



***Нариман Ходжибаев,**  
заслуженный геолог Узбекистана,  
лауреат Государственной премии*

***(1926-1979)***



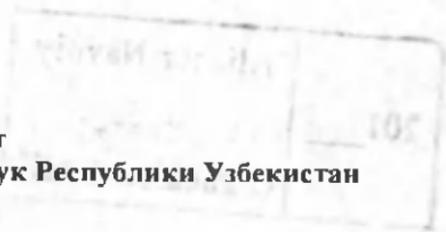
АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН  
ИНСТИТУТ СЕЙСМОЛОГИИ ИМ. Г.А.МАВЛЯНОВА

Д.Х. РАСУЛОВ, Г.Д. РАСУЛОВА

# ФИЗИКА ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Ташкент

Издательство «Фан» Академии наук Республики Узбекистан  
2009



550. 348. 436 (С) - Землетрясения  
551. 24 - Тектоника

В монографии изложены новые теоретические представления о генезисе тектонических землетрясений, которые оформлены в виде гидроударной модели. Согласно модели, фазовое состояние горных пород в очаге перед землетрясением меняется с твердого на жидкое, что приводит к всевозможным направлениям действия тектонического напряжения в нем. Показано, что жидкий очаг может выполнять роль природного гидравлического пресса, благодаря которому происходит многократное увеличение тектонической силы, действующей на окружающие его породы. С позиций модели: дано четкое однозначное определение понятию объема очага землетрясения; выведены аналитические формулы для расчета энергии и объема очага; показано существенное различие между объемами очага и горных пород, излучающих сейсмические волны; изложена физическая природа форшоков и афтершоков.

На примерах Ташкентского 1966 г., Газлийского 1984 г. (Узбекистан) и Мугуйского 1973 г. (США) землетрясений показано хорошее согласие между теоретическими и экспериментальными данными. Показаны причины приуроченности землетрясений к зонам активных разломов. Дано толкование явлениям, сопутствующим землетрясениям. Объяснено образование возбужденной сейсмичности у водохранилищ. В краткой форме изложены и на конкретных примерах разобраны методические рекомендации по прогнозу катастрофических землетрясений близ мегаполисов. Предложены и обоснованы новые методы исследования по прогнозу землетрясений.

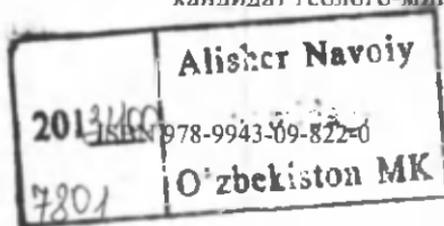
Для геофизиков, физиков, геологов, работающих в сейсмологии, а также аспирантов и студентов соответствующих специальностей в качестве дополнительного учебного пособия.

**Ответственный редактор:**

академик АН РУз, доктор физико-математических наук  
**К.Н. АБДУЛЛАБЕКОВ**

**Рецензенты:**

доктор физико-математических наук Э.З. ИМАМОВ  
кандидат геолого-минералогических наук В.А. ПАК



У 50054  
393  
© Издательство «Фан» АН РУз, 2009 г.  
© Д.Х. Расулов, Г.Д. Расулова, 2009 г.

4

*Нариману Ходжибаеву,  
заслуженному геологу Узбекистана,  
лауреату Государственной премии  
посвящается*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Выяснение природы тектонических землетрясений является одной из основных задач сейсмологии. Освещению этой проблемы посвящены сотни оригинальных статей и десятки монографий. Несмотря на это, данная проблема до последнего времени не нашла своего решения. В данной монографии рассмотрен генезис тектонических землетрясений с разработанных нами теоретических представлений. Свои исследования мы проводили по личной инициативе, т.е. без финансирования со стороны какой-либо организации. Поэтому, на наш взгляд, читателю будет интересно узнать, как они начинались.

В 1978 г. я, выпускник аспирантуры Ленинградского Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе с кандидатским дипломом «в кармане», резко меняю свою профессиональную деятельность: начинаю работать на должности геофизика в одной из полевых экспедиций НПО «Узбекгидрогеология» МГ Узбекистана. Большое влияние на это мое «судьбоносное» решение оказал Нариман Назруллаевич Ходжибаев — один из организаторов и первый руководитель объединения, которое включало в себя несколько экспедиций, партий, СКБ и институт «ГИДРОИНГЕО». До близкого общения с Ходжибаевым Н. у меня было довольно ограниченное

представление о геологии. Благодаря Нариману Назруллаевичу я осознал наукоемкость геологии и важность стоящих перед геологами задач, понял, сколько еще «тайн скрывает матушка-Земля». Нариман Назруллаевич всегда мог выслушать молодого специалиста, вселить в него уверенность в свои силы и способности и по мере возможности содействовать реализации его предложений. Он был глубоко убежден, что как физик я смогу себя реализовать в геологии. Н. Ходжибаев всегда был полон различных планов и задумок, в которые вовлекал специалистов многих профессий. Судя по себе, думаю, что его увлеченность геологией передавалась окружающим. В первые годы работы в экспедиции, а затем в «ГИДРОИНГЕО» я убедился в том, что могу самостоятельно решать разнообразные прикладные задачи. Причем в этом главную роль играли как мое физическое образование и опыт работы в одном из ведущих физических институтов СССР, так и желание достичь поставленной цели. В 1980-х годах я увлекся изучением возникновения ряда естественных электрических полей в Земле. Для меня было очевидным, что добиться бюджетного финансирования моих «увлечений» является делом маловероятным. Действительно, в любом конкретно взятом институте финансируются работы по профессиональной ориентации этого заведения. В связи с этим я проводил свои исследования за собственный счет, благо для этого не нужно было проводить никаких экспериментов. Мне посчастливилось выяснить природу образования ряда естественных электрических полей в Земле. В дальнейшем это привело меня к убеждению, что в земной коре должны существовать электрические токи, генерирующие небольшое магнитное поле. Немного позже это убеждение было использовано нами при разработке пьезоэлектрической модели образования земного магнетизма. Логическим завершением бо-

лее чем 20-летних исследований стало опубликование монографии «Геомagnetизм и геоэлектричество. Происхождение и взаимосвязь».

Одним из следствий пьезоэлектрической модели явился вывод о едином энергетическом источнике образования как геомагнитного поля, так и тектоники литосферных плит, взаимодействие которых приводит к тектоническим землетрясениям. Немного ранее моя дочь Гульнара поступила в аспирантуру Института сейсмологии АН РУз. В аспирантуре она под руководством академика АН РУз К.Н.Абдуллабекова занималась выяснением природы образования локальных вариаций на сейсмоактивной территории Узбекистана. Так как эта тема была близка к моим научным «увлечениям», то я живо заинтересовался данной тематикой. Во время учебы в аспирантуре и после ее успешного окончания Гульнара продолжала интересоваться генезисом землетрясений, была убеждена в решающей роли воды в их возникновении и, наверное, невольно привлекла меня к своим исследованиям. Через некоторое время нами была разработана гидроударная модель тектонических землетрясений. Эта модель позволила взглянуть как на генезис землетрясений, так и на ряд сопутствующих им явлений с новых теоретических представлений.

При работе над книгой мы старались придерживаться двух принципов. Первый из них очевиден и звучит так: от простого к сложному. Во главу второго поставлено четкое изложение процесса землетрясения с теоретических представлений, основанных на известных физических законах. Несложные численные расчеты были использованы для подтверждения физической сущности излагаемых вопросов. Несмотря на простоту использованного математического аппарата, для понимания излагаемого материала необходимы знания из ряда смежных обла-

стей науки: общей физики, геофизики, петрофизики, кристаллографии, гидрогеологии и инженерной геологии. В монографии по мере необходимости даны краткие пояснения и ссылки на литературу, где подробно изложена та или иная информация. В процессе работы над монографией мы консультировались со множеством людей. Среди них мне хотелось бы отметить д.ф.-м.н., профессора Э.З.Имамова (Ташкентский государственный педагогический университет); д.г.-м.н. Р.Ахунджанова и к.г.-м.н. В.А.Пака (Институт геологии и геофизики АН РУз); к.г.-м.н. У.А.Нурматова и к.ф.-м.н. Л.А.Хамидова (Институт сейсмологии АН РУз). Всем вышеперечисленным лицам и многим другим сотрудникам Института сейсмологии АН РУз авторы выражают свою признательность за ценные замечания, которые они высказали по прочтении тех или иных глав рукописи. Особую благодарность мы выражаем директору Института сейсмологии АН РУз д.ф.-м.н., академику К.Н.Абдуллабекову за помощь и содействие, оказанные нам на начальном этапе проведения настоящих исследований. Мы сердечно благодарим директора ООО «Хувайдо-мебель» М.М.Болтабаева за спонсорскую помощь, оказанную нам при издании монографии. Мы весьма признательны консультанту компании «Metroplex Trading International Limited» А.А.Магруппову за помощь, оказанную при работе с компьютерными программами. Мы благодарны также сотруднику Научно-производственного Центра «Геология и минеральные ресурсы» И.О.Коваленко за помощь при оформлении графических материалов. Мы бесконечно благодарны своим родным и близким за то внимание и заботу, которые они оказывали нам при работе над монографией.

*От авторов Д.Расулов*

## ВВЕДЕНИЕ

Описание катастрофических землетрясений люди ведут с древнейших времен. Однако при изучении землетрясений вплоть до конца XIX века использовались лишь визуальные наблюдения. Первый инструментальный прибор — сейсмограф — был изобретен в Японии в 70-х годах XIX века. Наверное, поэтому зарождение сейсмологии как науки связывают с этим событием. Быстрое развитие сейсмологии связано, в первую очередь, как с развитием инструментальной базы наблюдений, так и с увеличением числа сейсмометрических станций, постоянно регистрирующих колебания Земли.

За прошедшее время был накоплен огромный фактический материал, который позволил, с одной стороны, достигнуть определенных успехов в понимании процесса землетрясения, а с другой — поставить ряд новых вопросов. Наверное, наиболее значимым достижением теоретической сейсмологии в первой половине XX века явилась теория упругой отдачи, предложенная Рейдом для объяснения землетрясения 1906 г. в Калифорнии (США). Теория Рейда глубоко повлияла на развитие сейсмологии, и некоторые ее положения сохранили свое значение до сих пор.

Следующим не менее важным шагом в развитии сейсмологии было введенное Рихтером понятие магнитуды землетрясений. Магнитуда является хоть и относительной, но количественной инструментальной характеристикой землетрясений. В дальнейшем понятие магнитуды получило ряд модификаций и в последние 70 лет широко используется во всем мире для характеристики силы землетрясений.

Вторая половина XX века ознаменовалась обнаружением ряда экспериментальных фактов, которые для своего объяснения потребовали выдвижения новых теоретических гипотез. Среди них можно отметить две: фильтрационно-дилатансионную и «сухую» дилатансионную модели. Были проведены многочисленные эксперименты по разрушению горных пород в лабораторных условиях, имитирующих те, при которых породы находятся в земной коре. Было также твердо установлено, что большинство мелкофокусных землетрясений приурочено к разломам. Стало ясно, что ряд разломов в земной коре почему-то генерируют землетрясения, в то время как другие являются временно «спящими».

Строительство многочисленных водохранилищ и закачка вод в глубокие скважины в ряде случаев вызвали генерацию землетрясений в районах, ранее считавшихся асейсмичными. Анализ сейсмограмм возбужденных землетрясений показал, что они ничем не отличаются от сейсмограмм естественных. В последние 50 лет интенсивно ведутся изыскания по предсказанию землетрясений. С этой целью используется измерение ряда физических, химических, гидрогеологических и других параметров горных пород и атмосферы, испытывающих заметные вариации до и в момент землетрясения. Были получены противоречивые данные, которые показали, что быстрого решения данной проблемы не существует. В редких случаях удавалось предсказать некоторые землетрясения. К ним, прежде всего, относится землетрясение в Хайченге, КНР. Однако до сих пор не утихают споры о роли случая в этом событии. Действительно, в настоящее время если и можно с некоторой точностью предсказать силу и время готовящегося землетрясения, то точность определения его эпицентра составит не менее 100 км.

Сейсмологи для объяснения наблюдаемых фактов часто используют понятия, заимствованные из физики. К ним относится и известное в кристаллофизике понятие «сдвиговая дислокация». Понятие «сдвиговая дислокация» ряд исследователей использовали для объяснения сил, действующих в очаге землетрясения. Необходимо отметить, что механический перенос физических понятий в геофизику часто не оправдывает себя. В недрах Земли горные породы находятся в таких физических условиях, которые трудно воспроизвести в лабораторных. Кроме того, при переносе не учитывается влияние масштаба. На факт несимметричности законов природы относительно масштаба впервые обратил внимание еще Галилей. Законы микромира существенно отличаются от того, что мы наблюдаем в макромире.

Тектонические землетрясения вызваны движением литосферных плит. Так как эти движения происходят в субгоризонтальном направлении, то и направления действия тектонических сил, вызывающих эти движения, должны быть субгоризонтальными. При землетрясениях же горные породы в эпицентральной области могут испытывать преимущественно горизонтальное или вертикальное смещение. Каким образом тектонические силы приводят при землетрясениях к всевозможным направлениям смещения горных пород, до сих пор не совсем понятно. Происхождение тектонических сил также не получило однозначного ответа. До последнего времени также не было дано однозначных определений: объему очага землетрясения; пространственному распределению афтершоков основного толчка; подобию сейсмограмм форшоков, афтершоков и основного толчка, и пр. В настоящее время сейсмология как наука включает ряд различных направлений исследования: выяснение природы естественных и возбужденных землетрясений;

предсказание землетрясений; вопросы сейсмостойкого строительства; сейсмическое районирование и определение сейсмического риска; инструментальная сейсмология; экспериментальная сейсмология по определению прочностных свойств горных пород в лабораторных условиях и пр. Каждому из перечисленных направлений исследования посвящено множество научных статей и монографий [например, 1, 12, 31, 39, 46, 50, 62, 65, 70, 80, 98, 101, 107, 117, 118].

В данной монографии с разработанных нами теоретических представлений описана физика образования тектонических землетрясений. Мы стремились к такому последовательному изложению материала монографии, чтобы он без особых усилий воспринимался читателем. В первых главах в краткой лаконичной форме изложены: история становления сейсмологии как науки; основные факты сейсмологических наблюдений; популярные модели образования землетрясений и т.п. В четвертой главе показано, что как геомагнетизм, так и тектогенез вызваны одним энергетическим источником. Там же изложена модернизированная концепция тектоники литосферных плит, предложенная ранее одним из авторов. В пятой главе подробно описана гидроударная модель тектонических землетрясений, разработанная авторами. В шестой главе с новых теоретических представлений объяснены основные особенности тектонических землетрясений и сопутствующих им явлений. Седьмая глава посвящена трактовке возбужденных землетрясений и краткому изложению разработанных авторами методических рекомендаций по предсказанию катастрофических землетрясений у мегаполисов и стратегических объектов.

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В СЕЙСМОЛОГИИ

### *1.1. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ*

Из наиболее известных и подробно описанных землетрясений доинструментальной сейсмологии следует упомянуть работы Р.Мале [171] и Р.Олдема [182]. Р. Мале исследовал разрушительное Неаполитанское землетрясение 1862 г. Естественно, что все исследования он проводил визуальным путем. Р.Мале полагал, что землетрясения и извержения вулканов вызваны одними причинами и имеют взрывную природу. Точку взрыва в земной коре он назвал гипоцентром, а ее проекцию на земную поверхность — эпицентром землетрясения. Автор [171] определял степень разрушения в эпицентральной области по степени разрушения строений. Заслуживает внимания разработанный Р.Мале метод оценки глубины залегания гипоцентра землетрясения. Вначале он определил наиболее сильно пострадавшую от землетрясения область, которую ныне именуют плейстосейстовой. Затем Р.Мале определил направления смещений в этой области различных предметов, сооружений и пр. Точку местности, от которой найденные направления расходились в разные стороны, он принимал за эпицентр. Далее автор [171] вычислил углы падения трещин относительно прямой, перпендикулярной земной поверхности. Он полагал, что линии падения трещин должны сходиться в гипоцентре. Исходя из этого, путем простых тригонометрических расчетов Р.Мале определил среднее положение гипоцентра Неаполитанского землетрясения  $h \approx 6,5$  км. Сегодня исследования и взгляды Р.Мале кажутся

примитивными, но они были во многих аспектах пионерскими и явились той отправной точкой, от которой ведут свой отсчет макроскопические наблюдения, продолжающиеся до сих пор. Дальнейшее развитие макроскопические исследования получили в работе Р.Олдема [182], который изучал катастрофическое землетрясение 12.06.1897 г. в Ассаме (Индия). Оценить энергию этого землетрясения в то время было невозможно. Р.Олдем рассмотрел вопросы, касающиеся интенсивности и изосейст. Под интенсивностью подразумевается степень сотрясения какой-либо точки на поверхности Земли в результате толчка. Изосейстами называют линии на земной поверхности, отраженные на карте и соединяющие точки с одинаковой интенсивностью (балльностью). В настоящее время почти повсеместно используется 12-балльная шкала интенсивности, в основу которой положена модернизированная шкала Меркалли [58, 99, 203]. Интенсивность обозначается римскими цифрами. Если интенсивность в I балл практически людьми не ощущается, то интенсивность в XII баллов характеризуется всеобщим разрушением, смещением крупных масс скальных пород, изменением русел рек, подбрасыванием предметов вверх и пр. Наблюдаемая интенсивность сильно зависит от грунтов (поверхностных пород). На скальных породах интенсивность, при прочих равных условиях, как правило, заметно ниже, чем на четвертичных отложениях, таких как лёссы, глины, пески и пр.

Развитие инструментальной сейсмологии практически не сказалось на макросейсмических наблюдениях. Как правило, сразу после основного толчка группа сейсмологов выезжает в эпицентральную область землетрясения, где тщательно документируют визуальным образом степень разрушения инженерных сооружений, трещин на поверхности Земли и пр., и подкрепляют наблюдения фотографированием объектов. Ведут также опрос очевидцев событий, хотя их показания часто

бывают противоречивы. Накопленный опыт позволил дифференцировать степень разрушения зданий того или иного типа постройки в зависимости от интенсивности землетрясения. Менее информативными являются макросейсмические исследования в пустынных и необжитых районах. Из-за отсутствия зданий информацию собирают по имеющимся объектам, авто- и железнодорожным путям, насыпям, колодцам, поверхностным эффектам и пр. Интересно отметить, что предложенный Р.Мале способ определения эпицентра можно использовать и до сих пор, с той лишь разницей, что таким образом определяют центр плейстосейстовой области при некоторых типах землетрясений. Так, по степени повреждения типовых колодцев были определены изосейсты Газлийского землетрясения 19.03.1984 г., а направления смещения этих колодцев сходились в центре плейстосейстовой области [30, с. 151-156]. Таким образом, макросейсмические исследования, впервые подробно описанные Р.Мале [171], используются и до сих пор в несколько усовершенствованном виде.

