

Добровольский И.П.

**Математическая
теория подготовки
и прогноза
тектонического
землетрясения**



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ ®

УДК 550.340

ББК 26.2

Д 56



*Издание осуществлено при поддержке
Российского фонда фундаментальных
исследований по проекту 09-05-07105*

Добровольский И. П. **Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 240 с. — ISBN 978-5-9221-1180-5.

Исследуется подготовка одиночного тектонического землетрясения — элемента сейсмического процесса. Анализируются общие черты явления, детализация проводится неглубоко, но не исключается возможность произвольно глубокой физической детализации. Ведущими признаются механические процессы, которые инициируют проявление актов иной физической природы. Сформулированы постулаты и основные принципы построения теории. Теория содержит в основных чертах все существующие модели подготовки. Произведен расчет ряда предвестников различной физической природы, который привел к удовлетворительному согласию расчетных и опытных данных. Показано также, что большое число опубликованных эмпирических данных, трактуемых как предвестники, на самом деле предвестниками не являются. Прогноз сейсмического события определен как обратная задача теории подготовки, и в рамках этого подхода получены ретроспективные решения конкретных задач прогноза места и энергии тектонического землетрясения по данным сейсмического просвечивания, вертикальным движениям и ускорению свободного падения. Получилось почти полное согласие с параметрами произошедших землетрясений. Приводятся метод и оригинальные решения задач теории упругости о локальной неоднородности и включении в пространстве и полупространстве.

Для геофизиков, механиков и математиков, интересующихся постановкой и решением прикладных задач геофизики.

ISBN 978-5-9221-1180-5

© ФИЗМАТЛИТ, 2009

© И. П. Добровольский, 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
Введение	8
Глава 1. Физические основы	15
1.1. Определяющие свойства земной коры	15
1.2. Цикл тектонического землетрясения	18
1.3. Замечания об основных терминах	23
Глава 2. Механико-математические основы теории подготовки	29
2.1. Постулаты феноменологической теории подготовки	29
2.2. Модель среды и постановка задачи о неоднородности	32
2.3. Форма и размеры неоднородности	39
2.4. Тектонические напряжения, свойства среды и неоднородности	41
2.5. Время подготовки землетрясения	42
2.6. Энергия подготовки и высвобождаемая энергия	46
2.7. Сейсмический КПД	52
2.8. Ход подготовки	53
2.9. Заключительные замечания	55
Глава 3. Прямые задачи — расчет предвестников	57
3.1. Шаровая неоднородность в полупространстве. Подобие процессов подготовки	57
3.2. Замечания о граничных условиях и свойствах неоднородности	63
3.3. Деформирование земной поверхности. Зона проявления предвестников	64
3.4. Вертикальные перемещения земной поверхности	68
3.5. Распределение наклонов по глубине	71
3.6. Гравитационные предвестники	73
3.7. Электрические предвестники электрокинетической природы	82
3.8. Магнитные предвестники электрокинетической природы	99
3.9. Магнитные предвестники пьезомагнитной природы	104
3.10. Гидродинамические предвестники	111
3.11. Эволюция зоны проявления предвестников	123
3.12. Заключительные замечания	126
Глава 4. Модели подготовки тектонического землетрясения	127
4.1. Модели подготовки по механизму консолидации	127
4.2. Модели подготовки по механизму деструкции	137
4.3. Обсуждение	141

Глава 5. Обратные задачи — задачи прогноза	143
5.1. Прогноз по данным сейсмического просвечивания	143
5.2. Прогноз по вертикальным перемещениям земной поверхности	158
5.3. Прогноз по гравитационному предвестнику	162
5.4. Заключительные замечания	167
Глава 6. Обзор проблемы: предвестники и прогноз тектонического землетрясения	168
6.1. Состояние проблемы предвестников	168
6.2. Состояние проблемы прогноза	172
6.3. Характеристика района работ	176
6.4. Задачи службы прогноза	178
Глава 7. Задачи о неоднородности и включении	180
7.1. Постановка задачи о неоднородности. Общие методы решения	180
7.2. Некоторые свойства объемных потенциалов и квазипотенциалов	188
7.3. Вычисление потенциалов	192
7.4. Неоднородность в пространстве	199
7.5. Неоднородность в полупространстве	202
7.6. Замечания о двумерной (плоской) неоднородности	206
7.7. Задача о включении	208
Заключение	217
Приложение	224
П. 1. Вычисление γ для сферической поры и щели	224
П. 2. Вычисление интегралов из п. 3.8	226
Список литературы	230

Уровень понимания всегда связан с уровнем описания — ни слишком общее, ни слишком подробное описание не позволяет проникнуть в суть предмета.

Д. А. Поспелов

Предисловие

Подготовка тектонического землетрясения по сравнению с актом землетрясения представляет собой длительный процесс, который проявляется в предвестниках, может быть зафиксирован современными приборами и направленно ведет к возникновению сейсмического события. Интерес к процессу подготовки понятен — именно наличие такого этапа определяет, в частности, принципиальную возможность прогноза сейсмических событий. Даже монографическая литература, посвященная изучению этого этапа, обширна. Если провести анализ указанной литературы, то можно выделить пять основных тем, фигурирующих в ней: фактический материал по предвестникам, статистическая обработка, лабораторные эксперименты, подробное физическое описание моделей подготовки и описание некоторых методов прогноза статистического толка.

Эта книга отличается от упомянутых публикаций. Эмпирические данные по предвестникам приводятся лишь для сравнения с теоретическими результатами, статистическая обработка и описание лабораторных экспериментов отсутствуют, физическое описание процессов подготовки приводится относительно скупое и основной упор делается на общие черты явления и феноменологический подход, проблема прогноза анализируется и решается нетрадиционными для сейсмологии методами, и статистический прогноз не рассматривается. Основной объект исследования — подготовка одиночного, изолированного тектонического землетрясения — элемента сейсмического процесса. На каждом этапе выделяются общие черты процесса в форме, доступной для перевода на математический язык и постановки конкретных задач математической физики. В результате возникают непростые задачи в области механики сплошной среды и математики.

