАСЧЕТА НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Описания последствий разрушительных землетрясений появились очень давно. В Армении, например, они известны за несколько веков до нашего летосчисления (наиболее характерные из них описаны нами в 2-ой главе книги). Однако первые шаги в объяснении появляющихся при землетрясении повреждений и количественного определения сейсмического эффекта были сделаны лишь в конце прошлого и начале нашего века.

В 1900 г. японским ученым Омори были проведены специальные эксперименты над кирпичными столбиками на вибрационной платформе, которой сообщались гармонические колебания различной интенсивности. В результате были получены максимальные величины ускорений платформы, вызывающих разрушение экспериментальных столбиков. На основании полученных данных, принимая, что сооружение при колебаниях не деформируется, а совершает лишь возвратно-поступательные перемещения, Омори впервые была предложена формула (некоторые считают автором этого предложения другого японского ученого Сано) для определения сейсмических сил:

$$S = ma = Q \frac{a}{g} = K_c Q, \quad (6.1)$$

где S — сейсмическая сила, действующая на сооружение;

m — масса сооружения;

Q — вес сооружения;

a — максимальное сейсмическое ускорение основания сооружения (грунта);

g — ускорение силы тяжести.

В формуле (6.1) коэффициент пропорциональности—

K_c является сейсмическим коэффициентом, показывающим, какую часть от ускорения силы тяжести составляет максимальное ускорение в основании сооружения, возникающее при землетрясении. В этом случае нет необходимости знать закон колебаний основания сооружения при землетрясении; важно знать лишь возникающее максимальное ускорение, которое передается сооружению. При этом ускорения во всех точках сооружения будут одинаковы и равны ускорению в основании сооружения.

Теория Омори получила широкую известность как статическая теория сейсмостойкости. Она сыграла важную роль, во-первых, потому, что давала количественную оценку действующим при землетрясении сейсмическим силам; во-вторых, показала, что они не очень большой величины и могут быть учтены в расчетах.

Последующий анализ разрушительных землетрясений начала XX века, таких, как сан-францисское 1906 г., мессинское 1908 г. и др., происшедших после появления статической теории сейсмостойкости, выявил ее недостатки и показал, что ряд явлений, имевших место при землетрясениях, не может быть объяснен в рамках этой теории. Так, в большинстве зданий и сооружений при землетрясениях возникали существенные деформации, приводящие к тому, что перемещения и ускорения их точек получались различными и в большинстве случаев большими, чем перемещения и ускорения основания. Это указывало на необходимость учета упругих свойств сооружений, а также принятия реальных законов колебаний грунта при землетрясении.

В 1920 г. другой японский ученый Мононобэ предложил формулу для определения сейсмической силы:

$$S = K_c \beta Q. \quad (6.2)$$

При этом он представил сооружение как систему с одной степенью свободы и исходил из того, что сооружение деформируется, а колебания его основания происходят по гармоническому закону. Им были рассмотрены только вынужденные колебания, а затухание колебаний не было учтено.

В формуле (6.2) β , которая является коэффициентом нарастания колебаний или коэффициентом динамичности, определяется из следующего выражения:

$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{T^2}{T_0^2}}, \quad (6.3)$$

где T — период свободных колебаний сооружения;
 T_0 — период колебаний основания сооружения при землетрясении.

Для жестких зданий, период свободных колебаний которых очень мал по сравнению с периодом (преобладающим) землетрясений, коэффициент динамичности β стремится к 1, и формула Мононобэ (6.2) переходит в формулу Омори (6.1).

Таким образом, хотя теория Мононобэ и явилась более прогрессивной по сравнению с теорией Омори, однако она не была лишена недостатков, которые ограничили ее применение. Наиболее существенным недостатком являлось то, что Мононобэ не учитывал влияния свободных колебаний. А между тем разрушения сооружений происходили в первые моменты землетрясения, когда еще имели место свободные колебания, которые, накладываясь на вынужденные колебания, усиливали эффект их воздействия. Другим недостатком являлся неучет затухания колебаний, в результате чего формула Мононобэ оказывалась неприемлемой в условиях резонанса, когда $T = T_0$, ибо в этом случае сейсмическая сила получалась равной бесконечности, что противоречит действительности.

Недостатки теории Мононобэ особенно ярко выявились в результате анализа последствий разрушительных землетрясений в Канто (1923 г.), Санта-Барбара (1925 г.), Ленинакане (1926 г.) и Крыму (1927 г.).

В 1927 г. советским ученым К. С. Завриевым впервые была высказана мысль о необходимости учета свободных колебаний при определении сейсмического воздействия.

Эта мысль была изложена в пояснительной записке к конкурсному проекту на сейсмические конструкции для г. Ленинакана, где предлагалось наряду с вынужденными колебаниями учитывать также влияние свободных колебаний. При этом он исходил из того, что в начальный момент колебаний почвы при землетрясении ускорение должно иметь максимальное значение, а скорость равняться нулю. Для удовлетворения этого условия колебания почвы, в первом приближении, были при-

няты по закону косинуса. Такое предположение обосновывалось физическими процессами, происходящими внутри Земли в период возникновения землетрясения, когда происходила внезапная разрядка постепенно накопившейся перед землетрясением потенциальной энергии.

Таким образом, К. С. Завриев показал, что при сейсмических воздействиях сопротивляемость зданий и сооружений существенным образом зависит не только от максимального значения ускорения, как это предполагал Омори, не только от ускорения и периода гармонических колебаний, как это следует из теории Мононобэ, но и от вида приложения сейсмического ускорения в начальный период колебаний почвы во время землетрясения. Тем самым К. С. Завриев и заложил основы динамической теории сейсмостойкости.

В этом случае динамический коэффициент в начальной стадии колебаний будет:

$$\beta = \frac{2}{1 - \frac{T^2}{T_0^2}}. \quad (6.4)$$

Следовательно, максимальные значения сейсмических сил по К. С. Завриеву получаются в два раза больше, чем у Мононобэ.

Предложенная К. С. Завриевым и разработанная им совместно с А. Г. Назаровым динамическая теория сейсмостойкости получила дальнейшее развитие как у нас в СССР, так и за границей.

В 1934 г. американский ученый М. Био предложил в качестве расчетной характеристики силы землетрясения с инженерной точки зрения принять спектральную кривую ускорений. В последующем, в 1941 г., когда в США уже были получены первые акселерограммы сильных землетрясений, М. Био сконструировал специальный механический интегратор и построил спектральные кривые по этим инструментально полученным акселерограммам (без учета рассеяния энергии). Проведя огибающую спектральных кривых, он получил так называемый «стандартный спектр ускорения», который показан на рисунке 27.

Таким образом, М. Био первым предложил спектральный метод определения сейсмических сил. Основным достоинством этого метода является использова-

ние для анализа сейсмических сил действительных записей землетрясений и представление сейсмических сил в спектральном виде, т. е. в зависимости от периода собственных колебаний сооружений. Недостатком при этом является неучет затухания колебаний.

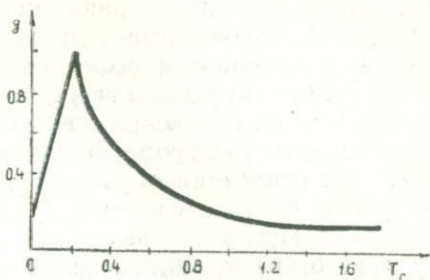


Рис. 27. Стандартный спектр ускорения Био.

В 1945 г. советским ученым А. Г. Назаровым был предложен метод прямого инструментального определения максимальных значений сейсмических сил, действующих на здания и сооружения, путем непосредственного интегрирования уравнений движения почвы при землетрясении с помощью маятниковых сейсмометров, моделирующих здания и сооружения по их периоду и декременту колебаний. С этой целью были разработаны и изготовлены маятниковые сейсмометры, используемые и в настоящее время для записи землетрясений и сильных взрывов. Полученный при этом большой фактический материал по спектральным кривым приведенных сейсмических ускорений (упругих реакций линейных осцилляторов маятниковых сейсмометров, отнесенных к единице массы) послужил основой для проведения ряда работ по расчету зданий и сооружений на сейсмические воздействия и осуществления сейсмического районирования и микрорайонирования территории некоторых районов СССР. В качестве примера на

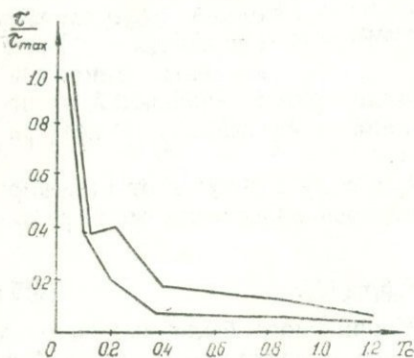


Рис. 28. Кривые приведенных сейсмических ускорений.

качестве примера на

рисунке 28 приведены кривые приведенных сейсмических ускорений, полученные при землетрясении и сильном взрыве с помощью многомаятниковых сейсмометров.

В 1949 г. американские ученые Г. Хаузнер и др. предложили метод получения спектров ускорений с помощью специального электромеханического аналогового устройства. На основании обработки 28 акселерограмм были получены 80 спектральных кривых при различных затуханиях. При этом спектральные кривые без учета затухания были похожи на полученную М. Био «стандартную кривую», а в случае учета затухания — сильно отличались.

На рисунке 29 приведены наиболее характерные точки зрения авторов кривые при двух различных значениях затухания.

В 1954 г. советский ученый И. Л. Корчинский на основе анализа результатов обследования зданий при ашхабадском землетрясении 1948 г. и обработки сейсмограмм некоторых слабых землетрясений, происшедших в СССР, предложил метод определения сейсмических сил. При этом

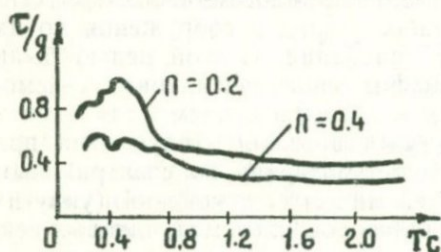


Рис. 29. Спектральные кривые, полученные Хаузнером.

движение грунта предлагалось принимать в виде суммы затухающих синусоид, однако в дальнейшем в расчетах оно было представлено в виде лишь одной затухающей синусоиды. Были введены динамический коэффициент β (в виде кривой, зависящей от периода, свободных колебаний и затухания) и коэффициент формы колебаний γ .

Расчетную сейсмическую силу в точке k от i -ой формы колебаний им предлагалось определять из выражения:

$$S_{ik} = K_{ci} \beta_i \gamma_{ik} Q_k. \quad (6.5)$$

Предложения И. Л. Корчинского были включены в нормы проектирования в сейсмических районах 1957 г. и в последующие их издания. Подробнее об этом будет сказано в следующем параграфе.