## ***1.2. МАГНИТУДА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ***

С изобретением сейсмографа и развитием сети сейсмометрических станций возникла необходимость в дифференциации силы землетрясений по сейсмограммам. С этой целью Ч.Рихтер [99, 187] предложил для характеристики землетрясений относительную величину, которую он назвал магнитудой. Ч.Рихтер анализировал сейсмограммы, полученные при землетрясениях в зоне разлома Сан-Андреас и прилегающих территориях. В это время в Южной Калифорнии уже функционировали несколько сейсмометрических станций. Все они были снабжены сейсмографами Вуда-Андерсена [134] с увеличением сигнала в 2800 раз. На рис.1.1 изображены кривые зависимости максимальной амплитуды сигнала

А от эпицентрального расстояния  $\Delta$ . Кривые проведены по данным ряда станций для двух землетрясений. Логарифмический масштаб выбран для удобства анализа данных, так как амплитуда сигнала на различных станциях от разных землетрясений отличается на несколько порядков. Из рисунка видно, что разность между двумя кривыми с изменением  $\Delta$  практически остается постоянной. Используя этот экспериментальный факт, Ч.Рихтер рассчитал кривую от воображаемого эталонного землетрясения. С этой целью он принял, что амплитуда эталонного землетрясения  $A_0$  при расстоянии  $\Delta=100$  км должна быть равна 0,001 мм. В этом случае для определения магнитуды землетрясения Ч.Рихтер предложил формулу [99, с. 316]:

$$M = \lg A - \lg A_0 \quad (1.1)$$

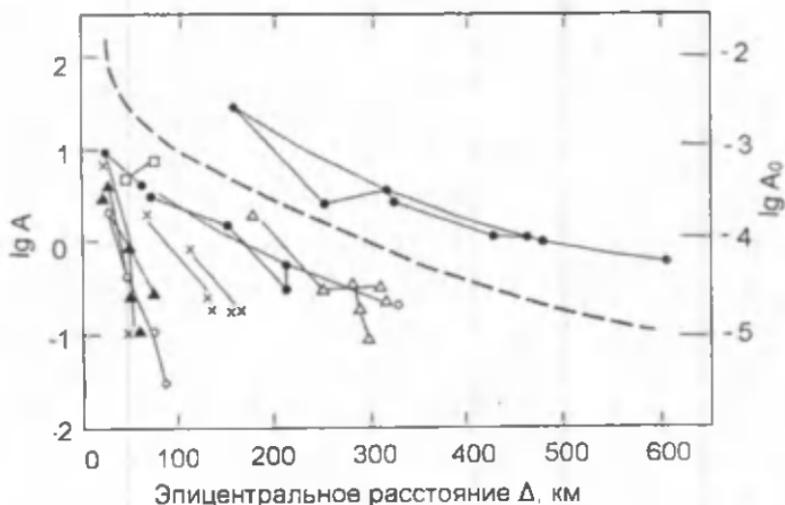


Рис.1.1. Зависимость амплитуды колебания грунта А (мм), определенной по сейсмограммам, от эпицентрального расстояния  $\Delta$  для местных землетрясений Южной Калифорнии по данным работы [99]. Штриховой линией показана рассчитанная зависимость амплитуды  $A_0$  воображаемого события стандартной величины от расстояния  $\Delta$ .

Из (1.1) следует, что магнитуда может принимать и отрицательные значения. Выбор Ч.Рихтером начальных условий привел к тому, что магнитуда  $M=0$  соответствует сигналу от эталонного землетрясения. Для амплитуды эталонного землетрясения Ч.Рихтер получил эмпирическое выражение

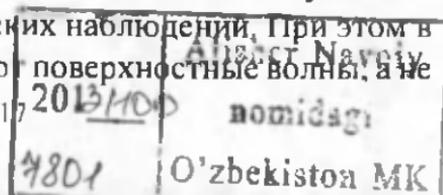
$$\lg A_0 = 6,37 - \lg \Delta . \quad (1.2)$$

Шкала магнитуд первоначально была использована для местных землетрясений в Калифорнии. Степень сотрясения почвы при землетрясениях зависит не только от его силы и эпицентрального расстояния, но и типа пород в месте расположения сейсмометра. Кроме того, формула (1.1) не учитывает различие в степени усиления сигнала тем или иным типом сейсмометра. Подставляя (1.2) в (1.1) и учитывая увеличение сигнала сейсмографа Вуда-Андерсена, получим

$$M = \lg a + 3 \lg \Delta - 2,92 , \quad (1.3)$$

где  $a$  - максимальная амплитуда колебания грунта выраженная в мкм, а  $\Delta$  - в км. Выражение (1.3) позволяет определить магнитуду при небольших расстояниях  $\Delta < 600$  км. Отметим, что при использовании (1.3) в каждом регионе вводят свои поправки, учитывающие геологические условия того или иного региона. В некоторых случаях свои поправки имеет даже отдельно взятая сейсмометрическая станция.

Во многих случаях информацию о мелкофокусных землетрясениях получают от станций, расположенных на эпицентрального расстоянии  $\Delta > 600$  км, т.е. путем так называемых телесеismicных наблюдений. При этом в сейсмограммах преобладают поверхностные волны, а не



объемные. Учитывая это, Б.Гуттенберг и Ч.Рихтер [156, 157] предложили эмпирическую формулу для определения магнитуды землетрясения по поверхностным волнам:

$$M_s = \lg a + \alpha \lg \Delta + \beta, \quad (1.4)$$

где  $a$  - максимальная амплитуда смещения грунта в горизонтальном направлении под воздействием поверхностных волн,  $\alpha$  и  $\beta$  - некоторые постоянные. Величины  $\alpha$  и  $\beta$  подбираются таким образом, чтобы для некоторых выбранных землетрясений магнитуды  $M$  и  $M_s$ , рассчитанные по формулам (1.3) и (1.4), совпадали. Для различных регионов величины  $\alpha$  и  $\beta$  могут несколько отличаться, но, тем не менее, можно для оценки  $M_s$  пользоваться значениями, найденными Б.Гуттенбергом [33]:  $\alpha=1,656$ ;  $\beta=1,818 + C$ ;  $C$  - константа.

В случае глубокофокусных землетрясений величину магнитуды можно определять только по объемным волнам, используя выражение, полученное Б.Гуттенбергом [155]:

$$m = \lg(a/T) + Q(h, \Delta), \quad (1.5)$$

где  $T$  - период волны;  $a$  - амплитуда колебания грунта под воздействием объемных волн, мкм;  $h$  - глубина залегания очага, км;  $\Delta$  - в км;  $Q(h, \Delta)$  - эмпирический коэффициент. Опытным путем было установлено соотношение [33]:

$$m = 2,5 + 0,63 M. \quad (1.6)$$

В настоящее время шкала магнитуд повсеместно используется для количественной характеристики землетрясений. Вышеприведенные формулы для расчета маг-

нитуды являются эмпирическими. Поэтому для каждого конкретного региона и даже станции в этих формулах могут вноситься свои поправочные коэффициенты. Несмотря на это, ошибка в определении магнитуды может достигать величины  $\pm 0,3$ . Отметим, что магнитуда хоть и характеризует силу землетрясения, но все же является величиной относительной.

### 1.3. ЭНЕРГИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Энергия, высвобождаемая при землетрясении, является конкретной физической величиной, которая характеризует силу землетрясения. Энергия землетрясения  $E_n$  расходуется на излучение сейсмических волн —  $E_c$ , на перемещение горных пород земной коры —  $E_k$ , на разрушение горных пород и на работу против сил трения —  $E_p$ :

$$E_n = E_c + E_k + E_p. \quad (1.7)$$

В литературе имеются несколько подходов к расчету сейсмической энергии  $E_c$ . Все они базируются на тех или иных предположениях, или содержат некоторые неопределенные параметры, что затрудняет получение репрезентативной информации. Так, еще в 1911 г. Б.Голицыным, основоположником российской сейсмологической службы, была выведена аналитическая формула для прямого расчета энергии  $E_c$ , которая подробно описана в литературе [например, 19; 100]. Формула Голицына содержит ряд неопределенных параметров, что препятствовало ее повсеместному использованию. В то же время расчеты и сопоставления, проведенные Б.Гуттенбергом и Ч.Рихтером [99, 156-158], получили со временем повсеместное применение, так как они предложили простое эмпирическое соотношение, связывающее энергию  $E_c$  и магнитуду землетрясения:

$$\lg E_c = 2,4 \cdot m - 1,2 . \quad (1.8)$$

Подставляя выражение (1.6) для  $m$  в (1.8), получим

$$\lg E_c = 4,8 + 1,6 M . \quad (1.9)$$

Отметим, что формулы (1.8) и (1.9) позволяют оценить порядок величины энергии  $E_c$  в джоулях. Связано это со следующими причинами. Во-первых, при выводе формул (1.8) и (1.9) авторами [156, 157] были сделаны ряд упрощающих предположений. Во-вторых, неопределенность в определении магнитуды, как отмечалось ранее, может составлять  $\pm 0,3$ . Этот фактор, как следует из (1.8) и (1.9), может приводить к определению величины  $E_c$  с точностью до порядка величины. Кроме того, энергия в отличие от магнитуды имеет размерность. Поэтому выражения типа (1.9), связывающие магнитуду и энергию землетрясений, являются чисто эмпирическими.

Энергию  $E_n$ , затрачиваемую на перемещение горных пород при толчке, можно рассчитать, если известна масса пород и расстояние, на которое они были перемещены. Рассчитать энергию  $E_p$ , затрачиваемую на разрушение горных пород и на работу против сил трения, вряд ли возможно. Можно принять, что  $E_n \gg E_p$ . Далее будет показано (гл. 5-6), что это допущение не лишено оснований.

#### **1.4. ОЧАГ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**

Очаг землетрясения до последнего времени был одним из самых загадочных понятий в сейсмологии. Р.Мале [171] представлял очаг в виде точки, в которой при землетрясении происходит нечто подобное взрыву. На сегодня можно считать твердо установленным, что

очаг имеет конечные размеры. Понятно, что огромная энергия, освобождаемая при землетрясении, вряд ли может быть сосредоточена в точке. Об этом говорит и различие в сейсмограммах, наблюденных при взрывах и землетрясениях. Тем не менее, понятие точечного очага используется при телесеизмических наблюдениях для установления эпицентра мелкофокусных землетрясений. В литературе существует ряд определений объема очага. Так, К.Касахара [46, с.26] с одной стороны определяет его как «пространственную область вокруг разлома, из которой эффективно освобождается энергия деформации. Масштабы этой области сравнимы с размерами разлома». С другой стороны, основываясь на эмпирических данных, автор [46, с.26] подчеркивает, что «чем больше магнитуда землетрясения, тем больше размер очага». Отметим, что большинство мелкофокусных землетрясений приурочены к разломам в земной коре. К примеру, в зоне разлома Сан-Андреас часто происходят землетрясения различной силы. Тогда, согласно К.Касахаре, все они должны иметь очаг, сравнимый с размерами разлома. Отсюда следует, что объемы очагов этих землетрясений должны иметь один порядок величины. В то же время, так как эти землетрясения имеют различную магнитуду, то и размеры очагов должны различаться. Таким образом, налицо явное противоречие между этими определениями. До недавнего времени не существовало однозначного способа оценки объема очага  $-\Delta V_0$ , не была также выведена аналитическая формула для его расчета.

Существуют несколько эмпирических формул, связывающих магнитуду с геометрическими размерами проявления землетрясения на поверхности. Одна из них основана на определении афтершоковой области - А. Область проявления эпицентров афтершоков называют

афтершоковой. Изучение афтершоков показало, что величина  $A$  заметно увеличивается с увеличением магнитуды. Базируясь на этом факте, в работе [198] предложена следующая эмпирическая зависимость:

$$\lg A = 1,02M + 6,0, \quad (1.10)$$

где  $A$  дано в  $\text{см}^2$ . Исследователи давно уже обратили внимание, что мелкофокусные землетрясения вызывают деформации на поверхности. Т. Дамбара полагая, что площадь деформированной поверхности  $A'$  можно аппроксимировать кругом радиуса  $r$ , предложил следующую эмпирическую формулу [140]:

$$\lg r = 0,51M + 2,73, \quad (1.11)$$

где  $r$  выражено в см. Тогда, согласно сделанному в работе [140] предположению, верно будет выражение

$$\lg A' = \lg \pi + 2 \lg r. \quad (1.12)$$

Подставляя (1.11) в (1.12), получим

$$\lg A' = 1,02M + 5,96. \quad (1.13)$$

Сравнивая (1.10) с (1.13), приходим к выводу, что  $A \approx A'$ . Отметим, что формулы (1.10) и (1.13) не имеют физического смысла. Связано это с тем, что безразмерная величина  $M$  выражается через размерные величины. Выражения, подобные (1.10) и (1.13), были предложены в ряде работ [например, 125, 196]. Комбинируя выражения (1.9) и (1.10), получим

$$E_c = p A^n, \quad (1.14)$$

где  $p$  и  $n$  – постоянные, причем  $n \approx 1,5$ . Далее (гл.5) будет показано, что магнитуда прямо связана с объемом очага и будет раскрыт физический смысл выражений типа (1.13). До последнего времени не было предложено аналитического выражения как для расчета объема очага, так и зависимости энергии землетрясения от него. Главной причиной такого положения была неопределенность понятия объема очага. Отметим мнение С.Цубои [197], согласно которому объем высвобождения деформации является основным фактором, определяющим количество выделенной сейсмической энергии, а значит, и магнитуду землетрясения.

### 1.5. СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОМЕНТ

Введение понятия «сейсмический момент» прямо связано с представлениями о силах, действующих в очаге, и о разломах, генерирующих землетрясения. Картина сейсмограмм, полученных при землетрясениях, позволила судить о силах, действующих в очаге. Этот вопрос более подробно будет изложен позднее (см. гл.2). Здесь же мы отметим, что имеющиеся представления позволили предположить о действии момента сил  $M_0$ , приложенных к очагу. Примем, что очаг расположен в зоне разлома. К.Аки [133] для разлома прямоугольной формы, вдоль которого в результате толчка происходит скольжение, связал среднюю дислокацию  $U$  (величину скольжения) с моментом  $M_0$ , используя следующее выражение:

$$M_0 = \mu U A_p, \quad (1.15)$$

где  $\mu$  – жесткость пород;  $A_p$  – площадь разлома. Для мелкофокусных землетрясений величину сейсмического момента определяют по данным сейсмограмм поверхностных волн [46, с. 106]. В этом случае, зная  $\mu$  и  $A_p$ , из

формулы (1.15) можно найти  $U$ . В некоторых случаях расчетное значение  $U$  согласовалось с данными эксперимента [133].

Рассмотрим физический смысл сейсмического момента. Размерность сейсмического момента совпадает с физическим. Физическим моментом силы относительно некоторой заданной точки называют векторное произведение действующей на твердое тело силы  $F$  на вектор  $r$ , проведенный из этой точки в точку приложения силы [119]:

$$M_T = r \times F. \quad (1.16)$$

В случае сейсмического момента за тело, естественно, принимаются горные породы в очаге. Однако неизвестно, относительно какой точки необходимо рассчитывать сейсмический момент. Неизвестно также, к какой точке в очаге приложена сила  $F$ . Главным же вопросом является правомочность использования понятия «сейсмический момент». Известно, что горные породы в земной коре могут быть в твердом, жидком или газообразном состояниях. В случае, если горные породы в очаге находятся в жидком или газообразном состоянии, понятие «сейсмический момент» теряет всякий смысл.

## ***1.6. СТАТИСТИКА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ***

Классификация землетрясений по магнитуде, глубине залегания очага, географии стала возможным с изобретением сейсмометра и развитием сети сейсмометрических станций. Имеющиеся станции наблюдения до сих пор расположены крайне неравномерно по поверхности Земли. С одной стороны, это связано с тем, что материки, где и располагаются станции, занимают около трети земной поверхности. С другой стороны, это связано как с неравномерностью развития сейсмометрической

службы в различных регионах, так и наличием густонаселенных и пустынных территорий. Наиболее успешно в первой половине XX века сейсмометрические исследования развивались в Калифорнии, США. Во многом усилиями Б. Гуттенберга и Ч. Рихтера [33, 99] стало развиваться новое направление в сейсмологии – статистика землетрясений. Анализируя множество калифорнийских землетрясений, они предложили следующую эмпирическую зависимость среднегодового количества толчков от магнитуды:

$$\lg N = a + b(8 - M), \quad (1.17)$$

где  $a = -0,48$ ,  $b = 0,9$  при  $M \geq 6$ . Выяснилось, что выражение (1.17) хорошо отражает статистику землетрясений и в других регионах. Для землетрясений с магнитудой, лежащей в том или ином диапазоне значений, величина  $a$  несколько варьируется, в то время как значение величины  $b$  практически не меняется. Из (1.17) следует, что количество землетрясений  $N$  с уменьшением  $M$  возрастает в восемь раз и наоборот. Нужно отметить, что соотношение (1.17) является статистически значимым. Поэтому расчетное количество землетрясений за тот или иной период времени может несколько отличаться от действительного. Используя выражения (1.9) и (1.17), можно подсчитать среднее количество энергии, которое выделяется от землетрясений с заданной магнитудой  $-NE$ . Анализ показал, что 93% от общего количества энергии всех землетрясений высвобождается при толчках с  $M \geq 7$  [46, 99]. Землетрясения условно подразделяются на мелкофокусные с глубиной залегания гипоцентра  $h$  до 60–70 км, промежуточные с  $h$  до 200 км и глубокие с  $h$  до 700 км. В некоторых случаях землетрясения подразделяют на мелкофокусные и глубокофокусные, куда относят и промежуточные. Да-

лее мы будем придерживаться последней классификации. Наиболее катастрофическими являются мелкофокусные землетрясения. Это связано как с близостью их гипоцентров к поверхности Земли, так и с тем, что они происходят в густонаселенных районах. Можно считать, что мелкофокусные землетрясения происходят в земной коре вплоть до границы Мохоровича и поэтому иногда их называют коровыми.

Статистические исследования позволили получить качественно новую информацию о землетрясениях и развить ряд направлений в сейсмологии. Действительно, соотношения (1.8) и (1.9), связывающие магнитуду и энергию, были получены благодаря статистическим данным. Само понятие магнитуды и затем ее широкое использование стало возможным благодаря накоплению большого статистического материала. Статистические данные позволили в прошлом в СССР, а теперь в странах СНГ провести сейсмическое районирование территорий. В настоящее время статистика также широко используется для подсчета того или иного сейсмического риска [например, 13, 101]. Часто статистическая информация используется для долгосрочного прогноза землетрясений. Анализ большого количества сейсмометрической информации позволил получить важную информацию о процессах, происходящих в очаге землетрясений. Информация о возбужденных землетрясениях также была получена в результате сбора большого статистического материала. Более подробно речь об этом пойдет в следующих главах.

## ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРИРОДЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

### 2.1. ТЕОРИЯ УПРУГОЙ ОТДАЧИ

Теория упругой отдачи была предложена Х.Рейдом [185, 186] для объяснения механизма землетрясения 1906 г., эпицентр которого находился недалеко от г. Сан-Франциско, США. Данное землетрясение произошло в зоне разлома Сан-Андреас и проявилось в виде субгоризонтального смещения земной коры вдоль разлома на протяжении более 400 км. Так как зарождение современной сейсмологии во многом связано с сейсмометрическими наблюдениями в Калифорнии, необходимо остановиться на описании разлома Сан-Андреас. В среднем каждые 5 лет в зоне разлома происходит одно крупное землетрясение. В результате периодических событий подвижки по разлому накапливались, что привело к значительному правостороннему смещению западного блока на север относительно восточного. Разлом простирается на 1100 км от Калифорнийского залива к северу вплоть до Пойнт-Арена. Величина правостороннего сдвига за последние несколько миллионов лет составила более нескольких сотен километров. Причем аккумулярование подвижек во времени происходило крайне неравномерно [147]. В промежутке времени от 80 до 60 млн лет назад происходило аккумулярование сдвига по разлому. Затем в промежутке от 60 до 20 млн лет заметных движений по разлому не было. Последние 20 млн лет наблюдается вновь правосторонний сдвиг со скоростью 2см/год. Гипоцентры произошедших землетрясений сконцентрированы вдоль линии разлома на глубине 15÷18 км.

В настоящее время считается, что землетрясения в зоне разлома Сан-Андреас вызваны тектоническими силами. Тектонические напряжения появляются в результате движения тектонических плит относительно друг друга. Считается, что правостороннее смещение вызвано скольжением части приокеанской плиты в северо-западном направлении относительно североамериканской плиты.

**Теория упругой отдачи состоит из следующих положений:**

1. Землетрясения вызываются разрушением горных пород в результате упругих деформаций, обусловленных относительным смещением прилегающих друг к другу участков земной коры.

2. Эти относительные смещения, вызывающие упругую деформацию, возникают постепенно в течение достаточно долгого промежутка времени.

3. Внезапное движение горных пород во время землетрясения есть упругая отдача берегов разлома к положению, в котором упругие деформации отсутствуют.

4. Сейсмические волны первоначально возникают на относительно небольшом участке, затем площадь поверхности, с которой излучаются волны, растёт, но со скоростью, не превосходящей скорость распространения сейсмических волн.

5. Энергия, которая освобождается при землетрясении, была ранее запасена в виде энергии деформации горных пород.

Несмотря на то, что теория Рейда носит декларативный характер и не объясняет механизм землетрясения, она сыграла заметную роль в развитии сейсмологической науки, и отдельные ее положения не утратили своего значения до сих пор. Теория упругой отдачи встречает непреодолимые препятствия при объяснении ряда землетрясений типа Газлийских 1976 и 1984 гг., которые характеризуются преимущественно вертикальными смещениями горных пород в эпицентральной области. Эпицентры указанных землетрясений находятся

практически прямо над гипоцентрами. Каким образом субгоризонтально направленные тектонические силы вызывают преимущественно вертикальные подвижки при таких землетрясениях, непонятно. Теория упругой отдачи этот факт объяснить не может. Дальнейшее развитие теории землетрясений во многом было обязано получению качественно новой информации, которая кратко изложена ниже.

## 2.2. ДИЛАТАНСИОННЫЕ МОДЕЛИ

В 1960-х годах наблюдениями в районе Гарма (Таджикистан) было установлено изменение отношения скоростей продольных и поперечных волн  $v_p/v_s$  в очаговой области землетрясения: за несколько месяцев до толчка это отношение уменьшилось и непосредственно перед событием вновь восстанавливалось по величине [49, 103]. Исследования проведенные американскими сейсмологами в районе Голубого горного озера [131], подтвердили эти результаты. Лабораторными экспериментами [например, 27, 62, 117, 118, 138, 178] было установлено, что при приложении к горным породам сжимающего давления у них наблюдается эффект дилатансии, т.е. увеличивается объем. Для объяснения изменения отношения  $v_p/v_s$  А.Нур [180] выдвинул следующее предположение. Под действием тектонических напряжений горные породы в очаге испытывают эффект дилатансии, что выражается в образовании у них многочисленных трещин. В связи с этим отношение  $v_p/v_s$  уменьшается. Затем трещины заполняются водой, что и приводит к восстановлению отношения  $v_p/v_s$  перед толчком. В работе [190] предположение А.Нура было дополнено, и ныне данные представления именуется фильтрационно-дилатансионной моделью.

Несколько позднее была предложена модель лавинно-неустойчивого трещинообразования, которую еще именуют «сухой» дилатансионной моделью [65]. Эта модель, как и предыдущая, предполагает образова-

ние трещин в горных породах очаговой области и, как следствие, изменение отношения  $v/v_s$ . Восстановление же отношения  $v/v_s$  авторы [65, 177] связывают со следующими причинами. Предположим, что в области очага тектонические напряжения достигают предела упругости горных пород. В этом случае последние могут деформироваться пластически, что приведет к «залечиванию» трещин и восстановлению отношения скоростей  $v/v_s$ .

Дилатансионные модели явились шагом вперед в понимании процесса подготовки землетрясения. Стало ясно, что горные породы в будущем очаге под действием тектонических напряжений растрескиваются, т.е. испытывают эффект дилатансии. Увеличение количества трещин в очаге может происходить в течение достаточно длительного времени (месяцы и годы). В дальнейшем мелкие трещины могут сливаться, образуя магистральную трещину. Образование магистральной трещины ведет затем к землетрясению. Однако четкой физической картины образования землетрясений дилатансионные модели не дают.

Дилатансионно-фильтрационная модель затрудняется дать однозначный ответ на вопрос о наличии свободной воды на больших глубинах. Известно, что вода, содержащаяся в горных породах, бывает гравитационная, капиллярная, связанная, кристаллизационная и пр. [53]. При изменении физико-химических условий часть связанной и кристаллизационной воды может превратиться в гравитационную или капиллярную. Наличие воды на значительных глубинах было обнаружено и при бурении сверхглубоких скважин. Поэтому можно считать, что до глубин 20÷30 км в горных породах может находиться гравитационная или капиллярная вода. О возможности наличия воды на таких глубинах говорит и существование в земной коре большого количества глубинных разломов. Неоспоримым фактом является приуроченность большинства мелкофокусных землетрясений к активным разломам. Поэтому можно считать, что для таких землетрясений выполняются требования модели [180,

190]. Что же касается средне- и глубокофокусных землетрясений, то здесь позиции «сухой» дилатансионной модели кажутся более предпочтительными по сравнению с фильтрационной. На больших глубинах вероятность существования давлений, при которых возможна пластическая деформация горных пород, велика. В то же время условия, необходимые для работы «сухой» модели [65], вряд ли выполняются при мелкофокусных землетрясениях. Забегая вперед, отметим, что характер регистрируемых сейсмических волн свидетельствует о том, что процессы, происходящие в очагах как мелкофокусных, так и средне- и глубокофокусных землетрясений, идентичны. Тем не менее, обе модели сходятся в том, что землетрясению предшествует процесс трещинообразования. Множественные лабораторные эксперименты показали, что при достижении критических напряжений в горных породах происходит образование многочисленных трещин [например, 27, 62, 117, 118, 124, 178]. Поэтому любая теоретическая модель, претендующая на объяснение физики образования тектонических землетрясений, должна включать в себя процесс трещинообразования как один из этапов подготовки будущего события.

### ***2.3. ОСОБЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ И МЕХАНИЗМ ОЧАГА***

Около ста лет назад японским профессором Сидо из университета г. Киото была обнаружена важная особенность первых вступлений продольных Р-волн при землетрясениях [46, с. 37]. В это время на сравнительно небольшой территории Японии уже было расположено множество сейсмометрических станций. Примем полярность вступления Р-волны положительной, если смещение грунта направлено к эпицентру, т.е. соответствует расширению и отрицательной в противоположном случае. Сущность открытия состоит в том, что станции, зафиксировавшие положительные и отрицательные

первые вступления Р-волн, были расположены вокруг эпицентра в определенном порядке. В первом приближении для мелкофокусных землетрясений можно принять, что станции расположены в ближней зоне на плоскости. В этом случае станции, фиксирующие положительные смещения Р-волн, будут отделены от станций, фиксирующих отрицательные смещения прямыми линиями, пересекающимися в эпицентре. Как правило, эти линии, которые принято называть нодальными, перпендикулярны друг другу. В качестве примера на рис. 2.1 показаны нодальные линии землетрясения 21.09.1931 г. в Японии.

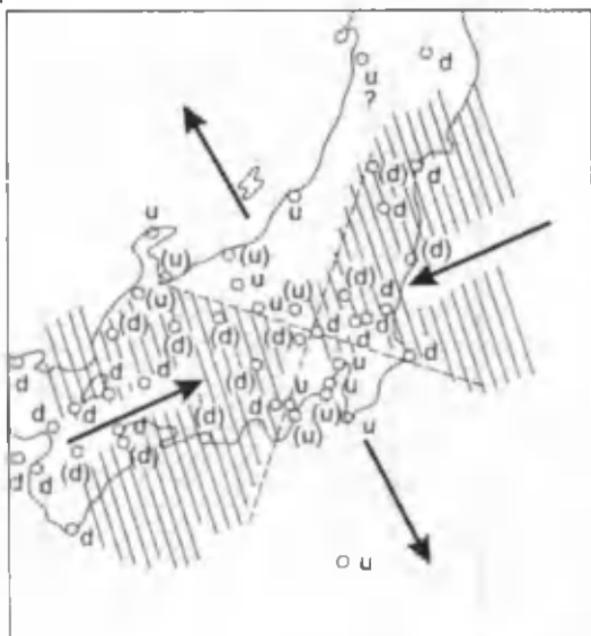


Рис. 2.1. Распределение начальных сжатий (u) и разряжений (d) землетрясения 21.09. 1931 г. в Японии по данным многочисленных станций (o), расположенных вокруг эпицентра [99, с. 284].

Отметим, что подобная картина типична для мелкофокусных землетрясений, сопровождающихся смещениями типа сдвига. Из вышеизложенного можно прийти к выводу, что в очаге в момент толчка должны действовать две пары сил, равных по величине и противополож-

но направленных. Забегая вперед, скажем, что характер излучения сейсмических волн, полученных в различных регионах при всех изученных землетрясениях, однозначно свидетельствует о действии в очаге двух пар сил, т.е. сил двух диполей.

Рассмотрим более подробно возможные варианты действия сил в очаге (рис.2.2). Варианты *а* и *б* показывают действие двух сил, приложенных к очагу конечных размеров. В варианте *б* пара сил обладает крутящим моментом. Варианты *в* и *г* относятся к действию в очаге двух пар сил (одна сжимающая, а другая растягивающая), равных по величине и противоположно направленных. В варианте *г* пара сил обладает также крутящим моментом. Теория излучения упругих волн точечным источником подробно изложена в литературе [например, 12]. Эта теория подтверждает упорядоченность первых вступлений Р-волн для источника, на который воздействуют силы, изображенные на рис.2.2.

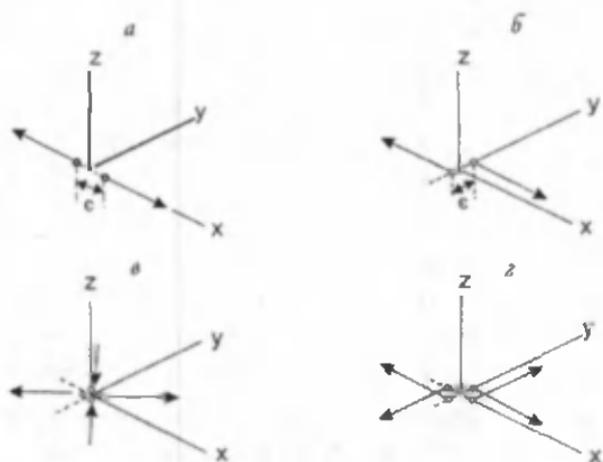


Рис. 2.2. Схема действия некоторых типов сил в точечном источнике: *а* — пара сил равных по величине и противоположно направленных; *б* — пара сил, как и в варианте *а*, но обладающая моментом относительно оси *z*; *в* — две пары сил (одна сжимающая, а другая растягивающая), равные по величине и действующие вдоль прямых перпендикулярных друг другу; *г* — две пары сил, как и в варианте *в*, но обладающие моментом относительно оси *z*.

Во многих случаях в ближней зоне от очага землетрясения располагается небольшое количество станций. Для таких случаев был предложен графический метод использования данных удаленных станций [139]. Суть предложения заключается в следующем. Поверхность Земли близка к поверхности сферы. Поэтому данные удаленных станций проецируются на плоскость и далее сравнивают экспериментальные данные с теоретическими нодальными линиями. Очаг представляют в виде сферы. Затем для каждой станции определяют эпицентральное расстояние и угол выхода сейсмического луча из очага. В итоге сферический очаг разделяется парой ортогональных плоскостей на четыре зоны, в каждой из которых должен наблюдаться определенный знак вступления Р-волн (растяжение или сжатие). На практике ранее использовался графический метод обработки данных, который подробно изложен в литературе [например, 22, 23]. В конечном итоге получают две ортогональные плоскости, которые называют нодальными или фокальными плоскостями. Одну из них связывают с плоскостью простираения разлома, а другую считают вспомогательной. Для того чтобы выяснить, какая из плоскостей является разломной, используют вспомогательные данные, которыми могут быть область проявления афтершоков или геологическая информация. Пересечение найденных плоскостей с поверхностью сферы определяет положение нодальных линий. На рис. 2.3 показаны типичные картины, которые получаются при подобных построениях для трех простых случаев смещения: *a* — сдвиг в вертикальной плоскости, *b* и *в* — взброс и сброс, соответственно, в плоскости под углом  $45^\circ$ . На практике чаще встречается смешанный вариант, т.е. сочетание вариантов *a* и *b* или *a* и *в*. Преобладающий тип смещения в таких случаях легко определить, исследуя вступления Р-волн в центральной области диаграммы. Часто найденное указанным способом положение нодальных линий (плоскостей) называют механизмом

очага. В качестве примера на рис. 2.4 показан механизм очага Бричмуллинского землетрясения 24.10.1959 г. с магнитудой  $M \approx 5$  и гипоцентром  $h \approx 14$  км. Очаг данного землетрясения располагался близ пересечения двух тектонических разломов палеозойского фундамента на расстоянии около 100 км от г. Ташкента [109, с. 400]. Видно, что в результате толчка преобладающим типом подвижки был сдвиг. Отметим, что в настоящее время обработка сейсмограмм и построение нодальных плоскостей решается с помощью компьютерных программ.

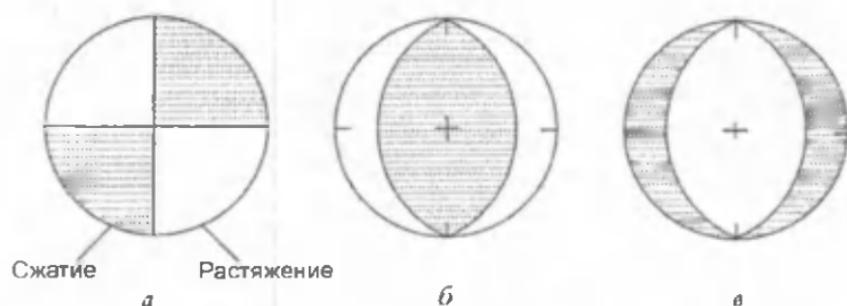


Рис. 2.3. Механизм очага для трех простых случаев смещения пород по плоскости разлома: а - сдвиг в вертикальной плоскости; б и в - взброс и сброс, соответственно, в плоскости под углом  $45^\circ$  [46, с. 53].

Анализ лишь первых вступлений Р-волн не позволил однозначно решить проблему механизма очага. Здесь под механизмом очага понимается его физический смысл: характер сил, действующих в очаге в момент толчка. Дело в том, что картина излучения, получаемая по Р-волнам равнозначна как для пары сил, так и двух пар сил, приложенных к очагу в виде точечного источника. Для однозначного определения механизма очага изучалась картина излучения поверхностных и S-волн. Проведенный анализ показал [например, 46, 132], что картина излучения волн соответствует действию двух ортогональных пар сил в очаге. Согласно теории Х.Рейда [185, 186], в очаге должна действовать всего одна пара противоположно направленных друг другу сил. Тем не менее, точка зрения, базирующаяся на теории упругой



## **2.4. ДИСЛОКАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ В СЕЙСМОЛОГИИ. ВЫВОДЫ**

Понятие «дислокация» было заимствовано сейсмологами из кристаллофизики. Физическая дислокация в кристаллах означает наличие в кристаллической решетке некоторой разупорядоченности, что выражается в сдвиге решетки на дискретную величину, кратную постоянной решетки. Другими словами, можно говорить о наличии в кристалле некоторой дискретной трещины. В окрестности этой трещины возникают деформации даже при отсутствии воздействия на кристалл внешних сил. Такую же величину деформации можно получить при воздействии внешних сил на кристалл, у которого отсутствуют дислокации. В литературе имеется строгое математическое доказательство теоремы об эквивалентности сил и дислокаций [52]. В качестве трещины в сейсмологии рассматривается разлом, у которого происходят подвижки в результате землетрясений. Таким образом, сейсмической дислокацией является разлом в земной коре, генерирующий землетрясения.

В области разлома существует деформация, образование которой можно представить в виде действия пары внешних сил. В этом случае смещение по разлому можно рассматривать, с одной стороны, как результат действия этой пары сил. С другой стороны, для математического описания этого смещения можно использовать уравнения, полученные для поля смещения дислокаций в кристалле. Сейсмическая дислокация сильно отличается от физической по масштабу и является непрерывной. Описанные в литературе [12, 22, 46, 146, 184] те или иные дислокационные модели являются, по сути, чисто математическими и решают задачу смещения по разлому путем задания тех или иных начальных

и граничных условий. Во всех моделях без исключения принимается, что сейсмическая дислокация находится в однородной среде. В действительности же это далеко не так. Кроме того, в макроскопическом масштабе горные породы в лучшем случае представляют собой комбинацию поликристаллических минералов. В земной коре горные породы могут быть как кристаллическими, так и аморфными и находиться в твердом, жидком и газообразном состоянии.

Завершая данную главу, можно сделать следующие выводы. Теория упругой отдачи, в принципе, неплохо объясняет периодические подвижки в зонах разлома подобных мегаразлому Сан-Андреас: в течение достаточно длительного времени в земной коре накапливаются напряжения (деформации), которые затем в результате упругой отдачи приводят к землетрясениям. Перед землетрясением в результате эффекта дилатансии горные породы в очаге будущего землетрясения растрескиваются с образованием большого количества трещин. Это утверждение подтверждается многочисленными лабораторными экспериментами. Согласно фильтрационно-дилатансионной модели, трещины затем заполняются жидкостью (поровой водой), что приводит к падению прочности пород в очаге. Подавляющее количество мелкофокусных землетрясений происходит по разломам. Разлом как бы генерирует землетрясения. В связи с этим были предложены различные дислокационные модели, которые позволяют при тех или иных допущениях рассчитать величину подвижки по исследуемому разлому. Несмотря на перечисленные выше достижения, сейсмологи до последнего времени не могли однозначно ответить на ряд вопросов, среди которых можно выделить следующие.