Существо книги можно кратко сформулировать и так — это взгляд специалиста по механике деформируемого твердого тела на процессы подготовки тектонического землетрясения и сопутствующие явления. В итоге многолетней работы автора по рассматриваемой тематике выкристаллизовался замечательный, можно сказать удивительный, результат: даже относительно простые задачи механики деформируемого твердого тела для однородных сред с высокой точностью описывают ход многих процессов в довольно сложной по своему строению земной коре. Это дает хорошую базу и уверенность, что попытки более глубокого анализа перспективны.

В 1991 году вышла книга (*Добровольский И. П.* Теория подготовки тектонического землетрясения. — М.: ИФЗ АН СССР, 1991. — 217 с.), которая, как видно, посвящена той же теме, что и предлагаемая монография. Однако эти монографии различаются не только по объему материала, но и по существу, и я думаю, имеет смысл в явном виде отметить основные особенности.

Предлагаемая книга называется «Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения», и, как всякая теория, должна основываться на достаточно полной системе непротиворечивых постулатов. Стремление следовать такому общему принципу, принятому в методологии современной науки, обусловило построение монографии. Сначала на базе не вызывающего сомнений минимального по объему наблюдательного материала анализируются наиболее общие характерные феноменологические аспекты цикла тектонического землетрясения. Этот материал подготавливает читателя к приему формулируемых ниже основных постулатов теории. Подчеркнем, что только *подготавливает*, а не является обоснованием или, тем более, доказательством этих постулатов. Отмеченные постулаты, несмотря на определенную конкретность, допускают построение разных вариантов теории подготовки. Это требует введения ряда принципов, с помощью которых выделяется единственный вид теории. Далее следует собственно построение теории подготовки в количественной форме, где, в частности, обращается внимание на совокупность величин, берущихся из опыта, что характерно вообще для феноменологических теорий. На базе построенной теории производится расчет предвестников, и в нем рассматривается ряд задач, которые были решены ранее. Но это не простое переписывание: благодаря совершенствованию известных компьютерных математических программ появилась возможность получить практически точные решения задач, исследованных ранее в довольно грубом приближении. При таком стратегическом подходе разнообразные конкретные модели подготовки, которые в книге 1991 года до некоторой степени выполняли роль исходного материала для построения теории, становятся лишь иллюстрациями и отнесены на более позднее место. Кстати, и там их анализ претерпел заметные изменения: на базе построенной теории впервые появилась возможность их обоснованной классификации.

В монографии решены некоторые задачи ретроспективного прогноза места и силы землетрясения по предвестникам конкретных землетрясений. Если принять во внимание погрешности измерений и обработки фактического материала, то можно признать, что вычисленные параметры практически точно совпали с таковыми для реальных землетрясений. Надо признаться, что такое согласие даже для автора оказалось совершенно неожиданным. В целом же проведенный анализ задач прогноза поставил множество новых проблем, и его нужно считать лишь обнадеживающим началом исследований в этом направлении. Подобного материала ранее не было, и он достойно венчает построение теории подготовки.

И. П. Добровольский

Введение

Человечество всегда проявляло интерес к землетрясениям: ведь по существу на поверхности Земли это психологически самое грозное явление, когда утрачивает надежность естественная и единственная опора — твердь земная. К тому же у подводных землетрясений есть весьма опасный спутник — цунами. В давние времена землетрясения считались божественным проявлением. Например, у древних римлян бог морей Посейдон отвечал и за землетрясения, которые объяснялись движением воды под землей. Это не мешало и иному подходу к землетрясениям. Примерно три тысячелетия назад в Китае был сделан интересный сейсмометр (он стал эмблемой Государственного сейсмологического бюро Китая), определявший направление прихода сейсмической волны. Постепенно укреплялась также мысль о не внезапности землетрясений, о существовании какого-то периода его созревания, подготовки. До настоящего времени дошли сведения, что еще в 373 г. до н. э. перед землетрясением наблюдались световые эффекты. М. В. Ломоносов в работах «Слово о рождении металлов от трясения Земли» (1757 год) и «О слоях земных» (1759 год), говоря современным языком, связывал тектонические движения и землетрясения в единый процесс. Однако становление науки о землетрясениях — сейсмологии — в ее настоящем виде произошло лишь в конце XIX — начале XX веков. Б. Кото, развивая идеи Дж. Милна в связи с землетрясением Мино-Овари 28 октября 1891 г. в Японии, писал следующее: «Внезапные поднятия, опускания и горизонтальные сдвиги больших участков местности, происходящие при катастрофических землетрясениях, обычно считают скорее следствием, чем причиной подземных сотрясений; но, по моему мнению, можно с уверенностью утверждать, что внезапное образование большого разлома Нео было действительной причиной великого землетрясения».

XX век стал веком интенсивного развития сейсмологии. Темп развития какой-либо отрасли знаний в немалой степени определяется темпом накопления эмпирических сведений. Основной объект исследования в сейсмологии — сильные землетрясения — относительно редкие события, неподдающиеся надежному и содержательному лабораторному моделированию. Поэтому сейсмология эволюционировала неспешно. В сейсмологии непосредственно в связи с землетрясениями можно выделить два направления: первое — фиксация и анализ происходящих землетрясений, включая вопросы распространения сейсмических волн, и второе — фиксация и анализ предшествующих явлений (предвестников), включая прогноз тектонического землетрясения.

Первое направление более развито по очевидной и объективной причине: оно по сравнению со вторым оказалось более простым во всех отношениях. В первом направлении мы имеем дело и, вообще, инте-

рисуемся почти исключительно механическими процессами. Построить надежный прибор для фиксации быстропротекающих механических явлений проще, чем для долговременных (месяцы, годы). Это создает благоприятные условия для формирования и обслуживания сети сейсмических станций, которые поставляют огромный экспериментальный материал. Теоретическая база также уже имела — статическая и, особенно, динамическая теории упругости. Ведь, например, поверхностные волны, теоретически предсказанные Дж. У. Рэлеем, были впервые экспериментально обнаружены именно сейсмологами. Теории трещин, точечных и пространственных излучателей, распространения упругих волн служили хорошей основой для создания различных моделей очага, поскольку уже было понято, что землетрясение является следствием внутреннего разрушения напряженных земных недр. Теория вероятности, математическая статистика вместе с огромным эмпирическим материалом о положении очагов землетрясений, в свою очередь, предоставляли возможность для эффективного сейсмического районирования, исследования сейсмического режима и вероятностного прогноза. Исследование афтершокового процесса позволяет лучше понять устройство очаговой области, а форшоки являются одним из типов краткосрочных предвестников землетрясения.