Таким образом, в настоящее время как у нас в СССР, так и за границей при расчетах на сейсмические воздействия широкое распространение получила спектральная теория сейсмостойкости, которая исходит из того, что при землетрясениях деформации сооружения остаются в пределах упругости.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПО СНиП

В соответствии с действующими СНиП II-A.12—69 «Строительство в сейсмических районах» расчетная сейсмическая нагрузка в точке k , соответствующая i -му тону собственных колебаний сооружения, определяется по формуле:

$$S_{ik} = Q_k K_c \beta_i \gamma_{ik} \quad (6.6)$$

При этом расчетная схема сооружения (рис. 30) принимается в виде заделанного в нижнем конце консольного стержня с сосредоточенными в уровнях междуэтажных перекрытий грузами Q , соответствующими расчетной величине вертикальной нагрузки.

В формуле (6.6) Q_k — является расчетной вертикальной нагрузкой, сосредоточенной на уровне « k » и определяемой как сумма всех вертикальных нагрузок на перекрытии « k » и на пол-этажа выше и ниже этого перекрытия. При этом учитываются соответствующие коэффициенты перегрузок для постоянных и временных нагрузок.

Значение расчетного коэффициента сейсмичности — K_c принимается равным: для 7 баллов — 0,025; для 8 баллов — 0,05 и для 9 баллов — 0,1. Коэффициент динамичности — β_i , соответствующий i -ой форме собственных колебаний сооружения, определяется по формуле:

$$\beta_i = \frac{1}{T_i}, \quad (6.7)$$

где T_i — период собственных колебаний сооружения, который определяется по общим методам динамики сооружений или по эмпирическим формулам, полученным на основании натурных испытаний.

Формула (6.7) действительна для значений β в пределах от 0,8 до 3.

Коэффициент η_{ik} , зависящий от формы деформации сооружения при его собственных колебаниях по i -ой форме и от места расположения нагрузки Q_k , определяется по формуле:

$$\eta_{ik} = \frac{X_i(x_k) \sum_{j=1}^n Q_j X_i(x_j)}{\sum_{j=1}^n Q_j X_i^2(x_j)} \quad (6.8)$$

В этой формуле $X_i(x_k)$ и $X_i(x_j)$ — отклонения сооружения при собственных колебаниях в точке k и во всех точках j , где сосредоточены соответствующие массы.

Таким образом, при определении расчетной сейсмической нагрузки необходимо знать форму деформации, периоды, а также декременты колебаний сооружения.

В случае высоких сооружений, имеющих небольшие размеры в плане, таких, как башни, мачты, дымовые трубы и подобные им сооружения, коэффициент β_i рекомендуется увеличивать в 1,5 раза (вследствие малого затухания в этих сооружениях).

Увеличение до 1,5 раза коэффициента β_i также рекомендуется для каркасных, крупнопанельных и монолитных зданий и сооружений в случае их большой гибкости или этажности. Наоборот, в случае каркасных одноэтажных производственных зданий высотой до 8 м и пролетами не более 18 м коэффициент β_i уменьшается путем умножения на 0,8.

Для зданий и сооружений, имеющих период основного тона собственных колебаний больше 0,5 сек., расчет на сейсмические воздействия рекомендуется осуществлять с учетом высших форм колебаний, а в случае менее 0,5 сек., когда их жесткость и масса по высоте меняются незначительно, разрешается ограничиваться учетом только первой формы колебаний.

В последнем случае, когда здания имеют сложную конструктивную схему и высоту не более 5 этажей, допускается принимать $\beta = 3$, а η_{ik} вычислять по упрощенной формуле:

$$\eta_{ik} = \frac{x_k \sum_{j=1}^n Q_j x_j}{\sum_{j=1}^n Q_j x_j^2}, \quad (6.9)$$

принимая, что здание не изгибается, а поворачивается вокруг оси, проходящей через верхний обрез фундамента; x_k и x_j — расстояния до соответствующих масс сооружения (см. рис. 30).

В новой редакции СНиП, как и все предыдущие разработанные ЦНИИСК им. Кучеренко совместно с другими ведущими институтами СССР, имеется ряд коренных изменений, а также существенных дополнений и уточнений. Приводим наиболее важные из них, которые дополняют ранее описанные в начале этого параграфа положения.

Одним из основных положений новой редакции СНиП является то, что расчет зданий и сооружений на сейсмические воздействия должен иметь целью не допускать предельных состояний в течение всего срока их службы. В связи с этим установлены две группы предельных состояний зданий и сооружений: I — по потере несущей способности или непригодности к эксплуатации; II — по непригодности к нормальной эксплуатации, которые выбираются в зависимости от их эксплуатационных характеристик.

Другим важным положением является установление двух этапов расчета зданий и сооружений на сейсмические воздействия: по **уровню А** — на условные статические нагрузки, в предположении их упругой работы, по которому рассчитываются все здания и сооруже-

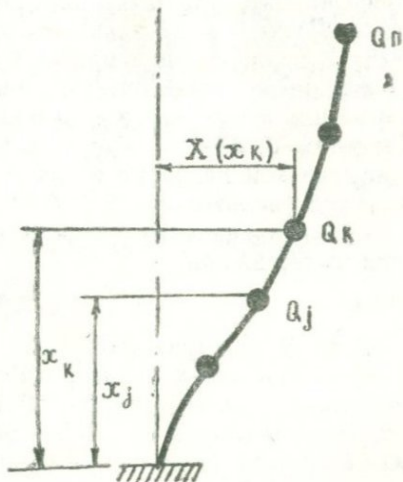


Рис. 30. Расчетная схема сооружения.

ния, строящиеся в сейсмических районах: по уровню Б — на сейсмические воздействия, описываемые акселерограммами, велосигramмами, сейсмограммами прошлых сильных землетрясений, происшедших в районе строительства или в аналогичных по сейсмологическим условиям местностях, в основном с учетом неупругих деформаций или локальных повреждений, а также пространственной работы, по которому рассчитываются особо ответственные или с новыми конструктивными решениями здания и сооружения.

Фактически расчет по уровню А соответствует расчету на сейсмические воздействия, который принят в действующих СНиП, разница заключается лишь в том, что в новой редакции СНиП введены дополнительные коэффициенты, а имеющиеся уточнены.

Расчетная сейсмическая нагрузка по уровню А определяется по формуле:

$$S_{ik} = K_H K_K K_{nc} S_{oik}. \quad (6.10)$$

В этой формуле K_H — коэффициент надежности, учитывающий вероятностный характер нагрузки и степень опасности наступления предельного состояния сооружения, который устанавливается утверждающей проект организацией на стадии задания на проектирование и имеет значение в основном в пределах 1,0—1,5; K_K — коэффициент, учитывающий конструктивные особенности сооружения, зависящий от вида, этажности и гибкости сооружения и меняется в пределах 0,6—1,5; K_{nc} — коэффициент, зависящий от принятого для данного сооружения предельного состояния, который находится в пределах 0,14—1,0; S_{oik} — среднее значение условной сейсмической нагрузки в точке k , соответствующей i -му тону собственных колебаний сооружения.

Среднее значение сейсмической нагрузки определяется из выражения:

$$S_{oik} = Q_k \alpha_i K_\psi \eta_{ik}. \quad (6.11)$$

В этой формуле нагрузки — Q_k , сосредоточенные в точке k , при определении умножаются на коэффициенты сочетания: для постоянных 0,9, временных длительных — 0,8, кратковременных — 0,5. Среднее значение амплитуды ускорений (в долях ускорения силы тяжести — g) основания А соответствует сейсмичности площадки строительства и равно: 0,09 — для 7 баллов; 0,18 — для

8 баллов; 0,36 — для 9 баллов. Коэффициент, учитывающий диссипативные свойства конструкции K_ϕ , зависящий от вида материала, особенностей конструктивного решения, характера узловых соединений и стыков, меняется в пределах 1,0—1,5. Коэффициент η_{ik} зависит от формы деформации сооружения при его собственных

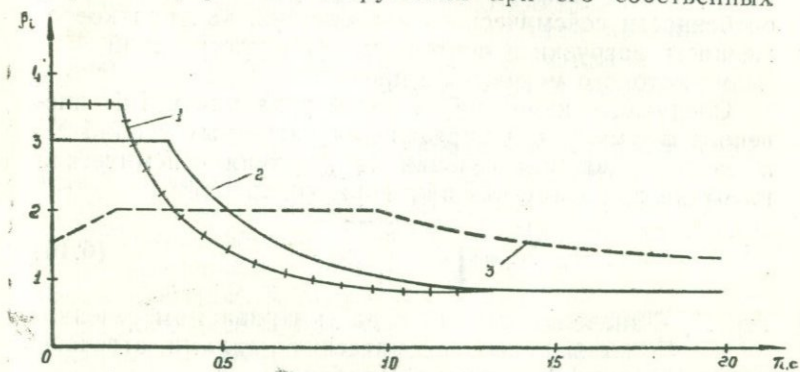


Рис. 31. Кривые зависимости спектрального коэффициента динамичности от периода T для различных грунтов: а) I категории; б) II категории; в) III категории.

колебаниях по i -ой форме и от места расположения нагрузки Q_k и определяется по формулам (6.8) или (6.9).

Спектральный коэффициент динамичности β_i определяется в зависимости от периодов собственных колебаний сооружения T_i по графикам на рисунке 31 и по формулам в зависимости от категорий грунтов, описание которых дается в СНиП:

а) для грунтов I категории (при $\beta = 0,8—3,5$)

$$\beta_i = \frac{0,7}{T_i}, \quad (6.12)$$

б) для грунтов II категории (при $\beta = 0,8—3,0$)

$$\beta_i = \frac{1}{T_i}, \quad (6.13)$$

в) для грунтов III категории
при $T > 0,2$ с (для $\beta \leq 2,0$)

$$\beta_i = \frac{2}{T_i^{0,5}}, \quad (6.14)$$

при $T \leq 0,2c$

$$\beta_i = 1,5 + 2,5T_i \quad (6.15)$$

Кроме этого, при расчетах на прочность и устойчивость элементов конструкций вводится дополнительный коэффициент условий работы m_c , учитывающий такие особенности сейсмического воздействия, как кратковременность нагрузки и повторяемость землетрясений, значения которого меняются в пределах 0,7—1,6.

Следующее изменение в новой редакции СНиП внесено в формулу для определения расчетных усилий N_p в рассматриваемом сечении от действия сейсмической нагрузки при учете высших форм колебаний

$$N_p = \sqrt{\sum_{i=1}^n N_i^2} \quad (6.16)$$

где N_i — значения усилий в рассматриваемом сечении, вызываемых сейсмическими силами, отвечающими i -ой форме колебаний;

n — число учитываемых в расчете тонов колебаний.