1. Почему картина первых вступлений упругих волн является подобной как для мелкофокусных, так и глубокофокусных землетрясений?

2. Почему подавляющее большинство мелкофокусных землетрясений происходит в разломах?

3. Почему одни разломы генерируют землетрясения, а другие нет?

4. Чем вызваны так называемые возбужденные землетрясения, и в чем их отличие от естественных?

До последнего времени не было и однозначного ответа на вопрос о происхождении тектонических сил, вызывающих землетрясения. В литературе описано множество гипотез и моделей тектогенеза. Наиболее популярные из них кратко описаны в следующей главе.

## **СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРОИСХОЖДЕНИИ ТЕКТОНИЧЕСКИХ СИЛ**

Вопрос о происхождении тектонических сил прямо связан с вопросом о причинах тектогенеза. С незапамятных времен люди задумывались о причинах возникновения гор и океанов. За прошедшее время было предложено множество тектонических гипотез, многие из которых в настоящее время представляют лишь исторический интерес [79]. Среди тектонических гипотез необходимо выделить контракционную, ротационную и теорию геосинклиналей. За последние 100 лет, во многом благодаря стремительному развитию науки и техники, получен ряд фактических данных, объяснить которые большинство тектонических гипотез были не в состоянии. Наиболее значимые из них и необходимые нам в дальнейшем кратко изложены ниже.

### ***3.1. КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ВНУТРЕННЕМ СТРОЕНИИ ЗЕМЛИ***

Информация о внутреннем строении Земли была получена в основном геофизическими методами. Связано это с тем, что к настоящему времени пробурены всего две скважины глубиной около 15 км. Львиная доля информации о внутренних оболочках Земли была получена путем проведения сейсмометрических наблюдений. Градация строения Земли на ряд оболочек и определение границ их раздела производилась на основании скачкообразного изменения скорости распространения сейсмических волн с глубиной [38, 108]. Так была определена и граница Мохоровича, разделяющая земную

кору от магии. Мощность земной коры в континентальных областях составляет в среднем  $30\div 35$  км, достигая  $60\div 70$  км под молодыми горами. В океанических областях мощность коры в среднем составляет  $8\div 10$  км. В свою очередь земную кору подразделяют на три слоя: осадочный, гранитный и базальтовый. Часто границу раздела гранитного и базальтового слоев называют поверхностью Конрада. Скорость распространения сейсмических волн возрастает от осадочных пород ( $1,8\div 5,0$  км/с) к гранитным ( $5,0\div 6,2$  км/с) и далее к базальтовым ( $6,2\div 7,6$  км/с).

За коровой оболочкой следует мантийная. Мантия простирается вплоть до глубин 2900 км и, в свою очередь, подразделяется на три подоболочки: *B*, *C* и *D*. Мантийная подоболочка *B* или верхняя мантия залегает до глубин 400 км. Граница раздела подоболочек *C* и *D* лежит на глубине, близкой к 1000 км. Подразделение мантии на подоболочки является во многом условным и вызвано характером изменения градиента скорости сейсмических волн с глубиной. Обращает на себя внимание зона пониженных скоростей сейсмических волн на глубинах  $100\div 250$  км (рис. 3.1). Есть основания считать, что этот факт связан с состоянием вещества, близким к плавлению. В связи с этим слой верхней мантии, залегающей на глубинах  $100\div 250$  км, выделяют и называют астеносферой. По оценкам [181], вязкость астеносферы составляет  $\sim 10^{21}$  пуаз, что на несколько порядков ниже, чем у пород нижней мантии.

Следующее за мантией оболочкой является внешнее ядро Земли. Сквозь внешнее ядро не проходят поперечные волны, и поэтому считается, что оно находится в жидком состоянии. Полагают также наличие внутреннего ядра, которое находится в твердом состоянии. Основанием для этого считается 10%-ное увеличение

скорости  $v_p$  в переходной зоне от внешнего ядра к предполагаемому внутреннему [169].

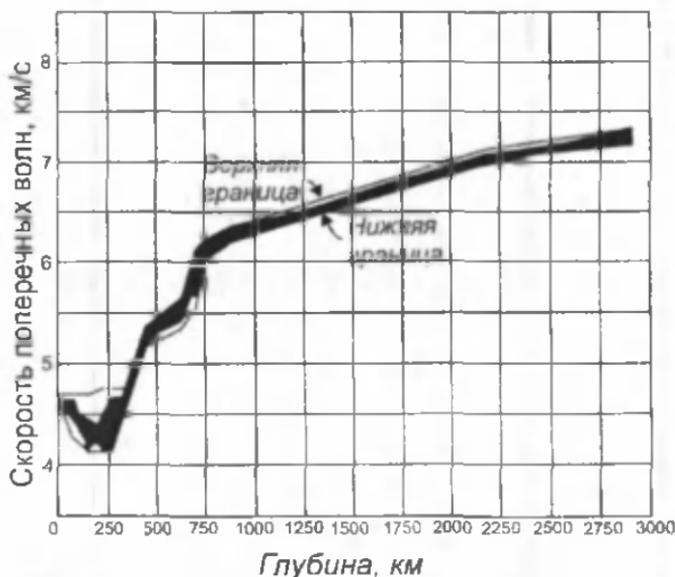


Рис.3.1. Распределение скорости поперечных волн внутри мантии под океанами [54].

О плотности и химическом составе вещества земной коры и верхней мантии судят по прямым измерениям плотности различных по химическому составу пород и сопоставлениями с плотностями метеоритов. Информация о плотностях пород более глубоких оболочек была получена путем расчетов, в основу которых были положены теоретические модели. Так, согласно К.Буллену [18], плотность ядра увеличивается к его центру и лежит в пределах  $10\div 13$  г/см<sup>3</sup>. Плотность пород мантии составляет  $3,6\div 5,7$  г/см<sup>3</sup>, плавно увеличиваясь до границы с ядром. Резкое изменение плотности происходит на границе мантия-ядро. Связывают это с тем, что в состав ядра входит железо с примесью никеля. Преобладающими химическими элементами земной коры являются Si и Al. В связи с этим эту оболочку часто называют «сиа-

левой». В мантии основными элементами являются Si и Mg, и поэтому ее еще называют оболочкой «сима». Дискуссия по вопросу о физических и химических параметрах оболочек Земли продолжается до сих пор.

### 3.2. ГИПОТЕЗА ИЗОСТАЗИИ

Можно считать, что Земля состоит из внутренних эллипсоидальных оболочек, близких к сфероидальным, в каждой из которых состав пород близок к однородному. Внешняя же оболочка Земли – земная кора – заметно различается как от идеальной формы, так и от однородности состава. В этом случае, исходя из закона всемирного тяготения, можно было бы ожидать, что величины напряженности поля силы тяжести  $g$ , измеренные в различных точках земной поверхности и лежащие на одной параллели, будут заметно отличаться друг от друга. Однако гравиметрические наблюдения показали, что это далеко не так. Для объяснения этого факта приведем следующие соображения. Предположим, что под земной корой находится подобоочка в жидком состоянии. Допустим также, что земная кора состоит из отдельных блоков. В этом случае более легкие породы земной коры будут как бы плавать на поверхности более тяжелой жидкости, подобно айсбергам, плавающим в океане. Каждый отдельный блок земной коры будет погружаться на свою глубину во внутреннюю жидкую подобоочку. Глубина этого погружения  $h_2$  будет функцией высоты блока  $h_1$ , а также плотностей  $\rho_1$  и  $\rho_2$  блока и жидкой фазы, соответственно. Согласно закону Архимеда должно быть справедливым тождество

$$Sh_1\rho_1 = Sh_2\rho_2, \quad (3.1)$$

где  $S$  – есть площадь сечения блока перпендикулярная силе тяжести. Из (3.1) определяем  $h_2$ :

$$h_2 = h_1 \rho_1 / \rho_2 . \quad (3.2)$$

Тогда величина возвышения блока  $\Delta h$  над урвонной поверхностью жидкой фазы составит

$$\Delta h = h_1 (1 - \rho_1 / \rho_2) . \quad (3.3)$$

Из (3.3) следует, что чем больше  $h_1$  и меньше отношение  $\rho_1 / \rho_2$ , тем больше  $\Delta h$ . Таким образом, отсутствие ожидаемых аномалий силы тяжести у гор можно объяснить малой плотностью пород, слагающих горноскладчатые образования, по сравнению с плотностью пород земной коры в платформенных областях. Приведенные выше рассуждения составляют основу гипотезы изостазии, предложенной еще в конце XIX века [56]. Поэтому возникает естественный вопрос: может ли слой горных пород, через который проходят поперечные сейсмические волны, вести себя как жидкое тело? Для ответа на этот вопрос необходимо знать характер поведения твердых упругих тел под действием нагрузки в течение достаточно большого интервала времени. Эксперименты с различными твердыми упругими телами показали, что с течением времени они начинают проявлять пластические свойства. Поэтому твердые кристаллические породы под длительным действием нагрузки могут прогибаться. В то же время пластические твердые тела ведут себя как загустевшие жидкости. Иными словами, четкой границы между реальным твердым телом и вязкой жидкостью провести нельзя. Реальные твердые тела ведут себя как идеальное твердое тело в течение короткого времени и проявляют свойства жидкого тела при длительном воздействии (тысячи и миллионы лет). Отсюда следует, что изостатическое равновесие достигается в случае, когда величины нагрузок, действующие

со стороны блоков земной коры на подстилающий их слой, сохраняются неизменными в течение длительного времени. В качестве слоя земной коры, проявляющего с течением времени свойства жидкого тела, может выступать астеносфера. Астеносфера обладает наиболее низкой вязкостью из всех подболочек мантии. Земную кору и часть верхней мантии, залегающей над астеносферой, называют литосферой. Примем, что литосфера разбита на отдельные плиты и блоки. Эти плиты и блоки со временем погружаются в астеносферу, в результате чего и достигается изостатическое равновесие.

Концепция изостазии позволила объяснить опускание и поднятие отдельных блоков земной коры. Действительно, допустим, что в течение длительного времени на поверхности какого-либо блока происходит отложение обломочного материала. Естественно, что это приведет к увеличению веса этого блока. Тогда в силу закона Архимеда этот блок погрузится глубже в астеносферу, что и вызовет видимое опускание этого блока на поверхности Земли. В случае, когда какой-то блок в результате различных геологических процессов (например, денудации) теряет вес, происходит обратное, т.е. наблюдается видимое на поверхности вздымание блока. Концепция изостазии связана с теорией тектоники литосферных плит [68], основные положения которой кратко описаны ниже.

### ***3.3. КОНЦЕПЦИЯ ТЕКТОНИКИ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ***

Фундаментом концепции тектоники литосферных плит (Новой глобальной тектоники) явилась гипотеза дрейфа континентов. Сходство западных и восточных берегов Атлантического океана бросается в глаза даже непосвященному человеку. Можно предположить, что

Атлантический океан образовался путем расширения гигантской трещины в некогда едином проконтиненте и последующего дрейфа материков. Эта гипотеза была предложена и научно обоснована немецким ученым А.Вегенером [21]. Он не только отметил сходство берегов различных частей света, но и для доказательства этого привел имеющиеся в то время геологические данные. Необходимо отметить, что в начале XX века объем фактических данных, которые мог использовать А.Вегенер, был явно недостаточен. Возможно, поэтому в работе [21] имеются ряд неточностей. Гипотеза дрейфа континентов подверглась критике, которая во многом была справедливой.

Полученные позже данные палеомагнитных исследований [например, 123] показали справедливость идеи дрейфа континентов. «Второе рождение» идея дрейфа континентов получила в начале 60-х годов XX века. Усилиями Г.Хесса и Р.Дица была предложена и обоснована идея о спрединге (раздвигании) океанического дна [68, 143, 161]. Ф.Вайн и Д.Метьюз [68, 200] обнаружили симметрично расположенные относительно срединного океанического хребта полосовые магнитные аномалии с чередующейся полярностью. В дальнейшем Дж.Уилсон [68, 201] обосновал понятие трансформных разломов, Дж.Оливер и Б.Айзекс [68, 165] выдвинули идею мобильной литосферы, а В.Морган [68, 179] и Ле Пишон [54, 68, 168], разделив всю литосферу на ряд плит, проанализировали их движение и положение в различные эпохи. Вскоре перечисленные выше идеи легли в основу концепции Новой глобальной тектоники или Тектоники литосферных плит. В 60÷70-е годы XX века было опубликовано несколько сот работ, посвященных новому направлению тектогенеза, многие из которых упомянуты в специальных монографиях [например, 54]. Основную суть концепции иллюстрирует рис. 3.2, на котором выде-

лены три полого залегающих слоя: литосфера, астеносфера и мезосфера (средняя мантия). Близ центра рисунка происходит спрединг океанического дна, что приводит к образованию новых плит. В правой части диаграммы показана океаническая плита литосферы, которая взаимодействует с континентальной и утапливается под ней (зона субдукции). В левой части диаграммы показано взаимодействие плит литосферы у островных дуг, где наблюдается субдукция в двух различных направлениях. В центральной части рис. 3.2 показано, что гребень хребта имеет разрывы. По мере разрастания хребтов и спрединга может возникнуть скольжение плит вдоль их простирания с образованием разлома, который получил название трансформного. Примечательно, что довольно простая блок-схема иллюстрирует основные моменты взаимодействия плит, которое имеет место в одной из частей Тихого океана, включающего острова Новые Гебриды, Фиджи, Тонга, Восточно-Тихоокеанское поднятие и западную часть Южной Америки.

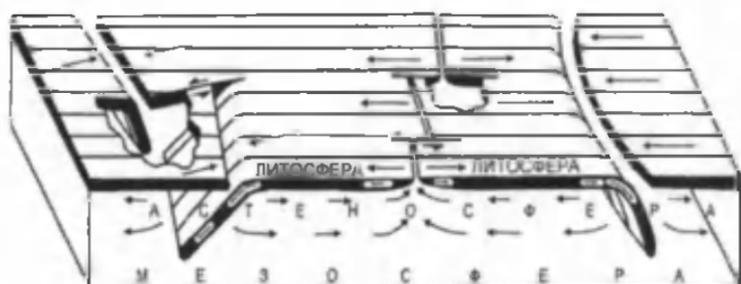


Рис. 3.2. Блок-схема, показывающая взаимное расположение и роль литосферы, астеносферы и мезосферы, согласно концепции тектоники литосферных плит [68, 165]. Стрелки на литосфере показывают перемещения относительно друг друга отдельных ее блоков, а на астеносфере - возможный конвекционный поток, вызванный погружением в нее отдельных частей литосферы. В левой части рисунка изображен островодужный трансформный разлом между двумя зонами субдукции, направленными в противоположные стороны. В центре находятся два рифтовых трансформных разлома, пересекающих срединно-океанический хребет. Справа показана простая дуговая система.

Данные сейсмологических исследований хорошо согласуются с концепцией мобилизма. Концентрация землетрясений в узких, протяженных по всему земному шару зонах подтверждает вывод концепции о наличии ряда литосферных плит, взаимодействующих друг с другом. Глубокофокусные землетрясения, происходящие у островных дуг, хорошо согласуются с представлениями о погружении у дуг океанической плиты в мезосферу (рис.3.2). Одним из следствий теории мобилизма (тектоники литосферных плит) является вывод о том, что зоны сочленения (взаимодействия) континентов и океанов являются основными участками горообразования.

Новая глобальная тектоника дала возможность объяснить ряд данных сейсмологии, магнитометрии, морской геологии, геохимии, гравиметрии и пр. с единых теоретических представлений. Несмотря на достигнутые успехи, новая концепция тектогенеза подверглась критике со стороны оппонентов, на ряд серьезных доводов которых она ответить в то время не могла. Основным из них является вопрос о причинах движения литосферных плит. А.Вегенер выдвинул несколько гипотез дрейфа континентов, одна из которых связана с предположением о тепловой конвекции в мантии [21]. Позже идею о тепловой конвекции в мантии развивал А.Холмс [121]. В дальнейшем многие исследователи использовали теорию А.Холмса для объяснения движения литосферных плит. На первый взгляд кажется, что тепловая конвекция в мантии неплохо объясняет образование срединно-океанических хребтов, трансформных разломов, новых плит, а значит, и их кинематику. Однако, если посмотреть на проблему поглубже, то обнаружится, что тепловая конвекция в мантии не в состоянии ответить на ряд вопросов, которые вынуждены признать даже сторонники мобилизма [например, 111].

Кроме того, как справедливо отмечают ряд исследователей [например, 110], всякая заслуживающая доверия теория тектогенеза должна отвечать следующим основным критериям: известный источник энергии, благодаря которому осуществляется перемещение масс; отражение роли суточного вращения Земли; соблюдение цикличности геологических процессов, протекающих на фоне поступательного развития Земли; объяснение образования латеральных неоднородностей в пределах ранее сформированных почти однородных сфероидальных оболочках; связь физических полей, существующих на поверхности Земли, с механизмом тектогенеза. Со времени появления концепции мобилизма [68] прошло более 40 лет. До последнего времени, несмотря на ряд достигнутых успехов, эта концепция не смогла удовлетворительно ответить на перечисленные выше критерии. В следующей главе излагается система взглядов, которая позволила дополнить концепцию мобилизма таким образом, что она стала отвечать всем перечисленным выше критериям.

## **ГЕОМАГНЕТИЗМ И ТЕКТОГЕНЕЗ**

Проблема происхождения геомагнитного поля привлекает к себе внимание многих исследователей вот уже на протяжении более 400 лет. Предложенные до конца XX века теоретические модели и гипотезы были не в состоянии объяснить совокупность основных особенностей, как главного, так и других, меньших по величине составляющих геомагнитного поля. Кроме того, до последнего времени не была предложена ни одна теоретическая модель способная объяснить с единых физических позиций образование как главного, так и других составляющих геомагнитного поля. Несмотря на это, изучение геомагнитного поля позволило углубить наши знания о Земле. Так изучение палеомагнитного поля позволило вновь возродить интерес к гипотезе дрейфа континентов. В свою очередь, информация о внутреннем строении Земли, полученная путем проведения сейсмологических наблюдений, стимулировала появление различных моделей генерации геомагнитного поля, основанных на эффекте динамо. Поэтому резонно ожидать, что новая модель, претендующая на теорию образования геомагнитного поля, должна быть в состоянии объяснить не только совокупность особенностей геомагнитного поля, но попутно дать новую информацию о смежных областях наук о Земле. Первая краткая статья о такой модели была дана в конце 1995 г., и она получила название пьезоэлектрической [90]. Свое развитие модель получила в ряде работ [86, 87, 91]. В дальнейшем в монографии Д.Расулова была подробно изложена новая теория образования земного магнетизма [88]. В работах [5, 6, 8-10, 86-88] удалось с единых теоретических позиций найти строгое физическое толкование всей совокупности особенностей как главного геомагнитного

поля, так и полей суточных и локальных вариаций; показано, что региональные геомагнитные и геоэлектрические аномалии могут быть вызваны одним источником. В монографии [88] приведены количественные расчеты, которые подтверждают качественные рассуждения, и описан ряд следствий, вытекающих из модели. К ним относятся: постоянное наличие отрицательного электрического заряда на земной поверхности; полярные сияния и магнитные суббури; происхождение магнитного поля у планет солнечной системы. Важным следствием теории [88] явился вывод о едином энергетическом источнике генезиса как геомагнитного поля, так и дрейфа литосферных плит. Поэтому ниже мы вначале рассмотрим новые теоретические представления о генезисе главного геомагнитного поля и объясним образование основных его особенностей. Для удобства читателю и его более полного представления о преимуществах новой теории [88] мы вынесли в Приложения №2,3 рассмотрение вопроса о генерации ряда других составляющих геомагнитного поля. В конце главы (п. 4.2) кратко изложена модернизированная концепция тектоники литосферных плит (МКТЛП), которая позволила ответить на все основные вопросы, предъявляемые к любой модели тектогенеза.