Второе направление несравненно более сложно, чем первое. Его основной темой является фиксация и анализ предвестников. Но предвестники проявляются в довольно разнообразных физических полях, и поэтому исследования с самого начала должны проводиться физически комплексно. Если очаг даже катастрофического землетрясения «работает» не более минуты, то предвестники проявляются в течение месяцев и лет перед землетрясением. Амплитуда предвестников невелика, что создает не только определенные трудности для выделения предвестникового сигнала из хода фоновых вариаций, но и чрезвычайно повышает вероятность случайных и «преднамеренных» ошибок. В результате многократно возрастают трудности эмпирического обнаружения предвестников и создания соответствующих станций, а надежность и степень доверия к опубликованным данным существенно снижаются. По сравнению с теорией очага теория подготовки тектонического землетрясения не имеет столь основательной теоретической базы, поскольку, прежде всего, отсутствовали достаточно ясные представления о процессе подготовки. Отсутствие развитой теории подготовки, по существу являющейся теорией предвестников, вызывала и вызывает трудности в идентификации предвестников.

Цель монографии — построить эффективную теорию подготовки тектонического землетрясения и тем самым конструктивно показать; что указанные в предыдущем абзаце принципиальные трудности преодолимы, что построенная теория подготовки ставит много интересных и сложных задач и может далее развиваться, что процесс подготовки конкретного землетрясения как некоторое явление в земной коре проливает свет и на свойства земной коры в естественном залегании.

Объект изучения — одиночное, не взаимодействующее с другими тектоническое землетрясение. Его можно назвать элементарным актом сейсмичности или элементом сейсмического процесса. Понятие «сейсмический процесс» здесь трактуется в широком смысле: в нем содержится явления предшествующие, сопровождающие и последующие по отношению к акту основного сейсмического события.

В XX веке был создан не один десяток моделей подготовки тектонического землетрясения. Они обладали двумя особенностями — были качественными, и их авторы стремились наиболее подробно описать физику процесса. При этом совершенно игнорировалось очевидное положение, что очень подробную физическую модель невозможно полностью, без каких-либо упрощений, перевести на математический язык. Впрочем, такая задача почему-то и не ставилась. Отсутствовали ясные количественные оценки общих свойств области подготовки, которые могли бы ставить ограничения на подробное описание деталей очаговой области.

В настоящей книге принят дедуктивный метод анализа — составляется наиболее общее представление, выделяются главные объекты и черты явления, определяются общие свойства выделенных объектов. Такой подход не исключает произвольно глубокой физической детализации, но сразу ставит для нее соответствующие ограничения. В частности, и это очень важно, можно ясно определить степень действительно необходимой детализации в зависимости от поставленной конкретной задачи. В результате был выбран характерный для современной науки аксиоматический метод построения теории подготовки. Такой подход позволяет не только относительно просто анализировать действенность теории, но и создавать разные варианты. Приведу одно интересное высказывание.

«Ценность схем индуктивной логики видели в их способности предсказывать результат новых опытов на основе обобщения прежних. Индукция считалась мощным инструментом победно шествовавших естественных наук, получивших именно по этой причине имя индуктивных. Вскоре, однако, вера в индукцию стала гаснуть. Те, кто произвел революционные сдвиги в естествознании, работали не по наставлениям Бэкона и Милля, рекомендовавшим собирать частные данные опыта с тем, чтобы они навели (индукция — значит наведение) на обобщающую закономерность. После теории относительности и квантовой механики мнение, будто индукция служит орудием открытий, окончательно отвергается. Решающую роль теперь отводят гипотетико-дедуктивному методу, согласно которому ученый выдвигает гипотезу (неважно, откуда она черпается) и выводит из нее положения, доступные контролю в эксперименте [Ярошевский, 1984]».

Невозможно оставить без внимания наиболее часто рассматриваемую во всех аспектах проблему прогноза тектонического землетрясения. Чрезвычайный интерес к этой проблеме, проявляемый почти всеми, понять можно. Вместе с тем, вызывает удивление мнение, бы-

тующее даже в среде геофизиков, о фантастической сложности этой проблемы и, как следствие, о почти полной безнадежности ее эффективного решения. Такое мнение обычно основывается на рассматриваемом с геологических позиций действительно сложном строении земной коры, но при этом совершенно не обсуждаются вопросы — в какой степени для прогноза имеют значение эти геологические подробности и как они влияют на механические свойства? В реальности дело обстоит проще. Проблема прогноза является лишь одной из частных задач сейсмологии. Более того, сейчас можно утверждать, что в методическом отношении она уже решена. В самом деле, в проблеме прогноза можно выделить два подхода к ее решению — статистический и детерминированный (этот термин вводится здесь впервые), которые в реальном приложении дополняют друг друга. Вероятностный прогноз основан на анализе сейсмического процесса и ряда вероятностных предвестников, успешно развивается и имеет определенные достижения. Детерминированный прогноз использует в качестве исходного материала множество предвестников конкретного землетрясения и преследует цель прогноза именно этого конкретного землетрясения, т. е. прогноза отдельного события. Детерминированный прогноз базируется на математической теории подготовки и является обратной задачей этой теории.

Рассмотрим общее построение книги.

Три четверти тектонических землетрясений происходит в земной коре; очаги таких сейсмических событий залегают на относительно небольшой глубине и поэтому наиболее опасны. Земная кора, таким образом, является основной средой, в которой развиваются сейсмические события. Поскольку землетрясения являются в первую очередь механическими явлениями, то необходимо выделить свойства земной коры, которые являются определяющими для возникновения землетрясений.