В новой редакции СНиП рекомендуется при расчете зданий и сооружений длиной более 30 м также учитывать крутящий момент относительно вертикальной оси, проходящей через центр жесткостей, по формуле:

$$M_{kp} = S_{ik}e, \quad (6.17)$$

где S_{ik} — суммарная горизонтальная сейсмическая нагрузка;

e — фактический эксцентриситет между центрами масс и жесткостей.

На других изменениях СНиП, не имеющих существенного значения при определении сейсмического воздействия, не будем останавливаться.

3. УЧЕТ НЕЛИНЕЙНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ РАСЧЕТЕ СООРУЖЕНИЙ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

В новой редакции СНиП, которые находятся в процессе издания, для особо ответственных и с новыми конструктивными решениями зданий и сооружений при их расчете на сейсмические воздействия по уровню Б, рекомендуется учитывать нелинейные деформации, возникающие в зданиях и сооружениях.

В связи с этим мы и приводим описание состояния вопроса по учету нелинейных деформаций при расчете и проектировании зданий и сооружений на сейсмические воздействия (без формул и рисунков).

Наиболее ранними работами по динамическому расчету сооружений за пределом упругости при импульсивных воздействиях являются исследования А. А. Гвоздева (1943), И. М. Рабиновича (1947), А. Р. Ржаницына (1954).

В последующем исследовании сейсмостойкости сооружений с учетом нелинейных деформаций были проведены В. К. Кабуловым (1956), Ш. Г. Напетваридзе (1956), И. И. Гольденблатом (1957), Н. А. Николаенко (1960), С. С. Дарбиняном (1959), Э. Е. Хачияном (1964), А. С. Тяном (1964), Р. Х. Мурусидзе (1965) и др.

За последнее десятилетие работы этого направления получили дальнейшее развитие. Они имеют целью выявить резервы несущей способности зданий и сооружений при работе за пределами упругости и учесть их в расчете и проектировании на сейсмические воздействия.

В результате анализа последствий сильных и разрушительных землетрясений установлено, что в сооружениях, выдержавших землетрясения, возникают значительные пластические деформации, которые не учитываются спектральной теорией сейсмостойкости. Между тем они могут служить резервом несущей способности сооружений и способствовать повышению их сопротивляемости сейсмическим воздействиям. В связи с этим уже давно появилась необходимость в оценке нелинейных деформаций при проектировании сооружений для сейсмических районов, которое в основном сводится к обеспечению упруго-пластической работы сооружений при расчетном сейсмическом воздействии.

При учете пластических деформаций расчет сооружений существенно осложняется, поскольку принятие нелинейных диаграмм деформирования приводит к нелинейным дифференциальным уравнениям, точное решение которых не представляется возможным. Поэтому исследование нелинейных колебаний при сейсмических воздействиях осуществляется с некоторой схематизацией расчетной диаграммы деформирования. Обычно принимают идеальную упруго-пластическую или полилинейную диаграммы. Однако большинство реальных конструкций имеет криволинейную диаграмму деформиро-

вания. Исходя из этого, в случае отсутствия экспериментальных кривых деформирования при расчетах, по крайней мере, правильнее пользоваться билинейной диаграммой, описывающей деформации по закону линейного упрочнения или осуществлять соответствующий подбор параметров для аппроксимации с достаточной точностью реальных кривых деформаций.

Дополнительные трудности появляются при вероятностной постановке нелинейных задач колебаний сооружений при сейсмических воздействиях.

Только путем применения современных средств вычислительной техники удастся достичь того, чтобы решать сложные дифференциальные уравнения теории сейсмостойкости с учетом нелинейности деформаций сооружений, используя реальные акселерограммы сильных землетрясений.

Расчет сооружений за пределом упругости и выявление резервов их несущей способности при сейсмических воздействиях получили в настоящее время широкое распространение. Результаты этих исследований позволяют создать для некоторых сооружений расчетные модели с целью разработки приближенных методов расчета. При этом значительное внимание уделяется выявлению резервов, связанных с работой сооружений в пластической стадии. Путем применения материалов с отчетливо выраженной площадкой текучести расчет сводится к рассмотрению возможных состояний сооружений при заранее известных предельных значениях усилий в конструктивных элементах этих сооружений. В результате создается возможность разработки приближенных, носящих оценочный характер, методов расчета, вполне приемлемых для их непосредственного применения при проектировании сооружений для сейсмических районов.

Таким образом, методы расчета сооружений на сейсмические воздействия с учетом нелинейных упруго-пластических деформаций следует развить до такого уровня, чтобы можно было бы их применять в строительном проектировании.

Учет упруго-пластических деформаций, как указывалось, приводит к значительному уменьшению сейсмических сил, но вместе с тем может выявить возникновение больших остаточных смещений, недопустимых для нормальной эксплуатации сооружений. Исходя из этого,

помимо теоретических расчетов с учетом упругопластических деформаций, проводятся экспериментальные исследования с целью определения действительных деформаций сооружений за пределами упругости и установления допустимых величин остаточных деформаций.

При проектировании также следует предусмотреть конструктивные мероприятия, создающие возможность развития пластических деформаций, появления пластических шарниров, которые могут резко снизить сейсмический эффект без существенного ущерба для общей сопротивляемости сооружения.

Выявление резервов несущей способности сооружений при сейсмических воздействиях, с одной стороны, является основой для объяснения существенного несоответствия между реальными сейсмическими силами, действующими на сооружения при землетрясении, и их нормированными величинами, на которые рассчитываются сооружения, а с другой стороны, оно служит основанием для рассмотрения вопросов обеспечения экономного расходования строительных материалов и снижения стоимости строительства при проектировании сооружений для сейсмических районов.

Ниже приведены некоторые результаты, полученные на основании проведенных в СССР теоретических и экспериментальных исследований в направлении учета развития нелинейных деформаций в сооружениях при сейсмических воздействиях.

Понятие предельного состояния конструкций применительно к сейсмостойкости, при допущении пластических деформаций, было сформулировано И. И. Гольденблатом, благодаря исследованиям которого в настоящее время общепринято определение понятия предельного состояния, как состояния повреждения сооружений, появления в них местных дефектов и разрушений, не грозящих гибелью людей и материальных ценностей.

Н. С. Стрелецким в качестве характеристик предельных состояний конструкций при сейсмических воздействиях было предложено нормирование предельных величин остаточных деформаций, которые устанавливались на основании физических критериев несущей способности и заданной обеспеченности сохранности сооружений.

Дальнейшим развитием этих идей явилось предложение Г. Н. Карцивадзе, который, отмечая недостаточ-

ность силового условия в качестве критерия перехода системы в динамическое предельное состояние, ввиду переменности усилий во времени, предложил деформационное условие, констатирующее развитие предельных деформаций в соответствующих связях.

На основании анализа системы с одной степенью свободы, деформирующейся по билинейной диаграмме, Т. Н. Чачава получил выражения для определения величин максимального отклонения и пластической деформации в произвольном полуцикле колебаний, а также предельной пластической деформации.

Для анализа колебаний упруго-пластической системы А. С. Тяном использована диаграмма Прандтля. При этом движения основания представлены в виде затухающей синусоиды и в виде реальных акселерограмм землетрясений. В результате установлено, что период колебаний основания существенно влияет на пластическую реакцию системы и что при сейсмических воздействиях возможно разрушение конструкции от чрезмерного одностороннего развития пластических деформаций.

С. С. Дарбиняном осуществлен анализ параметров колебаний упруго-пластической системы с одной степенью свободы, дифференциальное уравнение которой, при принятии диаграмм деформирования по закону линейного упрочнения, представляется в общем виде для всех зон упруго-пластического нагружения и разгружения. Путем использования условий сшивания в точках перехода от одной зоны к другой диаграммы «сила—перемещение» им получены решения для свободных и вынужденных колебаний. В последнем случае в качестве внешнего воздействия были использованы акселерограммы землетрясений интенсивностью в 7 и 8 баллов. В результате установлено, что учет пластических свойств системы приводит к уменьшению величин приведенных ускорений, а также скоростей, на 35—40%, тогда как максимальные перемещения при упругом и упруго-пластическом решениях отличаются незначительно, а пластические и остаточные деформации уменьшаются с увеличением коэффициента пластичности и уменьшением коэффициента упрочнения. Им исследованы также упруго-пластические колебания зданий при представлении их в виде систем со многими степенями свободы. Решения дифференциальных уравнений представлены в ортогональной форме, и в результате расчета 4-этажного

и 13-этажного зданий установлено, что учет упруго-пластических деформаций приводит к уменьшению сейсмических нагрузок в 1,5—2,5 раза.

Н. А. Николаенко исследованы колебания нелинейной системы с жидким наполнением методом статистической линеаризации и стохастическим методом. Первый метод решения позволяет рассматривать нелинейные системы, не упрощая процесса внешних воздействий, а второй метод дает возможность изучить одночастотный режим колебания системы с несколькими степенями свободы при любом характере ее нелинейности. Полученные решения позволили разработать практический способ расчета нелинейно-упругих систем на действие сейсмических сил и показать, что учет нелинейности системы существенно снижает величины сейсмических сил.

Э. Е. Хачияном изучены задачи о нелинейных колебаниях сооружений при сейсмических воздействиях по акселерограммам сильных землетрясений. Рассматривая влияние принятой диаграммы деформирования, описываемой кубической параболой, на величину инерционной сейсмической нагрузки, он приходит к выводу, что учет нелинейности почти не влияет на максимальные значения перемещений и приводит к уменьшению максимальных значений ускорений в среднем до 1,6 раза. На основании исследования колебаний систем с одной и многими степенями свободы, при принятии диаграммы деформирования по Прандтлю (для различных коэффициентов пластичности) получено, что для жестких сооружений, имеющих период свободных колебаний меньше 0,6с, остаточные деформации незначительны, а для периодов от 0,7 до 1,2с имеют большие величины; значения максимальных перемещений с учетом пластических деформаций почти всегда меньше их значений при упругих колебаниях. В результате автор приходит к выводу, что ввиду незначительности влияния пластических деформаций в сооружениях они не могут вызвать существенных повреждений.

Т. А. Горояном изучены вопросы сейсмостойкости железобетонных каркасных зданий до 16 этажей по реальным акселерограммам сильных землетрясений. Произведено сопоставление линейных и нелинейных реакций конкретного 10-этажного каркасного здания при идентичных сейсмических воздействиях, в резуль-

тате чего установлено, что нелинейная работа стоек приводит к снижению сейсмического воздействия в пределах 25—45%.