#### **4.1. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ЗЕМНОГО МАГНЕТИЗМА**

За более чем 400-летнюю историю изучения магнитного поля Земли был получен огромный фактический материал, который позволил разделить поле на ряд составляющих и выявить их основные особенности. Геомагнитное поле  $T$  представляют в виде суммы

$$T = H_r + H_a + H_c + \Delta H, \quad (4.1)$$

где  $H_r$  - главное поле;  $H_a$  - поле вызванное намагниченностью горных пород;  $H_c$  - внешнее поле;  $\Delta H$  - поле вариаций. Поле  $H_c$  обычно разделяют на поле суточных вариаций  $H_c$  и поле  $H_{ост}$ , которое является переменным, аperiodическим и сравнительно небольшим. Пренебрегая полем  $H_{ост}$ , квазипостоянную часть поля можно записать в виде

$$T = H_r + H_a + H_c + \Delta H. \quad (4.2)$$

Поле  $H_a$  часто называют аномальным и считают, что оно вызвано намагниченностью горных пород в магнитном поле Земли. Основной составляющей геомагнитного поля является главное поле.

Известно, что в прошлом угловая скорость суточного вращения Земли  $\omega_z$  была больше, чем в настоящее время. Главным тормозом суточного вращения является гравитационное воздействие Луны на Землю. Дважды в лунные сутки над точками земной поверхности в океане, по отношению к которым Луна находится в апогее и перигее, уровень воды поднимается примерно на метр, а затем постепенно в течение четверти суток приходит в первоначальное положение. Связано это с тем, что приливная волна («горб» на поверхности воды) под действием притяжения Луны следует за ее вращением относительно Земли. Оценки показывают, что лунные приливы имеют мощность  $\sim 2,8 \cdot 10^{12}$  Вт [60]. Земля также испытывает приливное воздействие со стороны Солнца, которое по своей амплитуде в 2,2 раза меньше лунного. В силу того, что Земля не является единым твердым телом, ее жидкое ядро не может моментально реагировать на изменение угловой скорости ее суточного вращения  $\omega_z$ . Это приводит к тому, что угловые скорости вращения твердой оболочки и жидкого ядра должны несколько различаться. Расчеты [163] показали, что лунные приливы могут вызвать движение вещества мантии относительно жидкого ядра с линейной скоро-

стью не более 0,02 м/с. В различные периоды времени может наблюдаться и некоторое увеличение скорости  $\omega_3$ , причины которого могут быть связаны с перераспределением масс как на поверхности, так и внутри Земли. Отмеченное выше является веским основанием считать, что угловые скорости вращения твердой оболочки Земли  $\omega_3$  и жидкого ядра  $\omega_1$  различаются. Жидкое ядро в силу своей инертности не может моментально реагировать на изменение скорости  $\omega_3$ .

Согласно постулату пьезоэлектрической модели, в земной коре в субширотном направлении протекают токи, которые генерируют небольшое квазипостоянное магнитное поле  $V_0$ . Поле  $V_0$  внутри Земли направлено по линии, близкой к ее географической оси (рис. 4.1). Магнитное поле  $V_0$  будет воздействовать на свободные электроны металлического ядра, вызывая их направленное движение по траекториям, которые представляют для нас несомненный интерес.

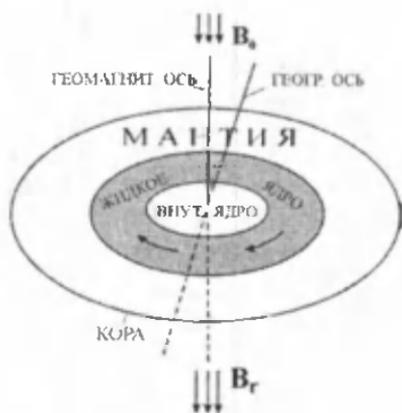


Рис. 4.1. Схема вращения жидкого металлического ядра в магнитном поле  $V_0$  при генерации главного геомагнитного поля  $V_r$ .

#### 4.1.1. Движение вращающейся заряженной частицы в магнитном поле

Рассмотрим вначале движение частицы с зарядом  $q$  и массой  $m$  в однородном магнитном поле  $V$  при нерелятивистских скоростях. Пусть частица до воздействия на нее поля  $V$  двигалась равномерно и прямолинейно

со скоростью  $v$ , перпендикулярной полю (рис.4.2). При движении частицы в поле  $\mathbf{B}$  на нее начнет действовать магнитная составляющая силы Лоренца [127]

$$\mathbf{F}_L = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) . \quad (4.3)$$

Сила  $\mathbf{F}_L$  перпендикулярна  $\mathbf{v}$ , что приводит к движению частицы по окружности радиусом  $r$  с ускорением, равным

$$a = v^2 / r .$$

Из второго закона Ньютона следует:

$$\text{или} \quad m \cdot v^2 / r = qvB \quad (4.4)$$

$$\omega = Bq / m . \quad (4.5)$$

Из (4.5) следует, что величина угловой скорости  $\omega$  зависит от величины поля  $\mathbf{B}$  и удельного заряда частицы -  $q/m$ . Ясно, что вращающаяся электрически заряженная частица создает собственное магнитное поле  $\mathbf{B}_s$ , тождественное полю петли с током  $J$ , равным

$$J = q \cdot \omega / 2\pi \quad (4.6)$$

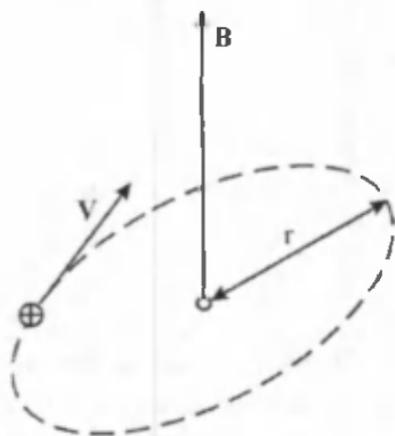


Рис. 4.2. Траектория движения заряженной частицы со скоростью  $v$  в однородном магнитном поле  $\mathbf{B}$  при условии  $v \perp \mathbf{B}$ .

При изменении направления вращения частицы на противоположное меняется на обратное и направление магнитного поля  $\mathbf{V}_1$ , которое она образует.

Теперь представим себе случай равномерного вращения заряженной частицы с угловой скоростью  $\omega_0$ , на которую стали воздействовать магнитным полем  $\mathbf{B}$ . Пусть вращение частицы происходит под действием внешней силы не магнитного происхождения в плоскости, перпендикулярной полю  $\mathbf{B}$ . Рассмотрим траекторию движения частицы под действием поля в системе координат, связанной с ее первоначальным движением. Со стороны поля на частицу будет действовать сила Лоренца, которую можно разложить на две перпендикулярные составляющие. Первая из них  $\mathbf{F}_1$ , равна

$$\mathbf{F}_1 = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}),$$

откуда

$$F_1 = q\omega_0 r B, \quad (4.7)$$

где  $\mathbf{r}$  – вектор, соединяющий частицу с центром ее вращения;  $\mathbf{v}$  – скорость вращения. Под действием силы  $\mathbf{F}_1$  частица начнет двигаться по радиальной линии, т.е. по линии, соединяющей ее с центром вращения. Отсюда следует, что частица приобретает радиальную составляющую скорости –  $\mathbf{v}_p$ . Радиальное движение частицы вызывает появление второй составляющей силы Лоренца:

$$\mathbf{F}_2 = q\mathbf{v}_p \times \mathbf{B}. \quad (4.8)$$

Сила  $\mathbf{F}_2$  вызывает движение частицы по круговой орбите. Результирующим движением частицы под действием поля  $\mathbf{B}$  будет движение по циклоидальной траектории, которая будет лежать в плоскости первоначального заданного вращения частицы. Так как частица под действием силы  $\mathbf{F}_2$  вращается, то она будет генерировать собственное поле  $\mathbf{V}_1$ . При движении по циклоидальной траектории частица может двигаться как к центру своего первоначального вращения, так и от него, что определяется знаком электрического заряда частицы и направлением векторов  $\omega_0$  и  $\mathbf{B}$ .

#### 4.1.2. ХАРАКТЕР ДВИЖЕНИЯ СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ЖИДКОГО ЯДРА ПОД ДЕЙСТВИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Представим себе однородное металлическое ядро, вращающееся в однородном магнитном поле  $\mathbf{B}_0$ . Пусть также направление поля  $\mathbf{B}_0$  будет параллельно оси вращения ядра. Движение свободных электронов ядра будет несколько отличаться от вышерассмотренных случаев. Электроны проводимости в ядре участвуют в хаотическом движении, при котором они непрерывно сталкиваются с ионами ядра. Среднее расстояние, проходимое электроном между двумя последовательными столкновениями с ионами, называется длиной свободного пробега -  $\lambda$  [127]. Зная среднюю скорость движения свободных электронов, можно найти время между его двумя последовательными столкновениями с ионами -  $t$ . При упругом столкновении с ионом электрон, практически не теряя своей энергии, рассеивается, приобретая новое направление движения. Выясним траекторию движения электрона за время  $t$  под действием поля  $\mathbf{B}_0$ . По оценкам [18, 37] температура в ядре составляет около 5000 °К. Эта температура определяет среднюю скорость хаотического движения электронов -  $v_c$ . Разложим скорость произвольного электрона в ядре на две составляющие: перпендикулярную -  $v_{\perp}$  и параллельную -  $v_{\parallel}$  полю  $\mathbf{B}_0$ . Из выражения (4.3) следует, что на скорость  $v_{\parallel}$  поле  $\mathbf{B}_0$  воздействовать не будет. Скорость  $v_{\perp}$  определяет движение электрона по круговой орбите под воздействием поля  $\mathbf{B}_0$ . На рис.4.3 а,б изображены траектории движения электрона в случаях, когда он движется в прямо противоположных направлениях. На электроны действует сила Лоренца, направление которой определяется векторным произведением (4.3). Направление вектора  $(\mathbf{v} \times \mathbf{B}_0)$ , как следует из векторного анализа, выбирается таким обра-

зом, чтобы векторы  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{B}_0$  и  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}_0$  образовывали правую систему координат. Из рис. 4.3 а,б следует, что, независимо от направления первоначальной скорости движения электрона, он под действием поля будет вращаться в одну сторону: против часовой стрелки.

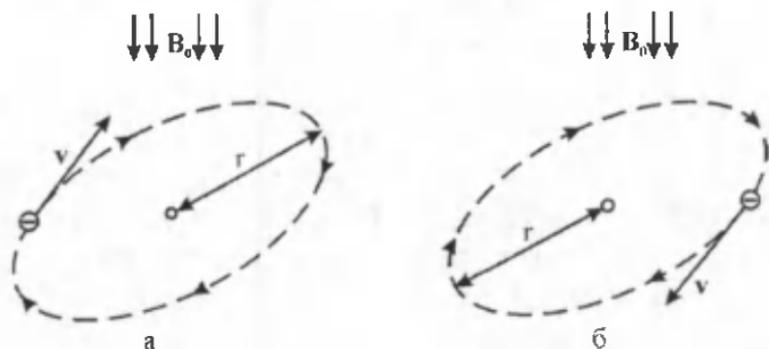


Рис.4.3. Траектория движения части свободных электронов ядра под воздействием магнитного поля.

Таким образом, под воздействием магнитного поля хаотическое движение части свободных электронов в ядре будет приобретать направленное вращательное движение. Очевидно, что при изменении направления поля  $\mathbf{B}_0$  на прямо противоположное должно измениться на  $180$  градусов и направление вращения свободных электронов в ядре. Каждый электрон при своем вращении создает собственное магнитное поле  $\mathbf{B}_r$ , которое тождественно полю кругового тока. На больших расстояниях поле  $\mathbf{B}_r$  можно рассматривать как поле магнитного диполя. Суммарное поле элементарных магнитных диполей в ядре и образует главное геомагнитное поле  $\mathbf{B}_r$ . При этом направление полей  $\mathbf{B}_0$  и  $\mathbf{B}_r$  будут совпадать. Результирующее магнитное поле в ядре определяется векторной суммой

$$\mathbf{B}_c = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_r. \quad (4.9)$$

Так как жидкое ядро вращается относительно твердой оболочки Земли, то на свободные электроны жидкого ядра, согласно выражению (4.7), будет действовать также составляющая силы Лоренца, заставляющая его двигаться по прямой линии, которая проходит через центр ее вращения. Результирующим, направленным движением электронов будет движение по циклоидальным траекториям. Электроны могут «дрейфовать» в сторону мантии или оси вращения ядра. В монографии Д.Расулова [88] показано, что по ряду причин они всегда дрейфуют в сторону мантии. В связи с этим у оси вращения ядра возникает дефицит электронов, т.е. эта область заряжается положительно. Электроны же, минуя ядро, двигаются через мантию и кору к поверхности Земли. Благодаря положительным электрическим токам, текущим с атмосферы на Землю, скапливающийся на поверхности отрицательный заряд нейтрализуется, а в силу постоянного вращения ядра вновь восстанавливается. Отметим, что вращение жидкого металлического ядра в магнитном поле  $\mathbf{V}_0$  тождественно схеме работы униполярного генератора электрической энергии [43]. Из изложенного следует, что в Земле должен существовать гигантский униполярный генератор электрической энергии. Статором этого генератора является земная кора, а ротором – ядро. Более подробно с количественными расчетами механизм генерации главного поля дан в монографии [88].

#### ***4.1.3. О МЕХАНИЗМЕ ГЕНЕРАЦИИ В ЗЕМНОЙ КОРЕ ПОСТУЛИРОВАННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ***

Для генерации главного поля в ядре необходимо небольшое по величине квазипостоянное поле  $\mathbf{V}_0$ , наличие которого было постулировано. Прямых доказательств существования поля  $\mathbf{V}_0$  пока нет. Тем не менее, суще-

ствуют веские причины полагать его наличие. Постулат модели базируется на научно обоснованном предположении о наличии в земной коре пьезоактивного слоя, под которым подразумевается слой, содержащий пьезоэлектрические текстуры кварца, т.е. обладающий пьезоэлектрическими свойствами. Под понятием «пьезоэлектрические текстуры» подразумеваются поликристаллические вещества, содержащие пьезоэлектрические кристаллы, ориентированные относительно какого-либо из элементов симметрии или направления, совпадающего с осью симметрии бесконечного порядка. Теория пьезоэлектрических текстур была развита А.Шубниковым [128]. Опираясь на эту теорию, М.Воларович и М.Пархоменко обнаружили наличие пьезоэлектрических текстур у кварца и ряда кварцсодержащих горных пород [25, 73].

В дальнейшем Э.Пархоменко с сотрудниками [74] разработали теорию пьезоэлектрических текстур горных пород. Отметим, что кварц обладает пьезоэлектрическими свойствами и является одним из основных породообразующих минералов. Пьезоэлектрический эффект кристалла-диэлектрика характеризуется следующими свойствами: под воздействием механического напряжения на противоположных гранях кристалла появляются разноименные электрические заряды; плотность образующихся электрических зарядов прямо пропорциональна величине приложенного механического напряжения; инверсия механического напряжения, приложенного к кристаллу, приводит к изменению знаков заряда на противоположных гранях кристалла; существует обратный пьезоэлектрический эффект, т.е. при воздействии на кристалл электрического поля в нем возникают механические напряжения. Из двух форм кварца пьезоэлектрическим эффектом обладает низкотемпературный  $\alpha$ -кварц. Экспериментальными и теоретически-

ми исследованиями установлено, что кварцсодержащие породы принадлежат к текстурам двух типов:  $(\infty \cdot m)T$  и  $(m \cdot 3:m)T$ .

Знак  $\infty$  означает наличие в текстуре оси симметрии бесконечного порядка, символ  $m$  – плоскости симметрии, точка между элементами симметрии – параллельность между ними, а двоеточие – перпендикулярность. Знак  $T$  показывает, что текстура может быть образована путем всевозможных параллельных переносов; цифра 3 означает, что в текстуре имеется ось симметрии третьего порядка. Тело, обладающее такой симметрией, при повороте на  $180^\circ$  приходит в положение, идентичное исходному.

Численно пьезоэлектрический эффект горных пород, содержащих пьезоэлектрические текстуры, удобно описывать в главной системе координат. В кристаллографии описаны правила, определяющие положение главной системы координат. Как правило, в качестве главной системы координат выступает такая декартова система, оси которой наилучшим образом совпадают с элементами симметрии, т.е. кристаллографическими осями. Для нас представляет интерес пьезоэлектрический эффект текстуры  $(\infty \cdot m)T$ , который описывается тензором:

$$\begin{array}{ccccccc}
 & t_{11} & t_{22} & t_{33} & t_{23} & t_{31} & t_{12} \\
 P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{11} & 0 \\
 P_2 & 0 & 0 & 0 & -d_{11} & 0 & 0 \\
 P_3 & -0,5d_{11} & -0,5d_{11} & d_{11} & 0 & 0 & 0
 \end{array} \quad (4.10)$$

Здесь через  $t_{ik}$  обозначены величины напряжений (деформаций);  $d_{11}$  – коэффициент пропорциональности;  $P_1, P_2, P_3$  – компоненты вектора поляризации  $P$ , направленные по осям  $x_1, x_2, x_3$  главной системы координат. Из (4.10) следует, что при действии нормальных напряже-

ний пьезоэлектрический эффект наблюдается только по оси  $x_3$ , т.е. будет отлична от нуля лишь составляющая вектора поляризации  $P_3$ . Пьезоэлектрический эффект подразделяется на поперечный и продольный. Если эффект наблюдается между теми же перпендикулярными гранями, к которым приложено усилие, то он называется продольным. В случае же, когда пьезоэлектрический эффект наблюдается между гранями, которые перпендикулярны граням, куда приложено усилие, он является поперечным. Продольный эффект у текстуры  $(\infty \cdot m)T$  наблюдается только при действии напряжения  $t_{33}$  по оси  $x_3$ , а поперечный – при действии  $t_{11}$  и  $t_{22}$  по осям  $x_1$  и  $x_2$ , соответственно.