Сейчас имеется большое количество эмпирических сведений о процессах, связанных с землетрясениями, но, по-видимому, нет ни одного землетрясения, которое было прослежено полностью — от начала появления предвестников до окончания афтершоковой деятельности. Кроме того, разные землетрясения носят индивидуальные черты. Поэтому важно построить образ землетрясения вообще, который вмещал бы любые варианты и содержал бы основные этапы сейсмического события.

Основная задача книги — построение теории подготовки. По современным представлениям построение теории сложного физического процесса включает несколько этапов. Следует составить качественную физическую модель явления и получить из нее на качественном уровне первые выводы; в данном случае описать механизмы появления предвестников. Однако построить математическую модель, которая сохраняла бы все черты физических представлений, не только невозможно, но в большинстве случаев не нужно. Поэтому основой математической

теории должны служить феноменологические представления, которые, однако, должны обладать достаточной общностью, чтобы содержать разные варианты. Решение прямых задач — расчетов предвестников — и сравнение полученных результатов с эмпирическими данными преследует двоякую цель: убедиться в достаточном соответствии теории реальности и составить общее представление о распределении предвестников. Интересно, что возникла и получила решение проблема установления истинности опубликованных эмпирических данных о предвестниках. Это очень важный вопрос. Если мы хотим заниматься прогнозом землетрясения, базируясь на данных о предвестниках, то в дело вступает простое правило: из неверных исходных данных можно получить любые, в том числе не соответствующие действительности, следствия. Постановка и решение обратных задач — прогноз землетрясения — является венцом всех предыдущих построений. Здесь возникает еще одно интересное направление. Если в результате предыдущих построений мы убедились в истинности развитой теории, то можем для любого гипотетического землетрясения на произвольно заданной системе пунктов рассчитать ход предвестников; при желании эти данные несложно снабдить случайной компонентой. Это поможет правильно проектировать прогностические полигоны, расставлять реальные пункты наблюдений за предвестниками, проверять эффективность всевозможных методов прогноза.

Отмеченные выше основные положения графически представлены в виде следующей блок-схемы (рис. 0.1).

Теория — это система, в которой все ее составляющие связаны, и их допустимо менять, только отдавая себе отчет, что это может привести к существенной нестыковке ее отдельных частей, изменить или вообще разрушить систему в целом. Поэтому в монографии несколько основных параметров процесса используется всюду практически без изменений. Если говорить о теориях, упоминаемых в этой блок-схеме, то они развиты весьма неодинаково и имеет смысл дать им краткую характеристику.

Теория афтершоков. Анализ афтершоков является наименее исследованной областью по сравнению с анализом очага и процесса подготовки. Теории афтершоков не только не существует, но нет какого-либо общего представления о ней, неясно в каком ключе ее строить. Все имеющиеся построения сводятся лишь к статистическому анализу наблюдений. Какие-либо физические соображения для построения теории не приводятся и, справедливости ради, нужно сказать, что это сделать трудно — ведь следует подробно исследовать область разрушения, содержащую много случайных элементов.

Теория очага. Начнем с определения очага. По-видимому, наиболее общим будет следующее: очаг землетрясения есть источник сейсмических волн, причина их возникновения [Костров, 1975]. Такое определение подходит для очагов землетрясений любого типа, в том

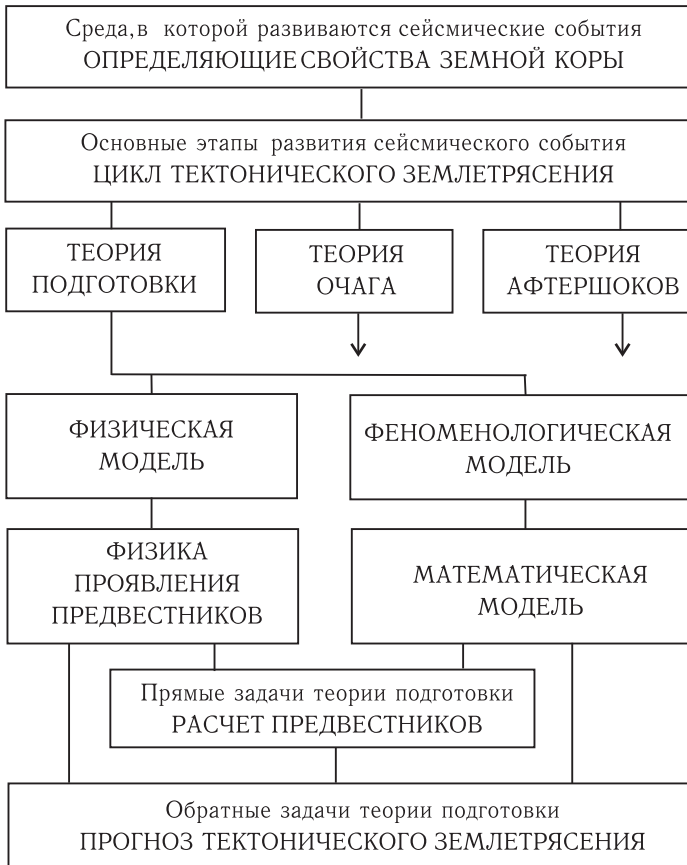


Рис. 0.1

числе антропогенных. Что касается тектонических землетрясений, то здесь можно сказать более конкретно: очаг тектонического землетрясения это поверхность динамически развивающегося разрыва. Таким образом, в теории очага следует построить модель источника сейсмических волн в напряженной среде. К настоящему моменту существует множество таких моделей, которые можно разделить на два класса — точечные и протяженные. Точечные модели представляют собой комбинации из сосредоточенных сил в упругой среде и описывают поведение среды на большом удалении от очага (в дальней зоне); протяженные — имеют конечные размеры и используют теории трещин и дислокаций. Во всех моделях рассматриваются только механические процессы и поэтому основой построения всех моделей является теория упругости. В настоящее время активность в построении моделей очага снизилась и можно было бы ожидать появления обобщающей монографии на

эту тему, но такое, к сожалению, пока не произошло. Что касается эмпирического материала, то относительно густая сеть сейсмических станций поставляет обильный материал.