Интересный путь стохастического анализа поведения сооружений при землетрясениях с учетом упруго-пластических деформаций был предложен А. Г. Назаровым, который в дальнейшем получил разработку в его совместных с Р. О. Амаяном и С. С. Дарбиняном работах.

Сущность способа, в отличие от обычно применяемой переработки вероятностных характеристик колебаний почвы при землетрясении в вероятностные характеристики сейсмического воздействия на сооружения, заключается в рассмотрении каждого разрушительного землетрясения как детерминированного процесса, по записям которого вычисляются напряженное или деформированное состояние сооружения или возникающие в нем усилия. Затем для рассматриваемого сооружения то же самое повторяется по записям других разрушительных землетрясений. После накопления для этого сооружения достаточного количества реализаций землетрясения, определяются для напряжений, деформаций или усилий необходимые вероятностные характеристики, уточняемые в процессе получения новых данных.

На основании предложенного способа было осуществлено решение упруго-пластической задачи с использованием 13- и 7-балльных землетрясений, происшедших в США.

В результате получено, что при возникновении упруго-пластических деформаций в материале конструкций сейсмическая нагрузка существенно уменьшается даже при относительно малых деформациях. Так, для одного из рассмотренных землетрясений получено, что при незначительной допустимой величине остаточных деформаций сейсмическая нагрузка уменьшается более чем в три раза.

Этот способ с большим успехом может быть использован при расчетах на сейсмические воздействия.

Перечень теоретических исследований по учету нелинейных деформаций при сейсмических воздействиях можно было бы продолжить и дальше. Однако из-за ограниченности объема книги это не представляется возможным. Остановимся еще на некоторых экспериментальных исследованиях металлических и железобетонных конструкций, связанных с проектированием

таких сооружений в сейсмических районах СССР.

Известно, что стальные конструкции за счет пластических свойств обладают значительными резервами несущей способности. Однако вследствие их выполнения из тонкостенных элементов появляется опасность в местной потере устойчивости, что в значительной степени ограничивает возможность использования пластических резервов стали.

Исходя из этого, проведены исследования по рациональному учету пластических свойств элементов стальных конструкций и осуществлению конструктивных мероприятий с целью проектирования сооружений, способных на заданном уровне воздействия, проявляя пластичность, поглощать энергию колебаний при сейсмических воздействиях и тем самым способствовать обеспечению сохранности сооружений при сильных землетрясениях.

Л. А. Бородиным проведены исследования по использованию пластических резервов металла в сооружениях, В. И. Моисеевым и М. С. Дузинкевичем по оценке упруго-пластической работы балок стальных каркасов с учетом устойчивости стенок при сейсмических воздействиях, Г. М. Остриковым и Ю. С. Максимовским по определению влияния уровня пластических деформаций на энергоемкость ригелей стальных рамных каркасов, учитывая, что развитие пластических шарниров в колоннах, как правило, недопустимо из-за возможной потери их устойчивости, а надежность работы каркаса на горизонтальные сейсмические нагрузки определяется энергоемкостью ригелей.

На основании приведенных, а также некоторых других исследований в «ЦНИИпроектстальконструкция» разработаны «Рекомендации по расчету металлических рамных каркасов на сейсмические воздействия с учетом образования пластических шарниров», которые являются развитием главы СНиП II-A.12—69 «Строительство в сейсмических районах. Нормы проектирования», и содержат обоснования по расчету рамных металлических конструкций на сейсмическое воздействие, а также включают в себя примеры расчета.

Колебания железобетонных конструкций при сейсмических воздействиях большой интенсивности носят явно выраженный нелинейный характер. Это объясняется, во-первых, существенным снижением их жесткости, в результате постепенного развития трещин и, во-вторых,

появлением пластических деформаций в арматуре, которые приводят к остаточным деформациям конструкции в целом. При сейсмических воздействиях железобетонные конструкции рассматриваются как нелинейные упруго-пластические гистерезисные системы с переменными параметрами.

Большой интерес представляют динамические исследования железобетонных конструкций при интенсивных воздействиях вплоть до разрушения, получение некоторых закономерностей, а также диаграмм деформирования при повторных знакопеременных нагружениях, необходимых при составлении дифференциальных уравнений колебаний нелинейной системы.

Г. А. Шапиро и В. Ф. Захаровым обобщены материалы вибрационных натурных испытаний в основном железобетонных сооружений в нелинейной области, в результате чего были обнаружены «допредельные» явления, связанные с тем, что в экстремальной точке кривой «сила — перемещение» не происходит разрушения конструкции и она обладает еще определенной величиной жесткости. При дальнейшем приращении ускорения происходит большое нарастание деформации конструкции вплоть до полного ее разрушения. Величина соответствующего смещения определяет дополнительный запас прочности конструкции, не учитываемый расчетом.

В. А. Ржевским и Г. А. Аванесовым рассмотрено упруго-пластическое деформирование каркасных систем при знакопеременном циклическом нагружении на основании проведенных экспериментальных исследований модели каркасной системы, состоящей из двух трехэтажных, трехпролетных железобетонных рам, объединенных в каркас связевыми ригелями, в масштабе $1/3$ натуральной величины. В результате установлены запасы неупругой энергоемкости конструкции и проведены некоторые конструктивные мероприятия, которые были рекомендованы на основе испытаний отдельных конструктивных элементов, работающих на изгиб и внецентренное сжатие.

Экспериментальные исследования фрагментов железобетонных каркасов натурных размеров на горизонтальные знакопеременные статические и динамические воздействия вплоть до их разрушения проведены В. А. Степаняном. В результате получено, что при воздействии сил, превышающих расчетную сейсмическую на-

грузку в 1,5 раза, трещины в элементах и узлах рамы не превышали допустимых величин для несущих элементов при нормальной эксплуатации здания. Эта нагрузка соответствовала началу образования пластических шарниров в наиболее напряженных участках ригелей. При этом каркас сохранял способность к последующему деформированию за счет дополнительных резервов, без образования существенных остаточных деформаций. При этом резерв несущей способности составлял более 100%. Этим в основном и обуславливается сейсмостойкость каркасных зданий при сильных землетрясениях, когда фактические ускорения грунта значительно превышают ускорения, принятые по нормам.

В результате исследования сейсмостойкости предварительно напряженных и обычных сборных железобетонных конструкций Т. Ж. Жунусов на основании полученных коэффициентов динамичности для предварительно напряженных конструкций, которые в упругой стадии возрастают, а в упруго-пластической снижаются примерно на 10—15%, приходит к выводу, что сейсмостойкость предварительно напряженных конструкций при землетрясениях расчетной интенсивности выше по сравнению с эквивалентными обычными железобетонными конструкциями. При этом автор считает, что расчет здания на реальные сейсмические воздействия, представленные акселерограммами сильных землетрясений, следует проводить по действительной упругопластической диаграмме деформирования, при применении которой величина сейсмической нагрузки по сравнению с линейной диаграммой снижается в несколько раз.

А. Х. Коридзе на основании проведенных исследований пришел к выводу, что упруго-пластическая работа предварительно напряженных железобетонных элементов возможна лишь в случае назначения достаточно малого процента армирования, при котором моменту разрушения предшествует зона пластических деформаций, протяженность которой зависит от пластических свойств стали и бетона. Особенностью поведения в пластической стадии преднапряженных элементов в отличие от обычных железобетонных является незначительная величина остаточных деформаций, обуславливаемая тем, что в процессе колебаний в данной области преднапряженного железобетона, испытывающего попеременное

действие растяжения и сжатия, трещины, возникающие при растяжении, могут закрываться при разгрузке в результате обжатия бетона. Им также установлено, что способность железобетонных элементов к развитию пластических деформаций преимущественно зависит от поперечного армирования.

Л. И. Авалишвили в результате проведенных экспериментальных исследований однопролетных одноярусных рамных конструкций и консольных образцов установлено, что как при статических, так и динамических испытаниях диаграмма деформаций имеет сложный характер. При знакопеременных нагрузках до 60% от расчетной разрушающей нагрузки железобетонные изгибаемые элементы ведут себя как системы с включающимися связями с диаграммой «жесткого» типа. При дальнейшем нагружении их жесткость деградирует и диаграмма характеризуется нелинейностью «мягкого» типа. При динамических испытаниях общий характер резонансных кривых соответствует нелинейным диаграммам деформирования «мягкого» типа, так как ось резонансных кривых при росте амплитуд отклоняется в сторону больших периодов.

В результате экспериментального исследования рамных конструкций с жестко защемленными стойками, имеющими различные проценты армирования на статическое и динамическое нагружения с доведением их до разрушения, Г. А. Чахава получены диаграммы «сила—перемещение», рекомендованные к применению при расчетах на сейсмические воздействия железобетонных каркасных зданий. При этом установлено, что для принятых опытных образцов, в которых изгибные напряжения превалируют над сжимающими, на очертания диаграммы деформирования больше всего влияют степень армирования и осевая нагрузка.

Приведенные результаты исследований вошли в «Руководство по проектированию жилых и общественных зданий с железобетонным каркасом, возводимых в сейсмических районах» и получили широкое внедрение в практику проектирования сооружений в сейсмических районах.

Следует еще раз отметить, что при упруго-пластическом расчете сооружений на сейсмические воздействия учет развития нелинейных деформаций приводит к существенному уменьшению приведенных ускорений и ско-

ростей, в то время как максимальные перемещения отличаются незначительно по сравнению с упругим решением, то есть не происходит их возрастания. Этот факт является очень важным, ибо, добиваясь существенного уменьшения сейсмических усилий в сооружении при учете пластических деформаций, исключаем возможность появления при пластических деформациях значительных перемещений и тем самым обеспечиваем сейсмостойкость сооружения.

4. ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА В СЕЙСМИЧЕСКИХ РАЙОНАХ

В сейсмических районах при проектировании и строительстве зданий и сооружений придерживаются определенных принципов, нашедших свое отражение в строительных нормах и правилах по сейсмостойкости.

Одним из основных принципов является правильный выбор площадки строительства с установлением ее сейсмичности на основании карт сейсмического микрозонирования. При этом следует иметь в виду, что неблагоприятные геологические факторы (глубинные тектонические нарушения в геологических напластованиях, сейсмические швы, сдвиги, надвиги) могут послужить причиной сильных движений. Кроме этого, необходимо учитывать и возможность больших неравномерных оседаний фундаментов зданий и сооружений до землетрясения. Надо также стараться достичь простой вертикальной планировки путем террасирования крупных склонов и обеспечения стока атмосферных осадков, дренажа заболоченных участков. При горизонтальной планировке необходимо предусматривать строительство ответственных зданий и сооружений на участках с лучшими грунтовыми условиями; следует избегать плотной застройки.