Широкое распространение пьезоэлектрических текстур кварца в природе (Приложение 1) говорит о том, что в Земле должны существовать условия для их образования. Известно, что пьезоэлектрические текстуры могут формироваться при действии на горные породы механических напряжений. Причем ориентация осей симметрии текстуры будет прямо связана с направлением действия этих напряжений [например, 106, с. 56]. На горные породы в планетарном масштабе действуют силы, которые представляют для нас несомненный интерес. На все горные породы земной коры действует сила тяжести -  $F_T$ . Земля находится в состоянии, близком к изостатическому равновесию благодаря выталкивающей силе Архимеда -  $F_A$ . Кроме того, во вращающейся системе на тело массой  $m$ , которое перемещается относительно ее со скоростью  $v$ , действует сила Кориолиса -  $F_K$  [119]:

$$F_K = 2m(v \times \omega), \quad (4.11)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения системы. Согласно (4.11), на всякое тело массой  $m$ , перемещающейся относительно твердой оболочки Земли, будет действовать сила Кориолиса, направление которой параллельно широте местности.

Горные породы земной коры начали формироваться 3÷3,5 млрд. лет назад [108]. Их формирование происходило, в основном, за счет вулканической или плутонической деятельности. Лава, изливаясь на поверхность и постепенно остывая, может со временем приобрести пьезоэлектрические текстуры. На породы при их движении начинает действовать сила Кориолиса, вызывая появление пьезоэлектрических текстур, ориентированных в широтном направлении. Согласно представлениям Новой глобальной тектоники [68], горные породы земной коры находятся в непрерывном движении. Поэтому формирование пьезоэлектрических текстур горных пород происходило также непрерывно в течение всего времени существования земной коры. Одновременно с образованием земной коры в ней начал формироваться пьезоэлектрический слой, содержащий пьезоэлектрические текстуры кварца, ориентированные в субширотном направлении.

Рассмотрим теперь силы, действующие на пьезоэлектрический слой и вызывающие в нем появление пьезоэффекта. Для этого представим себе образец горной породы, вырезанный в виде параллелепипеда и содержащий пьезоэлектрические текстуры кварца (рис.4.4). Пусть действие на образец нормальных напряжений  $t_{11}$ ,  $t_{22}$ ,  $t_{33}$  совпадает с осями главной системы координат. На рис.4.4 изображена также система координат, оси которой  $x$ ,  $y$ ,  $z$  направлены, как и их одноименные компоненты  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  вектора геомагнитного поля  $T$ .

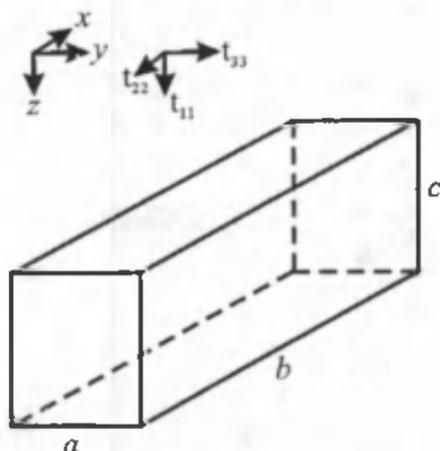


Рис. 4.4. Образец горной породы, вырезанный в виде параллелепипеда и содержащий пьезоэлектрические текстуры кварца:  $t_{11}$ ,  $t_{22}$ ,  $t_{33}$  – нормальные напряжения;  $x$ ,  $y$ ,  $z$  – оси координат, направление которых совпадает с одноименными компонентами  $X, Y, Z$  вектора геомагнитного поля  $T$ .

Действие напряжения  $t_{11}$  по оси  $z$  вызовет, согласно тензору (4.10), появление поперечного пьезоэлектрического эффекта по оси  $y$ , величину которого можно определить из выражения [74]

$$\Delta U = K_n F_n S_1 / S_2, \quad (4.12)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – поверхности граней, с которых снимается электрическое напряжение  $\Delta U$  и к которым приложено усилие  $F_n$ , соответственно;  $K_n$  – постоянная. Выражая площади граней через произведение ребер параллелепипеда  $a$ ,  $b$  и  $c$ , получим

$$\Delta U = K_n F_n c / a. \quad (4.13)$$

Сила  $F_n$  в данном случае есть результирующая сил тяжести и Архимеда. Так как Земля находится в состоянии, близком к изостазии, то в планетарном масштабе

$F_T \approx -F_A$ . Отсюда следует, что  $F_n \ll F_T$ . Кроме того, величины  $c$  и  $a$ , входящие в формулу (4.13), представляют собой мощность пьезоактивного слоя и простирание пьезоэлектрических текстур в широтном направлении, соответственно. Мощность пьезоактивного слоя составляет не более  $20 \div 30$  км, а величина  $a$  может превышать 1000 км. Отсюда следует, что  $c/a \ll 1$ . Поэтому действие механических напряжений по оси  $z$  в планетарном масштабе не должно приводить к образованию заметной величины  $\Delta U$ . В случае действия напряжений  $t_{22}$  по оси  $x$  должен наблюдаться также поперечный пьезоэлектрический эффект в направлении оси  $y$ . Для этого случая ни о действующих силах, ни об отношении площадей  $S_1/S_2$  в планетарном масштабе сказать ничего нельзя ввиду отсутствия информации.

Наиболее интересным является случай действия напряжений  $t_{33}$  по оси  $y$ . При этом будет наблюдаться продольный пьезоэлектрический эффект в широтном направлении. Для продольного эффекта  $S_1/S_2 = 1$ . В широтном направлении в планетарном масштабе действуют силы, вызывающие движение литосферных плит. Назовем эти силы тектоническими. Тектонические силы вызывают появление разности потенциалов в широтном направлении. В силу конечной электрической проводимости горных пород в широтном направлении течет ток  $J_0$ , который, в свою очередь, генерирует относительно небольшое по величине магнитное поле  $B_0$ .

Из отмеченного выше следует, что генерация постулированного поля прямо связана с движением литосферных плит. Движение же последних, как будет показано ниже, вызвана неравномерностью суточного вращения Земли.

#### 4.1.4. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ОСНОВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЯВЛЕНИЯ ГЛАВНОГО ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Пьезоэлектрическая модель позволила довольно просто и физически стройно объяснить особенности проявления как главного геомагнитного поля, так и других его меньших составляющих. Подробное освещение материала, касающегося геомагнитного поля, дано в монографии Д.Расулова [88]. Здесь же мы рассмотрим образование тех особенностей главного поля, которые прямо связаны с тектоникой литосферных плит. Физика образования суточных и локальных вариаций геомагнитного поля, которые будут нам необходимы в дальнейшем, дана в Приложениях 2 и 3. Напомним, что особенностями главного поля являются: близость поля к полю магнитного диполя; существование поля в течение последних  $3 \div 3,5$  млрд. лет; близость расположения геомагнитных и географических полюсов; квазистабильность величины напряженности поля за все время его существования; наличие заметной не дипольной компоненты поля; вековые вариации; периодические инверсии геомагнитных полюсов.

*Близость поля к полю магнитного диполя* объясняется довольно просто. Как было показано в п. 4.2, под действием постулированного поля  $\mathbf{V}_0$  множество  $\{n_a\}$  свободных электронов ядра приобретают упорядоченное вращение. При этом каждый из них создает собственное дипольное поле. Суммарное поле множества  $\{n_a\}$  магнитных диполей в ядре образует главное геомагнитное поле  $\mathbf{V}_r$ . Известно, что поле равномерно размещенных в шаре идентичных диполей математически описывается тождественно полю некоторого диполя, мысленно помещенного в его центре. Поэтому геомагнитное поле на поверхности Земли близко к полю центрального диполя.

*Существование поля в течение последних 3÷3,5 млрд. лет.* Для генерации главного геомагнитного поля, согласно пьезоэлектрической модели, необходимо существование жидкого металлического ядра и постулированного поля  $\mathbf{V}_0$ . Отсюда следует, что жидкое металлическое ядро и поле  $\mathbf{V}_0$  должны были существовать последние 3÷3,5 млрд. лет. Известно [108], что возраст земной коры составляет 3÷3,5 млрд. лет. По-видимому, жидкое металлическое ядро сформировалось более 3,5 млрд. лет назад. Поле  $\mathbf{V}_0$  существует благодаря наличию в земной коре пьезоэлектрических текстур и механических напряжений. Механические напряжения в земной коре могут быть вызваны следующими причинами. Гравитационное воздействие Луны и Солнца на не идеальную по форме Землю вызывает благодаря приливам замедление суточного вращения планеты [60]. В силу инерции угловые скорости вращения ядра и мантии должны различаться. Замедление суточного вращения Земли происходит неравномерно во времени. Более того, на фоне доминирующего процесса замедления суточного вращения наблюдаются моменты его ускорения. В связи с этим жидкое ядро в своем вращении может то опережать, то отставать от вращения мантии. Такое взаимодействие мантии с ядром приводит к изменению направления силы трения между ними. Благодаря этому ядро то тормозит, то ускоряет вращение мантии. Мантия, в свою очередь, воздействует на литосферу, вызывая движение литосферных плит. Главный виновник приливного воздействия на Землю – Луна – существует на протяжении последних 4,5 млрд. лет. Это означает, что с момента образования земной коры в ней существуют механические напряжения, вызванные тектоническими силами. Тектонические силы имеют, преимущественно, субширотное направление. Вызвано это следующим. Воздействие Луны на Землю должно

приводить к существованию в жидком ядре тороидального потока, расположенного в экваториальной области. Причем, ось вращения этого потока должна быть близка к географической оси Земли. Связано это с тем, что средний угол наклона лунной орбиты к плоскости эклиптики невелик: всего  $5^{\circ}9'$ . Из указанного следует, что земная кора с момента своего образования испытывает действие тектонических сил. Образование земной коры и тектонических сил вызвало появление в ней пьезоэлектрических текстур и, как следствие, электрических токов, текущих в широтном направлении. Эти токи и генерируют поле  $V_0$ .

Из сказанного выше следует, что времена существования геомагнитного поля и поля  $V_0$  должны совпадать. Поле  $V_0$  генерируется благодаря пьезоэлектрической поляризации горных пород земной коры. Казалось бы, что столь длительное время пьезоэлектрическая поляризация данных горных пород существовать не может. Действительно, за счет наличия свободных зарядов в земной коре поляризационные за сравнительно короткое в геологическом масштабе время должны были бы быть «нейтрализованы». Этого не происходит, в основном, благодаря гравитационному воздействию Солнца на пьезоактивный слой. Меняющееся в течение суток по направлению гравитационное воздействие Солнца на пьезоактивный слой не позволяет «нейтрализовать» поляризационные заряды. Для генерации поля  $V_0$  достаточно небольшого по величине поля  $V_0$ . Таким образом, в течение последних  $3 \div 3,5$  млрд. лет существовали все условия для генерации главного геомагнитного поля в ядре.

*Близость расположения геомагнитных и географических полюсов.* Выше нами было показано, почему главное геомагнитное поле близко к полю центрального диполя. Лучшую аппроксимацию геомагнитного поля

в настоящую эпоху получают, наклонив ось центрального диполя на  $11^\circ$  к оси вращения Земли. Ранее было показано, как множество  $\{n_d\}$  элементарных магнитных диполей в ядре ориентируются по полю  $\mathbf{V}_0$ . Поэтому ось центрального диполя в ядре должна совпадать с направлением поля  $\mathbf{V}_0$ . Согласно модели, постулированное поле  $\mathbf{V}_0$  вызвано действием тектонических сил на пьезоактивный слой земной коры. Пьезоэлектрические текстуры земной коры ориентированы в широтном направлении. В субширотном направлении действуют и тектонические силы. Поэтому пьезоэлектрическая поляризация горных пород вызывает появление тока, текущего также в субширотном направлении. В связи с этим направление поля  $\mathbf{V}_0$  внутри ядра Земли должно быть близким к географической оси. Отсюда следует, что в течение всего времени существования магнитного поля Земли геомагнитные полюса должны были быть близко расположены к географическим.

*Квазистабильность величины напряженности геомагнитного поля* за все время его существования была выявлена в результате палеомагнитных исследований [например, 191]. В монографии [88] было показано, что генерируемая в ядре величина главного геомагнитного поля не зависит от величины постулированного поля  $\mathbf{V}_0$ . За  $3 \div 3,5$  млрд. лет существования поля мог измениться состав металлического ядра и его размеры, а также радиус Земли. Дипольное поле, генерируемое в ядре, зависит от его состава и размеров. Поле вне диполя меняется обратно пропорционально кубу расстояния от центра диполя до точки наблюдения [116]. Некоторое изменение указанных параметров за геологическое время могло несколько повлиять на величину напряженности геомагнитного поля. Квазистабильность величины напряженности геомагнитного поля за время его существования говорит как о квазистабильном составе ядра,

так и о близком к пропорциональному изменению радиусов ядра и Земли, если такие изменения имели место за указанное время.

*Наличие заметной не дипольной компоненты поля* впервые было доказано Л.Бауэром [135] путем математической обработки экспериментальных данных. С этой целью он вычел из главного поля расчетное поле центрального диполя. С позиций пьезоэлектрической модели не дипольная компонента поля вызвана следующими причинами. Металлическое ядро Земли не является однородным по составу и идеальным по форме. Постулированное поле  $B_0$  может быть также неоднородным как по величине, так и по направлению. Напомним, что при равномерном размещении идентичных магнитных диполей в идеальном по форме шаре наблюдаемое вне шара магнитное поле будет тождественно полю диполя, помещенного в его центре. В случае неоднородного ядра концентрация элементарных диполей в разных частях его объема будет различаться. Ядро Земли несколько отличается по форме от идеального шара. Некоторая неоднородность поля  $B_0$  по направлению внутри ядра может быть причиной различия ориентации элементарных магнитных диполей в его разных частях. Указанные причины и вызывают появление не дипольной компоненты главного поля.

*Вековые вариации* характеризуются из года в год небольшими плавными изменениями элементов земного магнетизма. Изменение величины элементов в течение года называют вековым ходом. Наблюдениями установлено, что вековой ход не является величиной постоянной. Важную информацию о поведении геомагнитного поля за прошедшие 10 тысяч лет дали археомагнитные исследования [20, 72, 173]. Они позволили установить, что напряженность геомагнитного поля непрерывно колеблется с периодом около 7 тысяч лет. Палеомагнит-

ные данные [123, 130, 191] подтверждают этот вывод. Причем амплитуда колебаний напряженности поля сопоставима с ее средним значением. Согласно модели, процесс генерации главного поля в ядре находится в состоянии динамического равновесия. Ощутимые колебания напряженности поля нельзя объяснить просто вращением неоднородного и не идеального по форме ядра. Проведенные в монографии [88] оценки показали, что в генерации главного поля принимает участие небольшая часть свободных электронов в ядре. При вращении ядра относительно мантии несколько меняются условия генерации элементарных магнитных диполей в его разных частях. В связи с этим меняется и множество  $\{n_d\}$  свободных электронов ядра, принимающих участие в генерации поля, что и вызывает плавное колебание величины главного поля. Период колебаний напряженности поля отражает время релаксации данного процесса. Выделены вариации угловых элементов поля с периодами 600 и 350 лет. Данные вариации отмечены на фоне монотонного изменения этих элементов. Вариации угловых элементов вызваны теми же причинами, что и вариации величины напряженности поля.

*Западный дрейф геомагнитного поля* заключается в смещении на запад фокусов изопор векового хода. Карты изопор (изолиний векового хода) имеют несколько фокусов, где величина векового хода достигает максимального значения. Используя данные обсерваторий, Е.Вестин и др. [199] рассчитали среднюю скорость смещения на Запад фокусов изопор, и она оказалась равной 0,18 градусов в год. Анализ, выполненный Т.Юкутаки [204] показал, что западный дрейф несколько различается для различных точек земной поверхности. Согласно расчетам [204], основной вклад в вековую вариацию вносит западный дрейф. О причинах западного дрейфа было высказано несколько предположений. Из них за-

служивает внимания гипотеза о связи западного дрейфа с вращением ядра относительно мантии [78]. Рассмотрим эту гипотезу подробнее с позиций модели. Для объяснения западного дрейфа нужно предположить, что ядро в своем вращении опережает мантию, т.е. твердую оболочку Земли. Рассмотрим движение свободных электронов ядра под действием поля в системе координат, связанной с мантией. Согласно выражению (4.7), при вращении ядра электроны под действием составляющей силы Лоренца  $F_1$  должны дрейфовать по линии, соединяющей их с осью вращения. В случае, если ядро в настоящую эпоху вращается с большей угловой скоростью, чем твердая оболочка Земли, дрейф электронов будет происходить в сторону мантии. Постоянное присутствие отрицательного электрического заряда на поверхности Земли в области низких и умеренных широт подтверждает этот вывод. Различная скорость западного дрейфа в различных точках земной поверхности связана с тем, что вращение жидкого ядра отличается от вращения твердого тела. В ядре существует тороидальный поток вещества. Угловые скорости вращения жидкости в разных точках этого тора могут несколько различаться.

*Периодические инверсии геомагнитного поля* были точно установлены палеомагнитными исследованиями [16, 122, 153, 162]. До последнего времени инверсии поля были одним из самых загадочных свойств земного магнетизма. Их пытались объяснить за счет индукции в модели двойного дискового динамо [188]. Теория самовозбуждающегося динамо не смогла дать физическое объяснение явлению инверсии поля [72, 130]. Пьезоэлектрическая модель связывает инверсии поля с изменением направления вращения жидкого ядра. Рассмотрим вращение ядра относительно системы координат связанной с твердой оболочкой Земли. В п. 4.1.2 было показано, как множество генерируемых в ядре

элементарных диполей ориентируются по полю  $\mathbf{V}_0$ . При изменении направления поля  $\mathbf{V}_0$  на  $180^\circ$  изменится на противоположное и направление полей элементарных диполей.

Поле  $\mathbf{V}_0$  генерируется в земной коре благодаря действию тектонических сил. Тектонические силы вызывают появление продольного пьезоэлектрического эффекта в субширотном направлении. Инверсия пьезоэлектрического эффекта происходит при изменении растягивающих напряжений на сжимающие, или наоборот. Представим себе, что тектонические силы изменили направление своего воздействия на  $180^\circ$ . При этом произойдет и инверсия продольного пьезоэлектрического эффекта в широтном направлении. Это, в свою очередь, вызовет изменение на  $180^\circ$  направление протекающих в земной коре токов и, как следствие, инверсию поля  $\mathbf{V}_0$ .

Тектонические силы вызываются вращением жидкого ядра относительно мантии. Вращение ядра относительно мантии вызывает появление сил трения между ними. Взаимодействие ядра и мантии постепенно оказывает влияние на взаимодействие мантии и литосферы. Считается, что между мантией и литосферой существует тонкий слой расплавленного вещества (астеносфера), обладающего свойствами жидкого тела. Поэтому в результате взаимодействия мантии и литосферы может происходить скольжение литосферных плит по этому слою. При изменении направления вращения ядра относительно мантии изменится на  $180^\circ$  и направление сил трения между ними. В результате на  $180^\circ$  изменится и направление действия тектонических сил, действующих в земной коре, что, в свою очередь, приведет к инверсии поля  $\mathbf{V}_0$ . Инверсия же поля  $\mathbf{V}_0$  вызовет и инверсию главного геомагнитного поля.