Теория подготовки. Наблюдение процесса подготовки, его анализ и построение теории подготовки тектонического землетрясения являются более сложными задачами по сравнению с подобными исследованиями очагов землетрясений. В самом деле. Очаг землетрясения проявляется возникновением сейсмических волн, колебаний поверхности Земли и является причиной этих явлений; внешним проявлением процесса подготовки является возникновение предвестников землетрясений — нехаотических слабых возмущений геофизических полей, и следует найти причину таких возмущений в недрах непрерывно деформирующейся Земли. Здесь трудности возникают по довольно простому основанию — слабые возмущения вызываются трудно обнаруживаемой причиной. Пагубные последствия землетрясений обусловлены механическими явлениями и поэтому теория очага оказывается чисто механической; предвестники землетрясений проявляются во всех геофизических полях твердой Земли и даже в атмосфере. Эмпирической базой для анализа очагов являются кратковременные, относительно легко фиксируемые колебания поверхности Земли; предвестники проявляются на больших отрезках времени, невелики по амплитуде и поэтому их фиксация и выделение на фоне помех оказывается непростой задачей. Теория подготовки должна описывать все предвестники, быть физически комплексной, к построению теории подготовки привлекаются сведения практически из всех разделов физики. Важен также психологический момент: предвестники являются основой для решения задачи прогноза. Решение задачи прогноза в том числе еще и престижно. Это повышает желание исследователя обнаружить и опубликовать «еще один предвестник». В результате появилось немало ложных сведений о предвестниках, и доля их в настоящее время составляет не менее половины. В таких условиях построение эффективной теории подготовки наталкивается на дополнительные трудности: уменьшается количество надежных эмпирических сведений, на которых проверяется физическая теория.

Глава 1

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

«Земная кора устроена очень сложно» — это утверждение давно стало общим, хрестоматийным местом в науках о Земле. Оно столь же справедливо, сколь и бессодержательно: ведь все макроскопические (и не только макроскопические) объекты во Вселенной довольно сложны и по строению и по происходящим в них процессам. Поскольку все учесть невозможно, а, главное, не нужно, то и при анализе строения и свойств земной коры в нашем случае следует выделить те качества, которые определяют возможность возникновения землетрясений и которые следует в первую очередь принять во внимание при построении теории землетрясений.

Собственно акт землетрясения в основных чертах проходит для всех землетрясений одинаково, обнаруживаемые при детальном анализе данных сейсмических станций различия трудно назвать существенными. Такое представление является общепринятым и находит свое отражение в теоретических работах — несмотря на большое число разных моделей очага, их невозможно назвать конкурирующими: они скорее дополняют друг друга, имея разные области приложения. Иная ситуация сложилась с анализом процессов подготовки. Здесь можно столкнуться даже с радикальным мнением, что вообще все землетрясения готовятся по-разному. Но тогда уместно поставить вопросы: неужели в самом деле подготовка всех тектонических землетрясений не имеет общих черт, а если есть существенные различия, то в чем они проявляются и действительно ли они существенны? Ответы на общие вопросы требуют адекватного общего анализа.

Последний раздел главы посвящен терминологии. С этим вопросом в геофизике сложилась странная ситуация: порой одному и тому же термину придается разный и к тому же неопределенный смысл. Такое положение побудило дать четкие определения ряду основных используемых в монографии терминов.

1.1. Определяющие свойства земной коры

Наша планета имеет три основные зоны — ядро, мантию и кору. Кора обладает наибольшей жесткостью, мантия похожа на вязко-упругое тело, а ядро (внешняя и большая по объему его часть) находится в состоянии, близком к жидкому. Толщина мантии около 2900 км. Средняя толщина земной коры 33 км; она увеличивается до 70–80 км в некоторых областях материков, понижаясь порой до нескольких километров в океанах. Таким образом, толщина земной коры составляет величину порядка 1 % от толщины мантии. В мантии существуют мощ-

ные конвекционные потоки, которые, взаимодействуя с корой, создают в ней высокие механические напряжения и поддерживают постоянную относительно высокую скорость деформации. Тонкая земная кора не может противостоять своей прочностью этим процессам. Если провести сравнение с лабораторными испытаниями конструкционных материалов, то процесс деформирования земной коры можно считать аналогом испытаний на машине деформационного типа. Итак, *главное свойство земной коры состоит в том, что она непрерывно деформируется мощными силами, для которых ее прочность не является помехой*. Отсюда, как следствие, вытекает существование ряда других важных свойств.

Основное свойство земной коры обуславливает ее механическую структуру. Если какой-то объем среды подвергается описанному выше деформированию, то он обязательно должен разрушиться. Разрушение неоднородно в том смысле, что какой-то объем не превращается в «пыль»: происходит раскалывание целой и к тому же неоднородной среды на куски. Продолжающийся процесс деформирования происходит по поверхностям между образовавшимися кусками, создавая прослойки конечной толщины. Так схематично создается реально существующее **блоковое строение земной коры с наличием разломов** и более интенсивным деформированием именно по разломам. С точки зрения механики сплошной среды эту особенность коры можно выразить кратко: земная кора по своему строению и происходящим в ней процессам неоднородна, а разломы представляют собой лишь специфический по геометрии вид неоднородности. Земная кора как макроскопический объект может эффективно моделироваться и действительно во всех расчетах моделируется сплошной средой. При постановке и решении конкретных задач нужно выбирать вид среды, соответствующий поставленной задаче — упругая, вязкая, пластическая, не стремясь при этом к максимальной общности, а руководствуясь возможностью эффективного решения задачи, возможностью отразить те стороны, которые важны именно в рассматриваемой задаче.

Блоки не являются однородными образованиями, и сами состоят из множества структурных элементов. Границы между блоками и субблоками представляются в виде прослоек, обычно менее прочных, которые образуют систему ослабленных зон. Характерно, что блоки имеют несколько преимущественных размеров [Садовский и др., 1987]: 10–12 км, 45–60 км, 300–600 км. При изучении рассеяния сейсмических волн удалось выявить мелкомасштабные неоднородности: 4–6 м, 15–20 м, 150–250 м.