Другим не менее важным принципом сейсмостойкости является снижение величин сейсмических нагрузок путем применения рациональных конструктивных систем, а также облегчения веса зданий и сооружений.

Здания и сооружения в сейсмических районах могут быть решены в двух конструктивных схемах: жесткой и гибкой. При горизонтальной сейсмической нагрузке вертикальные несущие конструкции в случае жесткой конструктивной схемы, при малой деформации работают

в основном на сдвиг, а в случае гибкой конструктивной схемы — преимущественно на изгиб. В зданиях с жесткой конструктивной схемой, таких, как крупнопанельные, здания со стенами из монолитного железобетона, из объемных элементов, крупноблочные здания, возводимые индустриальным методом, снижения сейсмической нагрузки можно добиться в основном уменьшая вес зданий. В этом отношении весьма эффективным средством является применение в конструкциях указанных зданий легкого бетона и железобетона, что приводит, в зависимости от вида бетона, к снижению веса на 25—40%. В Армянской ССР в настоящее время более половины общего объема бетонных и железобетонных конструкций, применяемых в жилищном, общественном, промышленном, гидротехническом и транспортном строительстве, осуществляется из легких бетонов на природных пористых заполнителях.

Наиболее рациональными из зданий с жесткой конструктивной схемой являются крупнопанельные, здания из объемных элементов, а также монолитные здания. Подтверждением этому служит опыт изучения их поведения при сильных землетрясениях. Наиболее уязвимыми с точки зрения конструктивной схемы являются здания с несущими каменными стенами, которые в сейсмических районах все еще применяются в значительном объеме. Основными задачами в деле повышения их сейсмостойкости продолжают оставаться: создание монолитности кладки, обеспечение надежной связи стен и перекрытий между собою, осуществление армирования кладки, переход к комплексным конструкциям.

В зданиях с гибкой конструктивной схемой, какими являются в основном каркасные, каркасно-панельные и с пространственным ядром жесткости здания, существенного уменьшения веса можно достичь опять-таки путем применения в несущих конструкциях легких бетонов, а в ограждающих конструкциях — навесных панелей, выполненных с использованием алюминия, пластмасс и других эффективных легких и прочных материалов. Наиболее эффективными для строительства в сейсмических районах представляются сборно-монолитные здания с воспринимающими горизонтальные нагрузки монолитными ядрами жесткости, а также сборно-монолитные (с монолитным остовом) каркасные здания с жесткой арматурой. Снижение сейсмической нагрузки

также может быть достигнуто конструктивными мероприятиями, повышающими рассеяние энергии при колебаниях, путем учета пространственной работы зданий и сооружений, а также применения различных устройств, поглощающих колебания.

Следующим важным принципом сейсмостойкости является обеспечение равномерности сейсмических нагрузок путем соблюдения условий симметрии и равномерного распределения жесткостей конструкций и масс (от веса сооружения и полезных нагрузок).

С этой точки зрения наиболее удачной формой здания в плане является круг, в котором любая ось служит осью симметрии. Следующими удачными формами являются многоугольник или квадрат. Однако, если исходить из архитектурно-планировочных позиций, то указанные формы зданий в плане в большинстве случаев являются неудачными и поэтому не получили массового применения.

Практически наиболее приемлемой формой в плане является прямоугольник, который удовлетворяет и архитектурно-планировочным условиям. Даже в случае прямоугольного очертания зданий и сооружений в плане в первую очередь необходимо обеспечить равномерное распределение их масс и жесткостей. При проектировании фасадов следует стремиться к простым формам без выступающих частей, надстроек и т. д.

В случае сложных очертаний зданий и сооружений в плане их следует приводить к простым прямоугольным частям — отсекам путем осуществления антисейсмических швов, которые выполняются постановкой парных стен, рам или их сочетаний. Антисейсмические швы должны разделять смежные отсеки по всей высоте зданий или сооружений, кроме фундамента. При совпадении антисейсмического шва с осадочным следует прорезать и фундамент.

Антисейсмические швы устраиваются и в других случаях: 1) когда размеры здания превышают значения, установленные нормами, например, в крупнопанельных зданиях предельной длиной является 100 м; 2) при различном объемно-планировочном решении, когда конструкции одной части здания резко отличаются от другой; 3) при установке очень тяжелого оборудования в одной из частей здания; 4) когда имеется перепад высот смежных частей здания в два этажа и более.

Минимальная ширина антисейсмического шва определяется по расчету (под действием расчетной сейсмической нагрузки) или устанавливается в зависимости от высоты здания (при 5 м—3 см, а при большей высоте — добавляя по 2 см на каждые последующие 5 м).

Очень важным принципом сейсмостойкости является обеспечение монолитности и однородности конструкций с максимально возможным укрупнением сборных элементов и расположением их стыков вне зон максимальных усилий.

При проектировании железобетонных каркасных зданий в сейсмических районах узлы каркасов, а также непосредственно примыкающие к ним зоны ригелей и колонн следует усилить путем постановки арматурных сеток или замкнутой поперечной арматуры из стержней диаметром не менее 8 мм и с шагом не более 100 мм; диафрагмы жесткости, связи и ядра жесткости необходимо осуществлять непрерывными по всей высоте здания, с их расположением в плане равномерно и симметрично относительно центра тяжести здания.

Совместная работа несущих вертикальных элементов обеспечивается повышенной жесткостью и монолитностью междуэтажных перекрытий. В случае сборных железобетонных перекрытий и покрытий замоноличивание достигается путем устройства либо железобетонных антисейсмических поясов, воспринимающих растягивающие усилия, с заанкериванием в них панелей и заливкой швов между панелями цементным раствором, либо монолитных обвязок, воспринимающих растягивающие усилия, с заанкериванием в них панелей и применением связей между панелями, воспринимающими сдвигающие усилия, либо с применением между панелями, а также панелями и элементами каркаса или стенами связей, воспринимающих усилия растяжения или сдвига, возникающие в швах.

Заполнение каркасов, перегородки и другие ненесущие элементы следует выполнять легкими и надежно связывать их с вертикальными несущими элементами, а при длине более 3 м также с перекрытиями.

В крупнопанельных зданиях для обеспечения пространственной работы всех стен и перекрытий при сейсмических воздействиях необходимо панели проектировать крупными, предусматривать их соединения на сварке и замоноличивать мелкозернистым бетоном с ма-

лой усадкой, создавать одинаковую жесткость стен, воспринимающих сейсмические нагрузки, армировать стеновые панели двойной арматурой в виде пространственных каркасов или сварных арматурных сеток, а также ограничивать максимальное расстояние между поперечными стенами 6,6 м.

В зданиях с несущими стенами, проектируемых в сейсмических районах, в первую очередь должны применяться кирпичные или каменные панели или блоки, изготовленные в заводских условиях с помощью вибрации; при применении кладки из кирпича или камня следует пользоваться растворами со специальными добавками, повышающими прочность их сцепления с кирпичом или камнем. В уровнях перекрытий по всем продольным и поперечным стенам должны укладываться антисейсмические пояса, связываемые с ними вертикальными выпусками арматуры. В сопряжениях стен необходимо ставить арматурные сетки с площадью сечения не менее 1 см^2 , длиной 1,5—2 м через 70 см по высоте при сейсмичности 7—8 баллов и через 50 см при 9 баллах. Сейсмостойкость каменных стен зданий следует повышать устройством по стенам армированных сетками растворных слоев, включением в кладку монолитных железобетонных элементов (сердечников), созданием комплексных конструкций, преднапряжением и другими возможными методами. При этом вертикальные железобетонные элементы должны надежно соединяться с кладкой и антисейсмическими поясами или обвязками.

Важным принципом сейсмостойкости является создание условий, облегчающих возможность развития в узлах и элементах конструкций пластических деформаций, с обеспечением при этом общей устойчивости сооружения.

При проектировании металлических рамных каркасов для сейсмических районов основным положением является обеспечение развития пластических деформаций в наиболее напряженных его сечениях, если потеря устойчивости в них не представляет опасности для несущей способности сооружения.

Исходя из этого, в металлических рамных каркасах, которые являются тонкостенными конструкциями, пластические зоны целесообразно предусматривать в ригелях рам, не подверженных осевому сжатию, так как различные деформации, связанные с потерей местной

устойчивости в ригелях, менее опасны для сооружения, чем потеря местной устойчивости в стойках, находящихся под постоянным сжатием от действия осевой нагрузки, которая может привести к обрушению всего сооружения.

Другим важным моментом является ограничение расходования пластических резервов в элементах конструкций металлических рамных каркасов при каждом отдельном цикле колебаний сравнительно небольшими порциями с тем, чтобы в процессе землетрясения энергия, поглощенная при развитии пластических деформаций в том или ином элементе, не превышала его общей энергоемкости. Не менее важным мероприятием при действии сейсмических сил является вопрос устранения опасности хрупких разрушений в местах сварных соединений ригелей со стойками, где возникают максимальные изгибающие моменты, вызывающие значительные напряжения в опорных сечениях ригелей, путем их развития до таких размеров, чтобы максимальные напряжения в области сварных соединений не превышали расчетных сопротивлений. При этом в ригеле в месте перехода от основного сечения к его развитому опорному сечению целесообразно создавать условие для возникновения пластического шарнира с тем, чтобы прекратить рост усилий в опорной части ригеля. Наконец, очень важным мероприятием является создание условий для использования запасов пластической энергоемкости металлической конструкции путем предотвращения хрупкого разрушения наиболее напряженных сварных соединений до того, когда в других ее частях, способных к пластическому деформированию, напряжения достигнут текучести, что может иметь место при сейсмических воздействиях. Поэтому для того, чтобы в рамном каркасе могли развиваться пластические деформации, необходимо опасные сечения конструкции вывести из зоны максимальных напряжений, что может быть достигнуто различными способами: путем развития сечений элементов в местах их примыкания к узлам; постановкой дополнительных элементов типа подкосов, изменяющих характер распределения эпюры изгибающих моментов; включением специальных элементов как вертикальные диагональные связи, предназначенных для восприятия сейсмической нагрузки и работающих в пластической стадии.

При проектировании железобетонных каркасных зданий предпочтение следует отдавать конструктивным схемам, в которых зоны пластичности в первую очередь возникают в горизонтальных элементах каркаса, например, ригелях и обвязочных балках. При этом следует обеспечивать возможность развития пластических деформаций в элементах конструкций, уделяя при этом особое внимание усилению зон действия максимальных скалывающих усилий поперечной арматурой, предусматривать установку сеток в узлах рам, при выборе метода электросварки применять те из них, которые обеспечивают наибольшие пластические свойства сварных швов. При проектировании сборных и сборно-монолитных конструкций особое внимание следует уделять сопряжению элементов, избегать соединений, неспособных к развитию упругопластических деформаций.