Согласно данным палеомагнитных исследований [148], продолжительность процесса инверсии главного

поля составляет  $\sim 10^3$  лет. Непосредственно перед инверсией величина поля уменьшается не меньше чем на порядок. Время инверсии отражает инерцию мантии. Действительно, поле  $V_0$  генерирует главное поле и при изменении его направления на  $180^\circ$  меняется на обратное и направление главного поля. Изменение направления вращения ядра на обратное вызывает изменение на  $180^\circ$  и направления сил трения, существующие между ядром и мантией. За время  $\sim 10^3$  лет это изменение взаимодействия между ядром и мантией приводит к изменению на  $180^\circ$  и направления сил трения между мантией и литосферой, что вызывает инверсию поля  $V_0$ , а значит и главного поля. Инверсии происходили в течение всего времени существования геомагнитного поля и не имели строго периодического характера, что прямо связано с неравномерностью суточного вращения Земли и нерегулярностью изменения направления вращения ядра.

*Кинематическая проблема* у пьезоэлектрической модели, в отличие от теории динамо, отсутствует. Действительно, достаточно простого вращения жидкого ядра относительно мантии. При этом достаточно наличия в ядре относительно мантии тороидального потока в экваториальной области, а остальная его часть может покоиться. Не имеет также значения величина угловой скорости вращения ядра. Наличие твердого внутренне-го ядрышка и его вращение относительно жидкого ядра Земли также не оказывает влияния на механизм генерации главного поля. Для генерации главного поля в ядре необходимо лишь наличие поля  $V_0$  и металлического ядра. Для существования же поля  $V_0$  необходимо вращение жидкого ядра относительно мантии. Эти условия, как известно, выполняются.

*Энергетической проблемы* у модели также нет. Для генерации главного поля необходим источник энергии, приводящий во вращение жидкое ядро Земли. Таким ис-

точником энергии является гравитационное взаимодействие Луны и Солнца с Землей, вызывающее приливы. Данный источник энергии существует в течение последних 4,5 млрд. лет. Известно, что приливы замедляют вращение нашей планеты [60]. Причем это замедление происходит неравномерно во времени. В связи с этим жидкое ядро в разные геологические эпохи то отставало, то опережало мантию в своем суточном вращении.

Резюмируя изложенное, можно сказать, что пьезоэлектрическая модель позволила физически стройно объяснить практически все особенности проявления главного геомагнитного поля.

#### ***4.2. МОДЕРНИЗИРОВАННАЯ КОНЦЕПЦИЯ ТЕКТониКИ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ***

Концепция Тектоники литосферных плит (КТЛП) до недавнего времени не могла ответить на ряд вопросов, предъявляемых к гипотезам тектогенеза. Согласно КТЛП, движение литосферных плит происходит благодаря тепловой и гравитационной конвекции в мантии. Тепловая и гравитационная конвекция в мантии порождена силами, имеющими вертикальное направление, т.е. направление, перпендикулярное земной поверхности. В то же время движение литосферных плит происходит под действием тектонических сил, имеющих субгоризонтальное направление. В монографии Д.Расулова [88] предложена модернизированная концепция тектоники литосферных плит (МКТЛП). Согласно МКТЛП, движение литосферных плит, а значит, и дрейф континентов, вызваны неравномерным вращением планеты. Замедление суточного вращения Земли вызвано, в основном, ее спутником – Луной. Часть энергии вращения Земли переходит в тепло, другая – перераспределяется между ее внутренними оболочками и, примерно, десятая часть

передается Луне. Поэтому Луна постепенно удаляется от Земли. Предполагают, что  $3\div 4$  млрд. лет назад Луна была существенно (в  $4\div 5$  раз) ближе к Земле, и ее влияние было более значимым. Этот вывод относится и к замедлению суточного вращения планеты [60]. Таким образом, за прошедшие  $3\div 4$  млрд. лет замедление суточного вращения Земли было неравномерным. В связи с этим, а также принимая во внимание инертность жидкого ядра, угловые скорости вращения мантии и ядра различались. В этом случае, как было показано в п. 4.1.4, силы трения между ядром и мантией периодически приводят то к передаче части кинетической энергии вращения мантии ядру, то наоборот. В результате этого мантия то «опережает» при своем вращении жидкое ядро, то «отстает» от него. Для большей убедительности сравним скорость суточного вращения твердой оболочки Земли с угловой скоростью вращения жидкого ядра относительно мантии или наоборот. Сравним также среднюю скорость движения литосферных плит с относительной скоростью движения вещества на границе ядро-мантия.

В монографии [88] показано, что в настоящую эпоху жидкое ядро опережает мантию при своем суточном вращении. Подтверждением сказанному может служить западный дрейф вековых вариаций. Еще задолго до появления пьезоэлектрической модели западный дрейф пытались объяснить за счет вращения жидкого ядра относительно мантии [78], причем в своем вращении ядро должно было опережать мантию. В этом случае скорость вещества на границе ядро-мантия должна составлять  $v \approx 10^{-3}$  м/с. Оценки [163] показали, что лунные приливы могут вызывать движение материи на границе ядро-мантия не более 0,02 м/с. Поэтому величина скорости  $v \approx 10^{-3}$  м/с вполне допустима. Напомним, что согласно пьезоэлектрической модели величина угловой скорости

вращения ядра относительно мантии не имеет особого значения. В то же время наличие вращения ядра относительно мантии необходимо с точки зрения существования поля  $V_0$  и дрейфа электронов проводимости ядра в сторону мантии. Существование тороидального потока вещества сказывается на взаимодействии ядра и мантии: ядро то передает часть своего импульса мантии, то, наоборот, забирает часть импульса у нее. В свою очередь, благодаря наличию астеносферы изменение импульса мантии приводит в движение литосферные плиты.

Сравним угловую скорость вращения ядра относительно мантии со скоростью ее суточного вращения. За сутки мантия, а значит, и твердая оболочка Земли делает один оборот вокруг оси своего вращения. Время одного оборота ядра относительно мантии можно определить из очевидного выражения

$$t = 2\pi R_{\text{я}} / v_{\text{я}} \quad (4.14)$$

Подставляя в (4.14) значения  $R_{\text{я}} = 3470$  км и  $v_{\text{я}} \approx 10^{-3}$  м/с, получим  $t \approx 700$  лет. Отсюда следует, что в настоящее время угловая скорость вращения ядра относительно мантии почти в миллион раз меньше угловой скорости вращения последней. Оценим теперь возмущения, вносимые ядром в движение мантии. Известно, что скорость движения литосферных плит составляет  $\sim 1$  см/год [108]. Согласно пьезоэлектрической модели, движение литосферных плит вызваны изменением импульса мантии. Масса литосферных плит много меньше массы мантии. Поэтому изменение импульса мантии в результате ее взаимодействия с литосферой будет незначительным. Отсюда следует, что возмущающие движения в мантии должны быть того же порядка, какие наблюдаются в литосфере, т.е.  $\sim 1$  см/год. Тогда несложный расчет по-

казывает, что линейная скорость вращения ядра относительно мантии на границе ядро-мантия более чем в  $10^5$  раз превышает скорость возмущающих движений в последней.

Приведенные выше значения относительных скоростей движения вещества в различных оболочках Земли говорит о правомерности МКТЛП. Рассмотрим, как отвечает модернизированная концепция мобилизма пяти основным критериям, предъявляемым к гипотезам тектогенеза (п. 3.3).

*Энергетический источник движения литосферных плит* и земного униполярного генератора, отвечающего за генезис геомагнитного поля (п. 4.1), является общим. Неравномерное суточное вращение Земли приводит к разным угловым скоростям вращения мантии и жидкого ядра. Как было отмечено ранее, инверсия геомагнитного поля происходит при изменении на  $180^\circ$  направления вращения жидкого ядра относительно мантии [88]. При вращении ядра относительно мантии или, наоборот, между ними возникают силы трения. Пусть, к примеру, жидкое ядро имеет большую скорость вращения, чем мантия. В этом случае она будет стремиться «увлечь» мантию за собой. Действительно, между мантией и жидким ядром действуют силы трения. Со стороны мантии на жидкое ядро действует сила трения  $F_m$ , которая тормозит вращение ядра, а со стороны ядра на мантию — сила трения  $F_j$ , стремящаяся «увлечь» мантию за собой. Силы  $F_m$  и  $F_j$  равны по величине, но противоположны по направлению.

Отметим, что масса ядра примерно вдвое меньше массы мантии. Поэтому под воздействием жидкого ядра мантия может приобрести заметный дополнительный импульс. Между мантией и литосферой находится астеносфера, которая должна обладать свойствами жидкого тела. Учтем, что масса литосферы много меньше мас-

сы мантии. В связи с этим литосфера обладает гораздо меньшей инерцией, чем мантия. Поэтому через астеносферный слой мантия передает литосфере часть своего импульса, «заимствованного» ею у ядра ранее. В результате этого литосферные плиты приходят в движение. Описанная картина является несколько упрощенной. Приливное воздействие Луны и Солнца должно приводить к существованию в ядре тороидального потока вещества. При этом разные части жидкого ядра могут иметь разные угловые скорости вращения относительно мантии. Естественно, что и мантия не представляет собой единое твердое тело. Тем не менее, описанная картина правильно передает происхождение сил, под действием которых литосферные плиты приходят в движение. Так как литосферные плиты имеют различные массы и географическое расположение, то они приобретают и различные скорости движения. Далее, согласно «Новой глобальной тектонике», на границе соприкосновения плит происходят процессы, хорошо описанные в литературе [например, 35, 54, 68, 111, 120].

*Цикличность тектонических процессов* с позиций пьезоэлектрической модели происходит следующим образом. Выше была описана картина происхождения сил, приводящих в движение литосферные плиты при выполнении условия

$$\omega_{\text{я}} > \omega_{\text{м}}, \quad (4.15)$$

где  $\omega_{\text{я}}$  и  $\omega_{\text{м}}$  - угловые скорости вращения жидкого ядра и мантии соответственно. В силу неравномерного суточного вращения Земли наступает эпоха, когда будет верно неравенство

$$\omega_{\text{м}} > \omega_{\text{я}}. \quad (4.16)$$

При изменении направления вращения ядра относительно мантии на обратное изменяется на  $180^{\circ}$  и направление сил трения, действующих между ними. Теперь уже ядро стремится затормозить мантию, а мантия увлечь ядро в своем вращении. Это взаимодействие приводит к уменьшению импульса мантии. В свою очередь, мантия через астеносферу «отбирает» часть импульса у литосферы. На литосферные плиты начнут действовать силы, противоположные силам, действующим при соблюдении условия (4.15). Таким образом, цикличность тектонических процессов вызвана периодическим изменением на  $180^{\circ}$  направления вращения жидкого ядра относительно мантии.

*Суточное вращение Земли*, как это следует из пьезоэлектрической модели, является одним из основополагающих факторов. Действительно, благодаря суточному вращению Земли создаются условия, необходимые для приливного воздействия на нее со стороны Луны и Солнца. Приливы тормозят вращение Земли. В результате этого жидкое ядро то отстает, то опережает мантию в своем вращении.

*Образование латеральных неоднородностей* в пределах ранее сформированных, почти однородных сфероидальных оболочек можно объяснить следующим образом. Не вдаваясь в подробности, примем, что оболочечное строение Земли вызвано действием силы тяжести. Отсюда следует, что латеральные неоднородности могут возникать в пределах литосферы. Действительно, тектонические силы, действующие на литосферные плиты, вызваны вращением ядра и мантии относительно друг друга и имеют субгоризонтальное направление. В связи с этим эти силы могут вызвать в земной коре и верхней мантии появление латеральных неоднородностей.

*Последним, пятым критерием проверки гипотезы «на прочность» является доказательство связи физических полей, существующих на поверхности Земли, с механизмом тектогенеза. Из ранее изложенного очевидно, что данный критерий также выполняется. Согласно пьезоэлектрической модели, в Земле существует гигантский униполярный генератор электрической энергии. Энергетическим источником этого генератора являются земные приливы. Постулированное в модели магнитное поле  $B_0$  существует благодаря действию тектонических сил.*

Подробное рассмотрение всех аспектов, относящихся к тектонике плит с позиций МКТЛП, не входит в задачу настоящих исследований. В связи с этим мы ограничимся ответом на ряд доводов противников теории мобилизма [например, 17, 59, 136, 176], которые имеют принципиальное значение. Главный вопрос – вопрос о природе сил, приводящих в движение литосферные плиты, был нами выше подробно изложен. Поэтому рассмотренные ранее рядом авторов чисто кинематические задачи движения плит получили с позиций МКТЛП четкое физическое обоснование. Действительно, согласно МКТЛП, в жидком ядре Земли существует тороидальный поток вещества относительно ее твердой оболочки. Причем ось вращения этого тора близка к географической оси Земли. Неравномерное суточное вращение Земли приводит к различным угловым скоростям вращения мантии и жидкого ядра. Из-за сил трения, действующих на границе мантия – жидкое ядро, происходит изменение угловой скорости вращения мантии.

Одним из узловых вопросов, предъявляемых к тектонике плит, является вопрос о необходимом количестве литосферных плит, их делении и воссоединении. Вначале внесем ясность в само понятие «литосферная плита». Данное понятие появилось вместе с рождением КТЛП.

В то время необходимо было найти объяснение данных палеомагнитных исследований. Это было достигнуто путем деления всей литосферы на ряд плит и решения кинематической задачи их перемещения во времени. Согласно МКТЛП, каждая отдельно взятая литосферная плита не есть нечто постоянное по своим размерам, начиная от времени деления праматерика и до наших времен. Литосферная плита состоит из отдельных блоков. Так же, как и литосферные плиты, блоки взаимодействуют друг с другом. Поэтому можно рассматривать сумму  $n$ -го количества блоков в конкретный промежуток времени - эпоху, как отдельную литосферную плиту при условии, если они движутся как единое тело. В силу причин, указанных выше, различные блоки, входящие в одну литосферную плиту, могут приобрести различные скорости и направления движения. Из-за этого некогда единая литосферная плита может расколоться на части. Рассмотренная выше причина раскола единой плиты объясняет также присоединение части одной плиты к другой, расположенных ныне на значительном расстоянии друг от друга.

Необходимо также осветить вопрос о причинах образования и движения срединно-океанических хребтов. Известно, что образование срединно-океанических хребтов связано с явлением спрединга (раздвигания) океанического дна. Поэтому вначале рассмотрим причины спрединга. Как было показано выше, некогда единая океаническая плита может разделиться на части. Образовавшаяся трещина в некогда единой плите приводит к падению давления в прилежащей к ней области мантии, что и вызывает извержение магмы и образование новых частей литосферных плит, которые ранее входили в одну плиту. Этот процесс будет происходить до тех пор, пока плиты, примыкающие друг к другу у срединно-океанического хребта, раздвигаются, т.е. имеют раз-

личные скорости и направления движения. В какой-то момент времени, в силу периодического изменения скорости движения литосферных плит, этот срединно-океанический хребет может начать двигаться в составе одной литосферной плиты. В этом случае спрединг океанического дна у этого хребта уже происходить не будет. Поэтому со временем рассматриваемый срединно-океанический хребет может исчезнуть, погрузившись в мантию в районе расположения какой-либо островной дуги или у границы материковой плиты.

Необходимо особо остановиться на претензиях, предъявляемых к данным палеомагнитных исследований противниками теории мобилизма. Так В. Белоусов [17, с. 367] справедливо отмечает, что «...интерпретация палеомагнитных данных основана на некоторых допущениях гипотетического характера. Среди них то положение, что геомагнитное поле, усредненное за любые промежутки времени (порядка  $10^5$  лет и более), является полем диполя, помещенного в центр Земли. Это положение основывается на принимаемой сейчас теории происхождения магнитного поля Земли, которая сама является лишь гипотезой». Автор [17], по-видимому, имеет в виду теорию самовозбуждающегося динамо. С появлением новой теории генерации геомагнитного поля – пьезоэлектрической модели – объективность палеомагнитных данных не вызывает сомнений. Как нами было обосновано ранее (п. 4.1.4) и подробно описано в монографии Д.Расулова [88], близость геомагнитного поля к полю диполя, начиная с момента его возникновения и до настоящего времени, не вызывает сомнений. Причем это утверждение обосновано не только качественно, но и количественно. Более того, что очень важно, обоснована также близость расположения геомагнитной и географической осей за все время существования магнитного поля Земли.

В.Белоусов [17, с. 365] отмечает также, что КТЛП схематично подходит «... к процессам на континентах. Например, вся история геосинклинали, как мы видели, вкладывается в представление о простой последовательности растяжения и сжатия». В то же время он признает, что в его понимании, как впрочем, и многих других «фиксистов», понятие «геосинклиналь» является историческим. Однако движение литосферных плит за любой рассматриваемый промежуток времени также можно считать историческим. В качестве примера можно привести монографию Т.Далимова и Троицкого [35], которые подробно и убедительно провели исторический анализ эндогенных и экзогенных процессов с позиций теории литосферных плит. Из изложенного выше следует, что с позиций МКТЛП найден физически стройный ответ на совокупность основных требований, предъявленных ранее к теории тектоники плит. Резюмируя сказанное, можно сделать следующие выводы. Литосферные плиты движутся под действием сил, вызванных неравномерным замедлением суточного вращения Земли. Эти силы имеют субгоризонтальное направление. Скорость передвижения плит зависит от их масс и географического расположения. Взаимодействие плит может приводить и к их вращательному движению. Литосферные плиты могут образовываться как в результате спрединга океанического дна, так и деления отдельно взятой плиты на составляющие.

## ГИДРОУДАРНАЯ МОДЕЛЬ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Гидроударная модель была предложена нами в 2001 г. [92]. Свое дальнейшее развитие модель получила в работах [93, 94]. Гидроударная модель, с одной стороны, базируется на установленных сейсмологических наблюдениях фактах, а с другой – на известных физических законах. Напомним эти факты. Во-первых, горные породы, за исключением рыхлых поверхностных отложений, обладают упругой деформацией. А это значит, что под действием механических напряжений они могут накапливать потенциальную энергию. Во-вторых, по достижении механических напряжений до определенного уровня в горных породах наблюдается эффект дилатансии, т.е. в них образуются многочисленные трещины. Лабораторными экспериментами выяснено, что перед разрушением горных пород под действием напряжений в них образуется магистральная трещина. Сейсмологическими наблюдениями обнаружено, что перед толчком в очаге происходит изменение некоторых физических параметров горных пород. Для объяснения этого факта были предложены две дилатансионные модели. Согласно фильтрационно-дилатансионной модели, трещины в горных породах очага заполняются водой, что приводит к ослаблению их прочностных свойств и последующему разрушению.