Все реальные материалы нелинейны, и это тем более относится к горным породам. Нелинейность проявляется в сильной зависимости основных физических характеристик горных пород (модули упругости, скорости волн, магнитные свойства и т. д.) от напряжений и деформаций. **Высокая пьезочувствительность как проявление нелинейности горных пород** — важное свойство земной коры. Многие процессы

в земной коре, причем имеющие большое значение (например, процесс подготовки тектонического землетрясения), сопровождаются весьма малыми изменениями деформаций и напряжений, когда нелинейность не только проявляется особенно ярко, но становится единственной причиной возникновения ряда эффектов.

Непрерывные относительные движения, довольно высокая скорость деформации, наличие горизонтальных и вертикальных перемещений и их градиентов — еще одна особенность земной коры, явно обнаруживающаяся при геодезических измерениях. Наиболее ярко это свойство проявляется на разломах и уверенно фиксируется даже на небольших отрезках времени — годы, десятилетия. Хрестоматийным примером служит разлом Сан-Андреас в Северной Америке, на котором интенсивное деформирование проявляется на поверхности в зоне шириной в несколько метров. Еще пример. В работе [Кучай и др., 1978] показано, что движение крыльев Вахшского надвига в Таджикистане совершается в полосе шириной около 100 м, где в пределах времени наблюдений (несколько лет) уверенно измерен значимый градиент скорости. В той же работе показано, что вязкость прослойки на 1–3 порядка ниже эффективной вязкости массива блока. Иногда на основании подобных наблюдений считают блоки абсолютно жесткими элементами. При использовании такого подхода нужно, однако, иметь в виду, что полное относительное перемещение центров двух соседних блоков в грубом приближении осуществляется примерно поровну за счет деформации прослойки и самого блока — различие вязкостей компенсируется различием размеров. Процесс деформирования блока обнаруживает себя в большом количестве микроземлетрясений, распределенных по его объему.

Течение материала, обладающего определенной эффективной вязкостью, может поддерживаться лишь механическими напряжениями. Причем, чем выше вязкость, тем при заданной скорости деформации будут более высокими напряжения. Следовательно, границы между блоками и сами блоки должны находиться под действием существенных касательных напряжений. **Наличие высоких касательных напряжений**, близких к пределу прочности материала блоков, — также существенная особенность земной коры. О существовании поля тектонических напряжений говорится в работе [Гзовский, 1975]. Там же (с. 369) касательные напряжения на глубинах 15–30 км оцениваются величиной 75–120 МПа; это близко к значениям 100–200 МПа, приводимым другими авторами [Артюшков, 1972; Кучай, 1975]. Напряжения на подошве земной коры вблизи границы Мохововичича в некоторых публикациях оцениваются в 200–400 МПа.

Упругость материала земной коры и существование высоких касательных напряжений обеспечивают **высокий уровень фонового запаса упругой потенциальной энергии коры**. Этот уровень близок к энергетической прочности материала и имеет принципиальное значение для

сейсмичности. Сейсмичность планеты обеспечивается флуктуациями этого уровня и очевидно, что большой уровень дает большие по величине флуктуации.

Долговременное и направленное течение по граничным прослойкам и телу блоков вызывает образование протяженных структур деформаций. **Текстурирование горных пород в естественном залегании** также существенное свойство земной коры. Оно иногда обнаруживается визуально и проявляется, в частности, в анизотропии сейсмических волн. Текстурирование вызывает анизотропию более тонких механо-электрических свойств и, например, вызывает появление пьезоэлектрического эффекта у горных пород в естественном залегании, когда некоторые объемы поликристаллических пород начинают вести себя подобно отдельному кристаллу.

Почти все, о чем говорилось выше, с удивительной ясностью и краткостью отмечал Г. А. Гамбурцев [1960, с. 427]. «Землетрясение — одно из проявлений тектонической жизни земной коры и подкорового вещества. В процессе этой жизни развивалась дифференциация по прочности отдельных участков земной коры. Земная кора расчленялась на относительно более прочные участки — «блоки» земной коры — и относительно менее прочные участки — ослабленные зоны, образующиеся в области сочленения соседних блоков при их относительном движении. Крупные блоки могут состоять из нескольких блоков и внутренней системы ослабленных зон».

1.2. Цикл тектонического землетрясения

Высказываемое на качественном уровне мнение, что все землетрясения готовятся и протекают по-разному трудно признать совершенно верным. У тектонических землетрясений планеты имеются существенные общие черты и важно составить общее представление о сейсмическом процессе, связанным с отдельным тектоническим землетрясением. Во-первых, как мы увидим ниже, даже этот общий подход не является однозначным. Во-вторых, такое представление позволяет более ясно ставить задачи детальных исследований. В-третьих, поскольку в настоящее время имеется большое количество разных моделей подготовки землетрясения, то это позволит найти место каждой модели в общем процессе.

Тектоническое землетрясение вызывается внутренним разрушением земных недр. Недра Земли находятся под действием больших механических напряжений, и разрушение определяется действием, прежде всего, девиаторных напряжений. Разрушение проявляется в том, что образуется трещина (магистральный разрыв) «конечной» длины. Здесь имеется в виду, что длина трещины далеко не совпадает с длиной экватора, и она различна для землетрясений разных магнитуд. Такое обстоятельство наводит на мысль, что разрыв пронизывает некоторую область с относительно недавно образовавшимися особыми свойствами

и размер разрыва тесно коррелирует с характерным размером этой области. Наиболее наглядно это проявляется при подготовке землетрясения на ярко выраженном разломе, когда образуется «двумерная» зона зацепления, т. е. зона затрудненного деформирования. Наблюдения также показывают, что акт разрушения — возникновение магистрального разрыва — не внезапен: ему предшествует множество небольших разрушений, образование множества трещин. Последнее наблюдается и в лабораторных опытах на разрушение при статическом нагружении и тогда говорят об акустической эмиссии.