Наконец, обязательным принципом сейсмостойкости является обеспечение высокого качества строительства.

Качество строительства в сейсмических районах определяется качеством выпускаемой строительной продукции, качеством строительно-монтажных работ и качественным выполнением антисейсмических мероприятий. Никакие расчеты на сейсмические воздействия, будь они проведены на очень высоком научном уровне, никакие самые совершенные антисейсмические мероприятия, предусмотренные с учетом современных достижений строительной техники, не могут обеспечить сейсмостойкость зданий и сооружений, если их строительство выполнено некачественно. Более того, при некачественном осуществлении антисейсмических мероприятий могут сыграть, наоборот, отрицательную роль, а именно — снизить сейсмостойкость зданий и сооружений. В качестве примера можно привести железобетонные сердечники в стенах комплексной конструкции зданий с несущими каменными стенами, которые, при необеспечении их связи с кладкой и антисейсмическими поясами, во-первых, могут ослабить саму кладку, а во-вторых, при сейсмических воздействиях сыграть роль тарана.

Не останавливаясь на подробностях, связанных с обеспечением качества строительства в сейсмических районах, еще раз отметим, что для этого следует соблюдать технологию заводского производства строительных конструкций и деталей, придерживаться правил производства строительных работ и обеспечить правильное осуществление антисейсмических мероприятий.

Глава 7

НЕКОТОРЫЕ ТИПЫ СЕЙСМОСТОЙКИХ ЗДАНИЙ, ВОЗВОДИМЫХ В АРМЯНСКОЙ ССР

Строительство в республике до 60-ых годов в основном осуществлялось из зданий с несущими каменными стенами системы «мидис». В лучшем случае это были здания с включениями железобетонных элементов, связываемых с кладкой и антисейсмическими поясами. Прогрессивным являлся переход к кладкам из камней правильной формы. Возводились также здания из крупных блоков, а также крупнопанельные здания. Основная масса этих зданий имела высоту до 5 этажей.

За последние 15—20 лет в городах республики началось строительство зданий повышенной этажности, возводимых индустриальными методами. Если раньше строительство осуществлялось в основном по индивидуальным проектам повторного применения, то в настоящее время удельный вес применяемых типовых проектов сильно возрос (до 90%), что помимо других положительных факторов приводит к повышению сейсмостойкости зданий. При этом следует отметить, что применение типовых проектов сильно возросло и в сельском строительстве.

С точки зрения обеспечения сохранности зданий и сооружений при сильных и разрушительных землетрясениях наибольшее беспокойство в первую очередь должны вызывать жилые здания, разрушение которых может привести к человеческим жертвам, поэтому необходимо предусмотреть все меры для обеспечения их сейсмостойкости.

В настоящее время в республике объем жилищного строительства по конструктивным типам зданий примерно распределяется следующим образом: крупнопанельные здания — 50%, каркасно-панельные здания — 30%, здания с несущими каменными стенами — 20%.

Нами приводятся описания некоторых типов жилых зданий, возводимых в Армянской ССР, с указанием конструктивных особенностей, а также осуществляемых мероприятий с целью обеспечения их сейсмостойкости.

1. ЗДАНИЯ С НЕСУЩИМИ КАМЕННЫМИ СТЕНАМИ

В городах, поселках городского типа и в сельских местностях и сейчас строятся дома с несущими каменными стенами из кладки «мидис», камней правильной формы и комплексной конструкции. Имеется ряд типовых проектов, по которым возводятся указанные здания.

Приводим описание типового проекта 1А—450 пятиэтажного каменного здания, получившего широкое распространение в строительстве республики. Здание имеет конструктивную схему с поперечными и продольными несущими стенами каменной конструкции. Наружные стены толщиной 45 см из туфовых камней правильной формы, облицованные чистотесаными штучными камнями и усиленные железобетоном; внутренние стены толщиной 40 см из туфовых камней правильной формы, усиленные железобетоном. Фундаменты ленточные из бутовой кладки. Перекрытиями являются сборные железобетонные преднапряженные круглопустотные панели

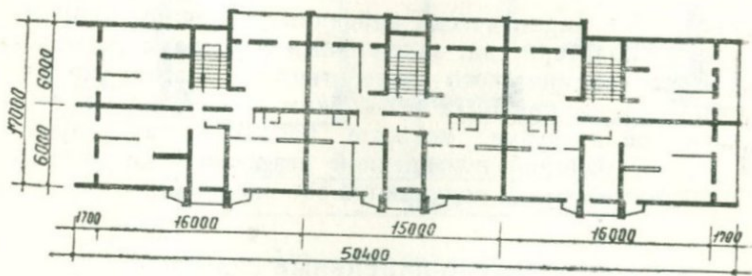


Рис. 32. План типового этажа каменного здания серии 1А—450.

толщиной 22 см. Перегородки — шлакобетонные плиты, толщиной 6 см или перлитобетонные, секционные. Покрытием служат сборные преднапряженные плиты.

План типового этажа и разрез здания приведены на рисунках 32 и 33.

Рассматриваемое здание предназначено для строи-

тельства на участках с сейсмичностью 7 и 8 баллов. В нем предусмотрены антисейсмические пояса, железобетонные колонны (сердечники) и арматурные сетки для усиления кладки, которые путем взаимной связи обеспечивают пространственную работу здания в целом.

В республике осуществлены экспериментальные исследования

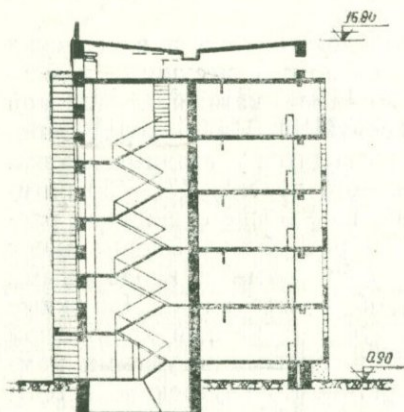


Рис. 33. Разрез каменного здания серии 1А—450.

большого количества зданий с несущими каменными стенами. Результаты этих исследований показали, что, в отличие от зданий повышенной этажности (в основном каркасных), их динамические характеристики, установленные экспериментальным путем, мало отличаются от таковых, полученных аналитически. Сле-

довательно, аналитически найденные величины динамических характеристик, заложенные в расчеты по определению сейсмического воздействия на здания указанного типа, не приводят к ошибкам в определении сейсмической нагрузки, которые наблюдаются в случае каркасных зданий повышенной этажности, когда сейсмические нагрузки получаются заниженными.

2. КАРКАСНО-ПАНЕЛЬНЫЕ ЗДАНИЯ

В республике получили широкое распространение каркасно-панельные здания серии III, которые строятся на участках сейсмичностью в 7—8 баллов.

Конструктивно они решены в виде блок-секций размерами в плане $18,0 \times 10,8$ м или блок-домов размерами в плане $18,0 \times 18,0$ м. Высота зданий 29 м. В зданиях несущей конструкцией является сборный железобетонный рамносвязевой каркас. Пространственная работа зданий

обеспечивается в одном направлении рамной конструкцией каркаса, а в другом — вертикальными железобетонными диафрагмами жесткости. Колонны сборные, высотой в три этажа, сечением 40×40 см, на уровнях перекрытий имеют консоли (17 см) для опоры ригелей сечением 40×30 см с обнаженной арматурой в верхней зоне, замоноличиваемой в последующем. Связь колонн

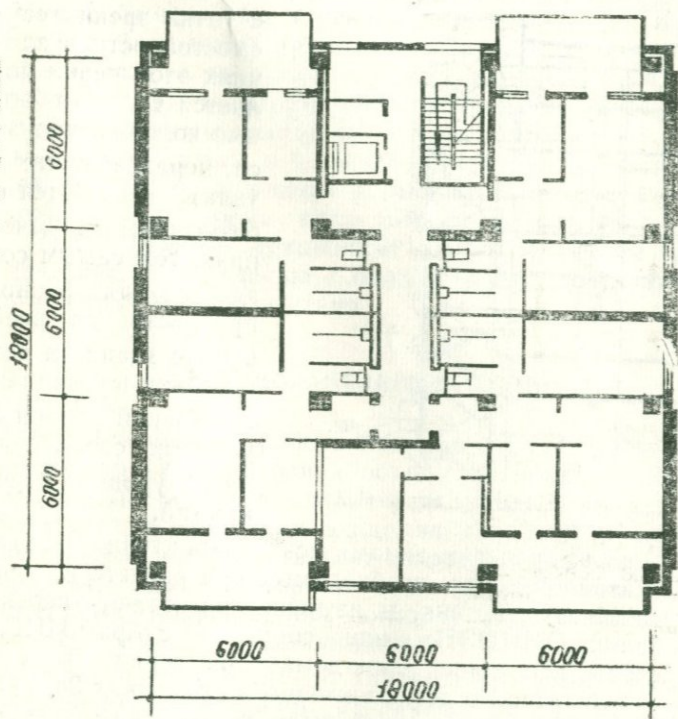


Рис. 34. План блок-дома серии «111».

в одном направлении осуществляется посредством ригелей, а в другом — плитами-вставками. Диафрагмы жесткости имеют толщину 14 см и установлены в одном из пролетов. При этом в блок-секциях они до пятого этажа глухие, а выше — с проемами; в блок-домах — с проемами на всех этажах.

Марка бетона элементов каркаса «300». Соединения осуществляются с помощью арматурных выпусков, ко-

которые после сварки замоноличиваются бетоном марки «400» на расширяющемся цементе.

Фундаменты устроены в виде монолитных железобетонных перекрестных лент. Перекрытиями являются сборные железобетонные преднапряженные панели толщиной 22 см. Навесные стеновые панели из сборного шлакоперлитобетона, толщиной 23 см.

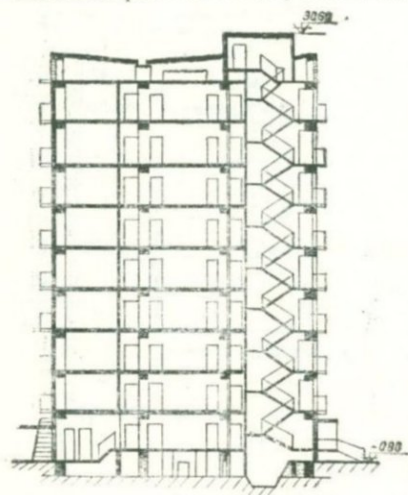


Рис. 35. Разрез блок-дома серии «111».