Последовательность внешне наблюдающихся явлений в связи с землетрясением выглядит следующим образом. На фоне сравнительно спокойного, асейсмичного состояния, характеризующегося наличием хаотических вариаций различных геофизических полей, возникают возмущения этих полей, имеющие некоторый регулярный характер; их надежно можно обнаружить лишь когда они выходят за пределы фоновых вариаций, но это не означает, что они не существуют до такого момента. Эти вариации развиваются, но фоновая сейсмическая деятельность не активизируется. В некоторый момент скорость изменения регулярных вариаций увеличивается, появляются небольшие землетрясения (форшоки), происходит главный толчок и потом среда в течение какого-то отрезка времени, на котором также возникают угасающие по силе землетрясения (афтершоки), возвращается к исходному асейсмичному состоянию. Так формируется сейсмичный период, включающий предшествующие землетрясению регулярные вариации и множество землетрясений разной мощности, в том числе, главный толчок. В итоге получается простая последовательность: асейсмичный период — сейсмичный период — асейсмичный период. Такую последовательность назовем *циклом тектонического землетрясения*.

Для более полного понимания смысла сейсмичного периода целесообразно его детализировать, разделив на ряд этапов.

1 этап. В начале сейсмичного периода возникают регулярные возмущения геофизических полей. Эти возмущения растут по абсолютной величине, обнаруживаются, когда они превышают фоновые вариации, и классифицируются как предвестники землетрясения. Полевые наблюдения за этими предвестниками позволяют сформулировать присущие им некоторые общие характерные качества.

Предвестники представляют собой аномальные нехаотические возмущения геофизических полей; возмущения не заполняют равномерно весь земной шар, а как-то локализуются в окрестности будущего очага; их интенсивность и область проявления растут во времени; интенсивность предвестников убывает с увеличением расстояния от будущего очага. Отсюда следуют естественные выводы. Если есть возмущения, то должна быть и причина; если возмущения локальны, то и причина локальна; если возмущения меняются во времени, то и причина меняется во времени. Такой причиной может быть только появление и раз-

витие в недрах Земли локальной *неоднородности свойств*; появление *материальной* неоднородности невозможно за столь короткое время. Обратное: не будет неоднородности — не будет аномальных возмущений, т. е. предвестников. Можно считать, что в таком смысле понятия «существование предвестников» и «существование неоднородности» — тождественны.

Таким образом, на первом этапе происходит возникновение и развитие неоднородности свойств. Он относительно длителен, и его продолжительность растет с магнитудой будущего землетрясения. Вообще говоря, иных ярких явлений на этом этапе не наблюдается, а сейсмическая деятельность не только не активизируется, но нередко даже угнетается.

2 этап. В начале этапа нарушается медленное развитие возмущений геофизических полей. Возрастает скорость изменения возмущений и зачастую изменения предвестников меняют направление (например, рост сменяется убыванием), возникают слабые землетрясения. По длительности этот этап значительно короче первого. Физически он является началом распада (разрушения) неоднородности. Распад осуществляется явными деструктивными актами: образованием трещин, форшоками, пластическими подвижками и т. п.

3 этап. Предыдущий этап прерывается главным сейсмическим событием — магистральным разрывом, т. е. образованием очага. Длительность третьего этапа даже для катастрофических землетрясений не превышает одной–двух минут и в пределах цикла это по времени практически точечное событие. Магистральный разрыв — это акт максимально возможного разрушения неоднородности в том смысле, что размер магистрального разрыва максимален по сравнению с остальными аналогичными разрывами в цикле. Следует заметить, что очаг не является источником энергии и энергия не накапливается в очаге. Очаг землетрясения является источником сейсмических волн, причиной возникновения волнового процесса превращения упругой потенциальной энергии среды в кинетическую — энергию сейсмических волн.

4 этап. Он также длителен. Его основным содержанием является большое количество слабых и уменьшающихся по силе землетрясений — афтершоков. Это завершающий период распада неоднородности, возврата к асейсмичному состоянию.

Мы имеем четыре достаточно подробно описанных этапа сейсмического периода. Из них можно составить две схемы цикла землетрясения.

Физическая схема цикла землетрясения (рис. 1.1, а). Эта схема исходит из физической сущности и физической направленности происходящих процессов безотносительно к их энергетическим характеристикам. Сейсмичный период делится на две части, но не моментом землетрясения, а границей между первым и вторым этапами.

При общем взгляде на физическую суть рассмотренных этапов видно, что первый этап радикально отличается от остальных. Первый

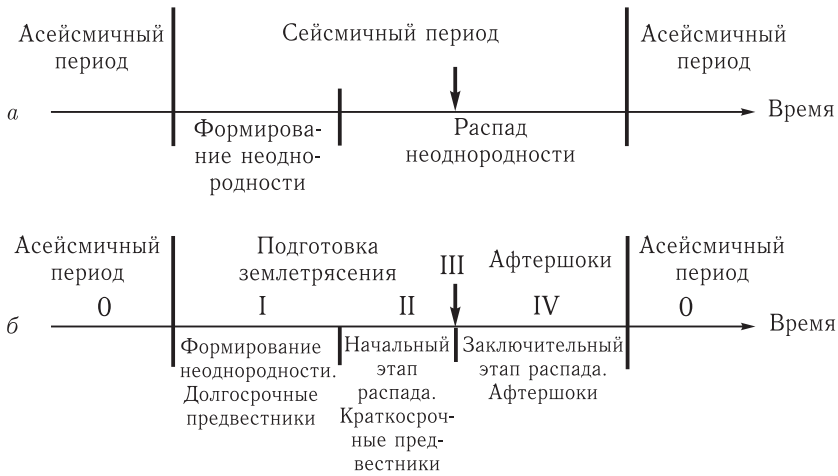


Рис. 1.1. Две схемы цикла тектонического землетрясения: а) физическая схема; б) обычная схема; стрелка — момент землетрясения

этап является созидательным; на нем происходит возникновение и развитие неоднородности — некоторого объема с особыми свойствами, который возмущает и мешает ходу процессов, присущих асейсмичному периоду. На нем проявляются безопасные и относительно небольшие по величине возмущения геофизических полей, которые по сравнению с асейсмичным периодом иногда называют аномальными. Второй, третий и четвертый этапы объединяет одна общая черта — на них происходит распад, разрушение неоднородности. Магистральный разрыв (очаг землетрясения) также является одним из актов разрушения. Он, несомненно, энергетически выдающееся событие, но по физической сути как акт локального разрушения (образования трещины) не отличается от форшоков и афтершоков. Таким образом, сейсмичный период естественным образом делится на два физически различающихся отрезка: образование и формирование неоднородности — 1 этап, и ее распад, разрушение — 2, 3, 4 этапы.

В этой схеме основное сейсмическое событие, магистральный разрыв качественно не отличается от остальных — форшоков и афтершоков, поскольку является таким же актом разрушения и оказывается лишь энергетически наиболее значительным. Остается, конечно, вопрос: почему распад неоднородности не начинается сразу с магистрального разрыва? Видимо, «природа не может сразу определить, где следует провести магистральный разрыв». Говоря серьезнее, необходима непосредственная подготовка места возникновения магистрального разрыва, которая осуществляется на указанном выше втором этапе; размер разрыва определяется размером неоднородности. Здесь уместна аналогия с образцом на лабораторном прессе. Там при нагружении

сначала возникает трещинообразование по всему объему образца (акустическая эмиссия), но к концу опыта относительно большие трещины концентрируются на месте будущего разрыва.

Несмотря на убедительную логику построений, рассмотренная схема непривычна и оставляет чувство неудовлетворенности: здесь недостаточно четко проведен анализ предвестников, и, следовательно, остается неясным вопрос о возможных методах прогноза землетрясения. В результате возникает потребность в построении другой схемы цикла.

Обычная схема цикла землетрясения (рис. 1.1, б). Для нас, а также с энергетической точки зрения, кульминационным событием в цикле землетрясения является основное землетрясение — магистральный разрыв — и все существующие модели подготовки опираются на этот факт. Проводимые ниже построения являются отражением такого подхода и совмещением его с физической схемой.

Сейсмичный период делится на две фазы актом возникновения магистрального разрыва: первая фаза — подготовка землетрясения, вторая — афтершоки. События, развивающиеся на фазе подготовки, подготавливают землетрясение и представляют собой его предвестников. Но в фазу подготовки внедряется граница между формированием и распадом неоднородности, которая содержится в физической схеме. В результате фаза подготовки естественно делится на стадию формирования неоднородности (1 этап) и стадию ее начального распада (2 этап). Стадия формирования и развития неоднородности характеризуется относительно медленными созидательными эволюционными процессами. Предвестники на этой стадии отнесем к типу *долгосрочных*; их распределение в недрах Земли (в том числе и на поверхности) отражает положение, размеры и эволюцию развивающейся неоднородности. Стадия начального распада более скоротечна. Она, как уже отмечалось, характеризуется интенсивным трещинообразованием, возникновением форшоков, быстрых пластических подвижек и иными подобными явлениями. Предвестники на ней отнесем к типу *краткосрочных*. Они предвещают близкое событие и в этом смысле оказываются хорошими индикаторами времени землетрясения. Интенсивное трещинообразование (в частности, форшоки) на этой стадии формируют положение и облегчают возникновение магистрального разрыва, как это подробно описано в схемах разрушения образцов на испытательных машинах (ниже об этом будет сказано подробнее). Фаза афтершоков не требует пояснений.

Таким образом, в обычной схеме цикла тектонического землетрясения, которую мы и будем использовать в дальнейшем, выделяются 5 стадий:

0 — асейсмичное состояние;

I — формирование неоднородности — долгосрочные предвестники;

- II** — начало распада, интенсивное трещинообразование, форшоки, пластические подвижки, формирование положения магистрального разрыва — краткосрочные предвестники;
- III** — очаг землетрясения, кульминация распада;
- IV** — афтершоки;
- 0** — асейсмичное состояние.

Здесь не обсуждался вопрос о физической сущности неоднородности, т. е. о неоднородности каких свойств идет речь, и поэтому имеется определенный простор — выбирая разные типы неоднородности, мы будем получать разные варианты описания процесса подготовки. Но мы установили главное, присущее всем тектоническим землетрясениям явление: *цикл тектонического землетрясения, и в частности процесс подготовки, состоит в возникновении, развитии и распаде неоднородности свойств в напряженных недрах Земли.*

Стоит еще раз подчеркнуть, что проведенные выше весьма общие рассуждения относительно фазы подготовки позволили ввести определения долгосрочных и краткосрочных предвестников. Несмотря на то, что эта терминология бытует в геофизике давно, в данном случае она получает ясный физический смысл, не связанный с конкретной продолжительностью (годы, месяцы, дни) проявления предвестников. Долгосрочные предвестники отражают этап возникновения и развития неоднородности; следовательно, решения обратных задач, т. е. задач прогноза, по долгосрочным предвестникам позволяют найти положение и степень развития неоднородности в разные моменты времени. Краткосрочные предвестники символизируют начало распада неоднородности, кладут предел этапу ее развития и говорят о близком по времени сейсмическом событии. Анализ этих предвестников позволит определить магнитуду созревшего землетрясения и получить оценку времени грядущего акта. Оба типа предвестников сопровождают подготовку землетрясений любых магнитуд.

1.3. Замечания об основных терминах

Очаг землетрясения. Это одно из фундаментальных понятий сейсмологии, относящихся к акту землетрясения. В литературе встречаются разные определения этого термина.

Очаг землетрясения — источник сейсмических волн, причина их возникновения [Костров, 1975, с. 22].

Очаг землетрясения — область возникновения подземного удара в толще земной коры или верхней мантии, являющегося причиной землетрясения [Советский энциклопедический словарь, 1987].

Очаг тектонического землетрясения — поверхность динамически развивающегося разрыва в недрах Земли.

Перечисленные определения отражают суть процесса, и их можно считать физически тождественными, хотя первое определение отлича-