Положительным с точки зрения сейсмостойкости в зданиях этой серии является то, что сборные колонны каркаса, неразрезанные в узлах, стыкуются в безмоментных сечениях, тем самым создается их равнопрочность по всей высоте здания и нет опасений в части повреждений колонн в узловых соединениях на уровне перекрытий.

С целью проверки динамических характеристик зданий указанной серии, необходимых при расчете на сейсмические воздействия, и изучения рассеяния энергии колебаний, ЦНИИЭПжилища совместно с АрмНИИСА проведены испытания блок-дома этой серии. План и разрез испытанного дома показаны на рисунках 34 и 35.

В результате испытаний были установлены некоторые недостатки, которые послужили для внесения соответствующих корректировок в типовые проекты зданий этой серии, обеспечивающих повышение качества строительно-монтажных работ:

- 1) в соединениях диафрагм-жесткостей с колоннами вместо арматурных выпусков из колонн и диафрагм с последующим замоноличиванием предусмотрены закладные детали;

- 2) ограждающие конструкции укрупнены и облегчены, их связь с каркасом предусмотрена таким образом,

чтобы создавать возможность избежать многодельности при монтажных работах;

3) объем монолитного бетона уменьшен;

4) разработаны секционные перлитобетонные перегородки с объемным весом 600 кг/м^3 , надежно соединяемые между собою элементами каркаса и перекрытием.

Следует отметить, что в испытанном блок-доме сейсмическая нагрузка, приходящаяся на одну диафрагму, намного больше, чем в секционных блок-домах. Кроме этого, в блок-домах три пролета по 6 м (в обоих направлениях), в то время как в секционных домах два пролета по 5,4 м (в поперечном направлении). Помимо этого диаграммы жесткости в блок-домах имеют проемы на всех этажах, а в секционных домах до пяти этажей диаграммы сплошные и, только начиная с шестого этажа, имеют проемы, предусмотренные для эвакуации.

Таким образом, секционные дома являются более удачными по сравнению с блок-домами с точки зрения их конструктивного решения.

3. КРУПНОПАНЕЛЬНЫЕ ЗДАНИЯ

В сейсмических районах страны, в том числе и в Армянской ССР, половина объема жилищного строительства падает на крупнопанельное домостроение, которое дает значительную экономию трудозатрат, снижение стоимости и существенное сокращение сроков строительства; с другой стороны, опыт обследования разрушительных землетрясений показал, что крупнопанельные здания вполне сейсмостойки.

У нас в республике по типовым проектам строятся крупнопанельные здания различных серий. Это пяти- и девятиэтажные дома серии 1А—451КП, разработанные Ереванским домостроительным комбинатом, и девятиэтажный дом серии 129, разработанный проектным институтом «Армгоспроект». Эти дома существенно отличаются от крупнопанельных домов, осуществляемых в других сейсмических районах СССР.

В настоящее время возводятся точечные дома серии 1А—451 КП с размерами в плане $18,0 \times 18,0 \text{ м}$. Их стены осуществляются из легкобетонных панелей, окаймленных по контуру замкнутыми монолитными железобетонными рамами. Наружные панели однослойные шлако-

бетонные, толщиной 30 см, а внутренние — пемзобетонные пустотные, толщиной 25 см. Перекрытия из крупнопанельных пемзобетонных настилов толщиной 22 см. Перегородки пемзобетонные или гажецементобетонные прокатные, толщиной 8 см. Фундаменты ленточные из монолитного железобетона.

План и разрез односекционного дома серии 1А—451КП—1П показаны на рисунках 36 и 37.

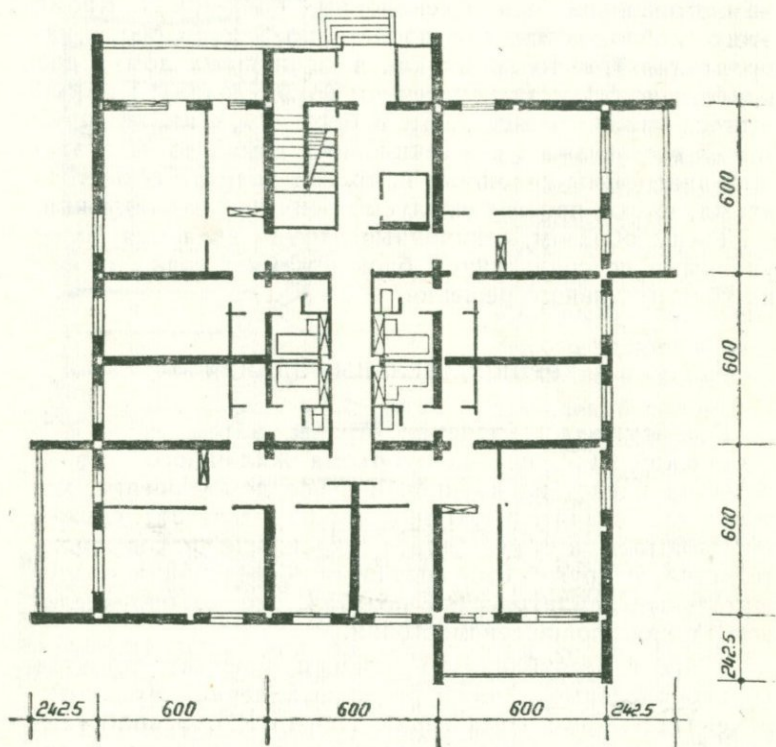


Рис. 36. План односекционного дома серии 1А—451КП—1П.

При сейсмических воздействиях сдвигающие усилия воспринимаются железобетонными шпонками (3—5 см), сосредоточенными в узлах примыкания панелей в горизонтальных и вертикальных стыках в виде ромба или треугольника сечением 75×25 см. Поэтому особенно следует следить за качественным бетонированием моно-

литных элементов контурных рам и узловых шпонок.

Здания серии 129 разработаны с комплексным применением легкого и облегченного бетонов. Дом, представитель этой серии, четырехсекционный с несущими поперечными стенами, имеет размеры в плане $62,75 \times 11,75$ м. Наружные стены однослойные из поризованного шлакобетона, толщиной 30 см. Внутренние стены из пемзожелезобетона толщиной 25 см, пустотные. Пе-

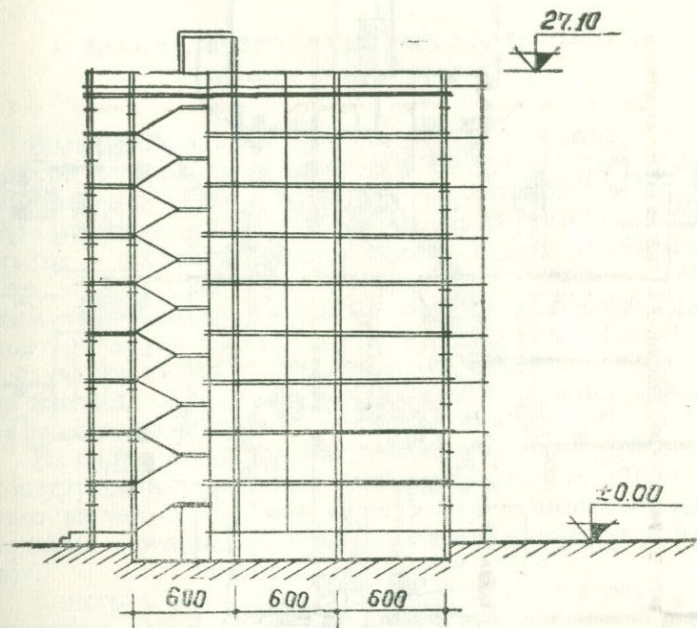


Рис. 37. Разрез односекционного дома серии 1А—451 КП—ІП.

реккрытие из круглопустотных предварительно-напряженных пемзожелезобетонных панелей, шириной 240 см и толщиной 22 см. Перегородки шлакоперлитобетонные, крупнопанельные, покомнатные.

Соединяются панели между собой путем замоноличивания горизонтальных и вертикальных стыков, в которые уложены арматурные каркасы.

Отличительной особенностью домов этой серии являются антисейсмические пояса обвязки, которые, кроме омоноличивания перекрытий в жесткий диск, будучи соединенными с арматурой вертикальных стыков, обра-

результате образуются треугольные и ромбовидные шпонки, которые вместе с железобетонными стыками воспринимают сдвигающие усилия.

Описанные конструктивные решения крупнопанельных зданий не проверены при сильных землетрясениях. На сегодня также нет испытаний этих конструкций в натуре и лабораторных условиях.

4. ЗДАНИЯ, ВОЗВОДИМЫЕ МЕТОДОМ ПОДЪЕМА ЭТАЖЕЙ И ПЕРЕКРЫТИЙ

Возведение зданий методом подъема этажей и перекрытий в республике началось с 60-х годов и получило широкое внедрение в строительстве. Сущность этого метода заключается в изготовлении на строительной площадке в габаритах самого здания пакета перекрытий всех этажей и кровли и их подъеме по сборным несущим колоннам на проектные отметки, с последующим монтированием элементов этажа сверху вниз. При этом в случае подъема этажей элементы этажа монтируются на плите до ее подъема, а в случае подъема перекрытий на проектных отметках.

Из большого количества зданий, имеющих различные конструктивные решения, приведем описание 16-этажного жилого дома типа «крест», возводимого методом подъема перекрытий на участках с сейсмичностью 7 баллов.

Конструктивная схема здания решена с пространственным ядром жесткости, воспринимающим всю горизонтальную сейсмическую нагрузку. План здания приведен на рисунке 38.

Несущими конструкциями здания являются железобетонное ядро жесткости (шахта) толщиной стен 35—65 см и 24 железобетонные колонны из бетона марок 500, 400 и 300 с сечениями 45×45 см в нижних ярусах и 40×40 см в верхних. Междуетажные перекрытия — безбалочные из монолитного бетона, толщиной 18 см опираются на ядро жесткости. Их соединение с колоннами считается шарнирным.

Наружные стеновые панели навесные, из легкого бетона марки 75, облицованные плитками. Перегородки осуществлены из гипсопрокатных панелей.

Фундаменты монолитные железобетонные из бетона

марки 200. Под ядром жесткости — сплошная плита, а под колоннами — отдельно стоящие фундаменты, соединенные по верху связевыми железобетонными балками.

Конструктивная схема с пространственным железобетонным ядром жесткости в сочетании с железобетонным каркасом является вполне приемлемой с точки зрения обеспечения сейсмостойкости здания, поскольку она обеспечивает передачу горизонтальной сейсмической нагрузки на более жесткое ядро и тем самым разгружает гибкие колонны.

По зданиям, возводимым методом подъема этажей и перекрытий, проведен большой круг экспериментов по определению их динамических характеристик, необходимых при расчетах на сейсмические воздействия. В этих зданиях имеется возможность устройства между ядром и панелями перекрытий демпферных устройств с целью уменьшения сейсмического воздействия на здания.

ЛИТЕРАТУРА

- Айзенберг Я. М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов. М., Стройиздат, 1976.
- Алиев Г. А. Проектирование и расчет оснований зданий и сооружений, изд. «Азернешр», Баку, 1974.
- Ашрабов А. Б., Рассказовский В. Т., Мартемьянов А. И. Проектирование, возведение и восстановление зданий в сейсмических районах. Ташкент, изд. «Узбекистан», 1968.
- Балакина Л. М., Введенская А. В., Голубева Н. В. и др. Поле напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. М., «Наука», 1972.
- Бюс Е. И. Сейсмические условия Закавказья, ч. I, II, III. Тбилиси, изд. АН Груз. ССР, 1948, 1952, 1955.
- Введенская А. В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М., «Наука», 1969.
- Гангнус А. Тайна земных катастроф. М., «Мысль», 1977.
- Завриев К. С., Назаров А. Г., Айзенберг Я. М. и др. Основы теории сейсмостойкости зданий и сооружений. М., Стройиздат, 1970.
- Исследование механизма землетрясений. М., изд. АН СССР, 1957.
- Исследования по физике землетрясений. М., «Наука», 1976.
- Карпетян Б. К. Многомаятниковые сейсмометры и результаты их применения в инженерной сейсмологии. Ереван, изд. «Айпетрат», 1963.
- Карпетян Б. К. Колебание сооружений, возведенных в Армении. Ереван, изд. «Айастан», 1967.
- Карпетян Б. К., Карпетян Н. К. Сейсмические воздействия на здания и сооружения. М., «Наука», 1978.
- Карпетян Н. К. Спектры сейсмических колебаний на территории Армении. Ереван, изд. АН Армянской ССР, 1973.
- Карпетян Н. К. Годографы сейсмических волн для землетрясений Армянского нагорья. Ереван, изд. АН Армянской ССР, 1974.
- Корчинский И. Л., Бородин Л. А., Гроссман А. Б. и др. Сейсмостой-

- кое строительство зданий. М., «Высшая школа», 1971.
- Корчинский И. Л., Поляков С. В., Быховский В. А. и др. Основы проектирования зданий в сейсмических районах. М., Госстройиздат, 1961.
- Мартемьянов А. И. Особенности проектирования и строительства сельских зданий в сейсмических районах. М., Стройиздат, 1975.
- Материалы по изучению сейсмичности и глубинного строения Азербайджана. Баку, «ЭЛМ», 1974.
- Медведев С. В. Инженерная сейсмология. М., Госстройиздат, 1962.
- Медведев С. В., Шебалин Н. В. С землетрясением можно спорить. М., «Наука», 1967.
- Медведев С. В., Карапетян Б. К., Быховский В. А. Сейсмические воздействия на здания и сооружения. М., Стройиздат, 1968.
- Методические рекомендации по сейсмическому районированию территории СССР. М., изд. АН СССР, 1974.
- Назаров А. Г. Метод инженерного анализа сейсмических сил. Ереван, изд. АН Арм. ССР, 1959.
- Назаров А. Г. О механическом подобии твердых деформируемых тел. Ереван, изд. АН Арм. ССР, 1965.
- Назаров А. Г. К проблеме прогноза землетрясений. Доклады АН Армянской ССР, том LIII, 1, 1971.
- Назаров А. Г., Дарбинян С. С. Основы количественного определения интенсивности сильных землетрясений. Ереван, изд. АН Арм. ССР, 1974.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М., «Наука», 1977.
- Пирюзян С. А. Опыт детального сейсмического районирования территории большого Ереванского района. Ереван, «Айастан», 1969.
- Поиски предвестников землетрясений на прогностических полигонах. М., «Наука», 1974.
- Покровский Г. И., Федоров И. С., Алиев Г. А. Теория и практика центробежного моделирования в горном деле, М., «Недра», 1979.
- Поляков С. В. Сейсмостойкие конструкции зданий. М., «Высшая школа», 1969.
- Поляков С. В., Бобров Ф. В., Быченков Ю. Д. и др. Проектирование сейсмостойких зданий. М., Стройиздат, 1971.
- Поляков С. В. Последствия сильных землетрясений. М., Стройиздат, 1978.
- Предсказание землетрясений. М., «Мир», 1968.
- Проблемы прогноза землетрясений. М., изд. АН СССР, 1954.
- Результаты комплексного изучения Зангезурского землетрясения. Ереван, изд. АН Армянской ССР, 1973.

- Рикитакe Т. Прогноз землетрясений, М., «Мир», 1979.
- Робертс Э. Когда сотрясается земля. М., «Мир», 1966.
- Ротэ Э. Землетрясения. М.—Л., Госуд. техн.-теор. изд., 1934.
- Руссо Пьер. Землетрясения. М., «Прогресс», 1966.
- Саваренский Е. Ф., Кирнос Д. П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. М., Госуд. изд. техн.-теор. лит., 1955.
- Садовский М. А., Нерсесов И. Л. Вопросы прогноза землетрясений. Известия АН СССР. Физика Земли. 9, 1978.
- Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. М., «Наука», 1975.
- Степанян В. А. Землетрясение в Армянском нагорье и прилегающих окрестностях (на армянском языке), «Айастан», Ереван, 1964.
- Строительные нормы и правила, часть II, раздел А, глава 12. Строительство в сейсмических районах. Нормы проектирования, М., 1970.
- Слабые землетрясения. М., изд. «Иностранная литература», 1961.
- Сейсмическое районирование СССР. М., «Наука», 1968.
- Тазиев Г. Когда земля дрожит. М., «Мир», 1968.
- Физика очага землетрясения. М., «Наука», 1975.
- Физические основания поисков методов прогноза землетрясений. М., «Наука», 1970.
- Хачиян Э. Е. Сейсмические воздействия на высотные здания и сооружения. Ереван, «Айастан», 1973.
- Ходжсон Дж. Землетрясения и строение Земли. М., «Мир», 1966.
- Шахназарян С. Х., Саакян Р. О., Саакян А. О. Возведение зданий методом подъема этажей и перекрытий. М., Стройиздат, 1974.
- Шахсугварян Л. В., Карапетян Б. К. Землетрясения и сейсмостойкое строительство (на армянском языке), Ереван, изд. АН Армянской ССР, 1955.
- Шебалин Н. В. Очаги сильных землетрясений на территории СССР. М., «Наука», 1974.
- Экспериментальная сейсмология. М., «Наука», 1971.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
<i>Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ И ИХ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ</i>	6
1. Виды землетрясений и их географическое распре- деление	6
2. Параметры, характеризующие землетрясения	9
3. Определение времени возникновения и координат эпицентров землетрясений	10
4. Интенсивность землетрясений	14
5. Энергия землетрясений	22
6. Магнитуда землетрясений	25
7. Энергетический класс землетрясений	27
8. Соотношения между магнитудой, энергией и интен- сивностью (в баллах) землетрясений	29
9. Сейсмический момент	31
<i>Глава 2. ПОСЛЕДСТВИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ АРМЕНИИ И ПРИЛЕГАЮЩИХ ОБЛАСТЕЙ</i>	34
<i>Глава 3. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В ОЧАГАХ ЗЕМ- ЛЕТРЯСЕНИЙ И МЕХАНИЗМ ИХ ВОЗНИКНОВЕ- НИЯ</i>	43
1. Направления исследований по изучению механизма землетрясений	43
2. Напряженное состояние в очагах землетрясений Ар- мении и механизм их возникновения	49
3. Механизм очага Ереванского землетрясения 16 июня 1973 года	55
<i>Глава 4. СЕЙСМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ АРМЯНСКОЙ ССР И ПРИЛЕГАЮЩИХ К НЕЙ ОБЛАСТЕЙ. СЕЙСМИЧЕ- СКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ</i>	60
1. Сейсмический режим Армении и прилегающих об- ластей	60

2. Максимальные возможные землетрясения по сейсмолого-геолого-геофизическим данным	65
3. Сейсмическое районирование территории Армянской ССР	72
4. Сейсмическое микрорайонирование	79
Глава 5. ПОИСКИ ПРЕДВЕСТНИКОВ И ПРЕДСКАЗАНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ	86
1. Изменения скоростей распространения продольных и поперечных сейсмических волн	88
2. Временные флуктуации геофизических полей	91
3. Современные деформации и наклоны земной коры	96
4. Аномалии в геохимических и гидрогеологических процессах	99
5. Биологические предвестники землетрясений	106
6. Некоторые другие предвестники землетрясений	111
7. Пути предсказания землетрясений	116
Глава 6. ОСНОВЫ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ В СЕЙСМИЧЕСКИХ РАЙОНАХ	126
1. История развития методов расчета на сейсмические воздействия	127
2. Определение сейсмических воздействий по СНиП	133
3. Учет нелинейных деформаций при расчете сооружений на сейсмические воздействия	138
4. Принципы проектирования и строительства в сейсмических районах	149
Глава 7. НЕКОТОРЫЕ ТИПЫ СЕЙСМОСТОЙКИХ ЗДАНИЙ, ВОЗВОДИМЫХ В АРМЯНСКОЙ ССР	156
1. Здания с несущими каменными стенами	157
2. Каркасно-панельные здания	158
3. Крупнопанельные здания	161
4. Здания, возводимые методом подъема этажей и перекрытий	165
Литература	167

Карапетян Борис Карпетович,
Карапетян Надежда Карпетовна

**ПРЕДПОСЫЛКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И СЕЙСМОСТОЙКОЕ
СТРОИТЕЛЬСТВО В АРМЯНСКОЙ ССР**

Изд. редактор **Н. И. Колесникова**
Художник **С. Г. Сафян**
Худ. редактор **М. М. Багдасарян**
Техн. редактор **К. Г. Саркисян**
Контрольный корректор **Р. Т. Мальцева**

ИБ 735

Сдано в набор 26.12.1980 г. Подписано к печати 18.08.1981 г.
Формат 84×108^{1/32}. Бумага № 1. Гарнитура «Литературная».
Печать высокая. 9,03 усл. печ. л. Уч.-изд. 8,96 л.
ВФ 07436. Заказ 2211. Тираж 1000. Цена 1 руб. 30 коп.
Издательство «Айастан», Ереван-9, ул. Теряна, 91.

Полиграфкомбинат им. Акопа Мегапарты Госкомитета Арм. ССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Ереван-9,
ул. Теряна, 91.

9087

1 р. 30 коп.

„АЙАСТАН”