Предложенная нами гидроударная модель объясняет все вышеизложенные факты, исходя из простых физических представлений. Слабым звеном всех предложенных ранее теоретических моделей тектонических землетрясений был вопрос о механизме трансформации

накопленной ранее потенциальной энергии упругой деформации горных пород в кинетическую. Причем трансформация огромной потенциальной энергии в кинетическую происходит за считанные мгновения. Рассмотрим трактовку изложенных выше и других вопросов с позиций предложенной модели.

### **5.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ГИДРОУДАРНОЙ МОДЕЛИ**

Постулатом гидроударной модели является предположение о фазовом изменении состояния горных пород в очаге перед землетрясением. Под фазовым изменением состояния горных пород в очаге подразумевается приобретение ими свойств жидкого тела вместо первоначально твердого. Постулат базируется, с одной стороны, на свойстве вещества менять свое фазовое состояние при небольшом пороговом изменении физико-химических условий [44], а с другой – на многочисленных фактах наблюдения землетрясений при введении в строй водохранилищ, закачке воды в глубокие скважины, разработке месторождений углеводородов (п. 7.1). Поступление дополнительного объема воды в очаг вызывает снижение прочностных свойств горных пород в нем. Горные породы, как правило, являются веществами гетерогенными. Изменение процентного содержания одной компоненты в таких системах может привести к резкому изменению их физических свойств. Наглядным и хорошо изученным примером таких систем являются сплавы некоторых металлов. Образование сплавов из двух или большего количества металлов позволяет резко снизить или поднять точку их плавления (солидуса) [75, с. 498]. Естественно, что поступление дополнительного количества воды в очаг может резко изменить физические свойства горных пород в нем. Излишняя влага

снижает прочностные свойства горных пород в очаге, и под действием механических напряжений они могут разрушиться. В связи с этим вполне резонно предположить, что в этот момент горные породы в очаге приобретают свойства жидкого тела. Очаг землетрясения может иметь любую геометрическую форму. Для наглядности представим его в виде отдельного тела, имеющего форму усеченного конуса. На рис. 5.1 представлены разрезы очага плоскостями перпендикулярной (а) и параллельной (б) земной поверхности и схема действия давлений в гипоцентральной области готовящегося землетрясения.

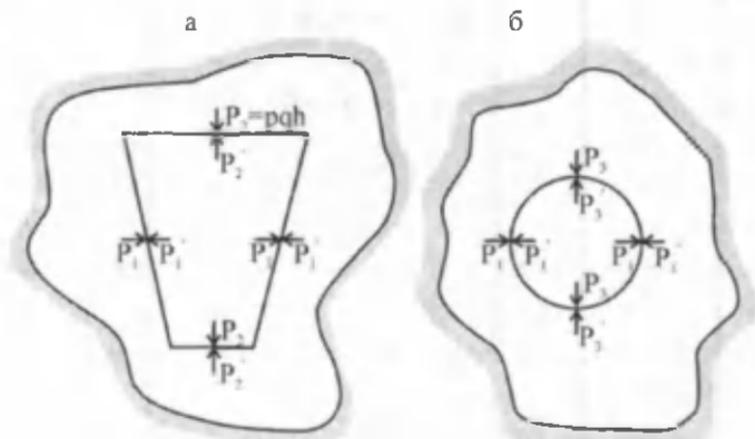


Рис. 5.1. Разрезы тела-очага плоскостями перпендикулярной (а) и параллельной (б) земной поверхности и схема действия давлений в гипоцентральной области готовящегося землетрясения. Очаг представлен в форме усеченного конуса.

Рассмотрим вначале давления, действующие в области очага в случае, когда он обладает свойствами твердого тела. Пусть на левую стенку тела-очага слева направо действует давление  $p_1$ , вызванное тектоническими силами. Тело передает это давление на окружающие породы у правой стенки. Согласно третьему закону Ньютона,

сила действия равна силе противодействия по величине и противоположна по направлению. Поэтому, в силу реакции тела и окружающих его пород, появляется давление  $p'_1$ , равное по величине  $p_1$ , но противоположное по направлению. Вышележащие горные породы давят на верхнее основание конуса с давлением, равным

$$p_2 = \rho gh, \quad (5.1)$$

где  $\rho$  – плотность пород;  $g$  – ускорение свободного падения;  $h$  – глубина залегания очага. Реакцией тела очага на давление  $p_2$  является появление давления  $p'_2$ , равного  $p_2$  и противоположно направленное. Аналогичная картина будет наблюдаться и у нижнего основания тела-очага (рис. 5.1, а). Допустим, что на очаг со стороны горных пород действует также давление  $p_3$ , ортогональное  $p_1$  и  $p_2$ . Поэтому, в силу реакции тела-очага и окружающих пород, появляется давление  $p'_3$ , равное  $p_3$  и противоположно ему направленное (рис. 5.1, б).

Теперь перейдем к рассмотрению давлений, которые будут действовать в очаге, когда он приобретет свойства жидкого тела. Согласно закону Паскаля, в любой точке жидкого тела во все стороны действует одинаковое давление. В связи с этим в любой точке жидкого очага во всех направлениях действует одинаковое давление, равное по величине наибольшему из давления  $p_1$ ,  $p_2$  или  $p_3$ . В нашем случае это будет давление  $p_1$ , так как мы рассматриваем тектонические землетрясения, т.е. события, вызванные тектоническими силами. Отсюда следует очевидный количественный критерий для образования тектонических землетрясений

$$p_1 > p_i \quad (i=2,3) \quad (5.2)$$

При выполнении условия (5.2) в жидком очаге может произойти гидроудар. В случае  $p_2 < p_3 < p_1$  под действием гидроудара перемещение горных пород будет происходить от гипоцентра к эпицентру, а в случае  $p_3 < p_2 < p_1$  – от гипоцентра в горизонтальном направлении, т.е. параллельно земной поверхности. Рассмотрим подробнее, что происходит в очаге при гидроударе. С этой целью для наглядности на рис. 5.2 показана схема действия давлений в любой произвольно выбранной точке очага в момент толчка.

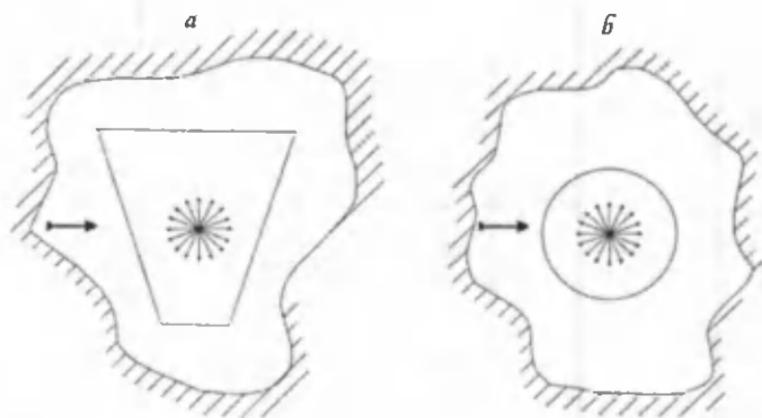


Рис.5.2. Разрезы тела-очага плоскостями перпендикулярной (а) и параллельной (б) земной поверхности и схема действия давлений в произвольной точке жидкого очага. Очаг представлен в форме усеченного конуса. Жирной стрелкой указано направление действия тектонических сил.

Допустим, что выполняется условие

$$p_2 < p_3 < p_1. \quad (5.3)$$

Тогда в результате гидроудара жидкое вещество очага должно выдавливаться по направлению к поверхности Земли. При этом перемещение вышележащих над очагом горных пород будет происходить к поверхности

Земли, так как в этом направлении они будут встречать наименьшее сопротивление. С момента гидроудара ранее сжатые под действием тектонических сил горные породы испытывают расширение, а жидкий очаг как бы «схлопывается». Расширение горных пород будет наблюдаться по линии действия давления  $p_1$ . В то же время гидроудар приведет к образованию зоны сжатия горных пород по линии действия давления  $p_2$ .

В случае выполнения неравенства

$$p_3 < p_2 < p_1 \quad (5.4)$$

перемещение горных пород будет происходить преимущественно в горизонтальном направлении, т.е. по линии действия давления  $p_3$ . В этом же направлении будет наблюдаться сжатие горных пород. В действительности наблюдаемая картина является немного сложнее. Известно, что большинство мелкофокусных землетрясений происходят в зонах, прилегающих к разломам. При этом видимые на поверхности Земли перемещения происходят по разломам. Разломы в земной коре являются той ослабленной зоной, где происходит формирование будущего очага. В разломах горные породы, как правило, обладают большей пористостью и водопроницаемостью. Эти факторы способствуют образованию очагов землетрясений в зонах разлома. Кроме того, как будет показано в п. 6.1, в разломах создаются и другие физические условия, которые способствуют генерации в них землетрясений.

Перемещение горных пород по разломам, вызванным землетрясениями, приводит к различного рода деформациям горных пород, фиксируемых на поверхности Земли. Среди них можно выделить взбросы, взбросы-сдвиги и сдвиги. При взбросах в эпицентральной зоне

наблюдается значительная вертикальная компонента деформации, а при сдвигах – горизонтальная. При взбросо-сдвигах наблюдается комбинация, состоящая из взброса и сдвига. Поэтому резонно считать, что при взбросах и взбросо-сдвигах выполняется условие (5.3), а при сдвигах – (5.4).

## **5.2. ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ И ОБЪЕМА ОЧАГА МЕЛКОФОКУСНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

### **5.2.1. ЭНЕРГИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**

Основным физическим параметром, характеризующим землетрясение, является его полная энергия -  $E_n$ . Одна часть этой энергии затрачивается на перемещение горных пород -  $E_x$ , другая  $E_c$  – на излучение сейсмических волн и третья  $E_p$  – на разрушение горных пород и работу против сил трения. В настоящее время сейсмометрические наблюдения позволяют определить энергию  $E_c$  любого землетрясения. Рассчитать энергию  $E_x$  можно, зная, какой объем пород перемещается и на какое расстояние. В некоторых случаях оценить энергию  $E_x$  можно при наличии подробных геодезических наблюдений. Так как пока невозможно точно предсказать эпицентр будущего землетрясения, то такие наблюдения являются уникальными. К их числу относятся наблюдения при Ташкентском 1966 г. и Газлийском 1984 г. землетрясениях [30, 109]. Оценки величин  $E_n$  и  $E_c$ , проведенные для некоторых землетрясений, показали, что они имеют один порядок величины [46, 149, 167]. Рассчитать величину  $E_p$  вряд ли возможно, но, как будет показано далее, есть веские основания считать  $E_p < E_x$ . Так как величины  $E_n$  и  $E_c$  имеют один порядок, то  $E_n$  и  $E_x$  также должны быть одного порядка. Энергию  $E_x$  проще рассчитать в случае, когда выполняется условие (5.3).

Из школьного курса физики известно, что энергия равна работе  $A_p$  совершаемой силой  $F$  при перемещении тела на расстоянии  $\Delta h$ :

$$E_k = A_p = F \cdot \Delta h . \quad (5.5)$$

Понятно, что сила  $F$  должна несколько превосходить по величине силу тяжести  $P$  выталкиваемых при землетрясении горных пород. Величину  $P$  можно рассчитать, если известны плотность  $\rho$  и объем  $V$  выталкиваемых пород. При выполнении неравенства (5.3) горные породы перемещаются от гипоцентра к эпицентру. Их объем определяется площадью эпицентральной области и глубиной залегания очага. В качестве объема  $V$  можно принять объем горных пород, содержащихся в конусе высотой  $h$  и площадью основания  $S$ . Далее будет показано (п.5.4), почему такой выбор объема является наиболее оптимальным. В этом случае выражение (5.5) можно привести к виду

$$E_k = F \cdot \Delta h \approx P \cdot \Delta h = \Delta h \rho g V = \Delta h \rho g h S / 3 . \quad (5.6)$$

В качестве  $\rho$  можно взять среднюю плотность горных пород земной коры, равную  $\sim 2,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  [28]. Определив из геодезических и сейсмометрических наблюдений  $\Delta h$ ,  $h$  и  $S$ , и подставив их в формулу (5.6), можно оценить величину энергии  $E_k$ .

### 5.2.2. ОБЪЕМ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Рассмотрим теперь физический смысл понятия «объем очага», исходя из представлений гидроударной модели, и выведем формулу для его расчета. Как уже отмечалось выше, при гидроударе жидкое вещество очага выдавливается, а его место занимают окружающие гор-

ные породы, которые ранее были сжаты тектоническими силами. За счет высвобождения потенциальной энергии деформации эти горные породы расширяются. Для численного описания поля деформаций в кристаллах используется тензор 2-го ранга. В естественных условиях горные породы являются поликристаллическими. Поэтому можно ограничиться рассмотрением случая одноосного сжатия, для которого верно выражение

$$e = \mu \epsilon^2 / 2, \quad (5.7)$$

где  $e$  – величина потенциальной энергии сжатия единицы объема горных пород;  $\mu$  – модуль упругости или жесткости;  $\epsilon$  – величина деформации. Объем горных пород, в которых запасенная ранее потенциальная энергия высвобождается в результате землетрясения, равен:

$$V = E_n / e. \quad (5.8)$$

Этот же объем можно найти из выражения

$$V = \Delta V_o / \epsilon, \quad (5.9)$$

где  $\Delta V_o$  – объем очага. Комбинируя (5.7), (5.8) и (5.9), получим

$$\Delta V_o = 2E_n / \mu \epsilon. \quad (5.10)$$

Выражение (5.10) позволяет по известным значениям  $E_n$ ,  $\mu$  и  $\epsilon$  рассчитать объем очага землетрясения. Так как величины  $E_k$  и  $E_c$  одного порядка, то в качестве энергии  $E_n$  можно взять удвоенную величину  $E_c$ . Величину жесткости горных пород можно принять равной  $\mu = 5 \cdot 10^{10}$  н/м<sup>2</sup>. По данным лабораторных испытаний горных пород величина предельной деформации  $\epsilon_n \geq 10^{-3}$ . В то же время оценки предельной деформации по данным, получен-

ным с помощью наклономеров и нивелирной съемки, показывают, что  $\varepsilon_n = 1 \div 2 \cdot 10^{-4}$ . Расхождение вызвано несколькими причинами, одна из которых, на наш взгляд, связана с экстраполяцией поверхностных измерений на глубину залегания очага.

### **5.3. ДВА ПРИМЕРА ОЦЕНКИ ЭНЕРГИИ И ОБЪЕМА ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**

Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг. с магнитудой  $M \geq 7,0$  произошли на территории Западного Узбекистана, который до этого считался асейсмичной зоной. Это послужило причиной дискуссии о возможном их возбужденном характере. Уникальными Газлийские землетрясения являются и потому, что расстояние между их гипоцентрами составляет всего  $15 \div 30$  км. Расположенный примерно в 40 км от эпицентра землетрясения 8.04.1976 г. поселок Газли был полностью разрушен. Подробное описание Газлийских землетрясений имеется в литературе [29, 30]. Сейсмометрическими наблюдениями было выяснено, что все эти землетрясения имели взбросовый характер подвижки с близгоризонтальной осью растяжения и близвертикальной осью сжатия. С позиций гидроударной модели эти факты объясняются следующим образом. Как уже отмечалось ранее, после формирования жидкого очага происходит гидроудар. В результате этого жидкое вещество очага выжимается в сторону наименьшего сопротивления. Взбросовый характер деформаций горных пород в эпицентральной зоне говорит о том, что в очаге в момент толчка выполняется условие (5.3). Так как при этом жидкое вещество очага выжимается в направлении к поверхности Земли, то осью сжатия должна быть вертикаль, что и подтверждают данные сейсмограмм. Наблюдаемая близгоризонтальная ось расширения связана со следующим. Текто-

нические силы имеют субгоризонтальное направление и в этом направлении горные породы испытывают до толчка сжатие. При гидроударе очаг «схлопывается», в результате чего окружающие его горные породы испытывают расширение в субгоризонтальном направлении.

До и после Газлийских землетрясений проводились неоднократные геодезические наблюдения с целью определения вертикальной и горизонтальной составляющих деформации различных точек земной поверхности в плейстосейстовой области и за его пределами. Наиболее подробная информация была получена до и после события 19.03.1984 г. [30, с. 117-123]. В качестве примера на рис. 5.3 приведен график вертикальных деформаций по профилю, пересекающему эпицентральною область с юга на север. Профиль отстоял от точки наибольшего вертикального перемещения на расстоянии 15 км. В результате землетрясения в эпицентральной области образовалось куполообразное поднятие амплитудой  $\Delta l = 75 \pm 14$  мм и площадью основания близким к окружности радиусом  $R = 20 \div 25$  км.

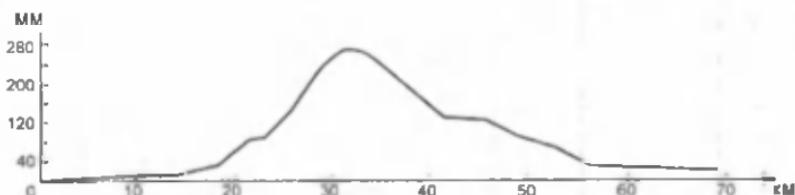


Рис. 5.3. График вертикальных деформаций земной коры в эпицентральной зоне Газлийского землетрясения 20.03.1984 г. по одному из профилей, проходящему с юга на север [30].

Необходимо отметить, что области, испытывавшие вертикальные и горизонтальные перемещения горных пород, практически, совпадают и ограничены плейстосейстовой областью. Сейсмометрическими наблюдениями установлена глубина очага  $h \approx 16$  км и энергия излучения

волн  $E_c \approx 10^{17}$  Дж. Для расчета энергии  $E_k$ , израсходованной на перемещение горных пород, воспользуемся выражением (5.6). Однако для этого вначале определим объем перемещенных горных пород. В качестве  $V$  возьмем объем конуса высотой  $h$  и площадью основания  $S = \pi R^2$ :

$$V = h \cdot \pi R^2 / 3 .$$

В качестве величины перемещения необходимо взять среднюю величину куполообразного поднятия  $\Delta h \approx 250$  мм. Подставив известные и найденные величины в (5.6), получим:

$$E_k \approx \Delta h \rho g V \approx 0,5 \cdot 10^{17} \text{ Дж} .$$

Видно, что величины  $E_c$  и  $E_k$  одного порядка, что служит подтверждением правомочности приведенных рассуждений.

Преыдушие Газлийские землетрясения 8.04 и 17.05.1976 г. из-за малого интервала времени между ними не были охвачены геодезической съемкой в это время. Тем не менее, имеющиеся данные позволяют сделать конкретные выводы. Выявлено, что эпицентры всех трех толчков характеризуются куполообразными поднятиями с примерно равными геометрическими размерами. Гипоцентры Газлийских землетрясений также мало различаются по глубине. Тогда из (5.6) следует, что их энергии  $E_k$  также должны быть одного порядка, что согласуется с данными сейсмометрических наблюдений.

Ташкентское землетрясение 26.04.1966 г. магнитудой  $M \approx 5,3$  проявилось в центре города с интенсивностью, равной 8 баллов по модифицированной шкале Меркалли. Связано это было с тем, что гипоцентр землетрясе-

ния находился прямо под центром города на сравнительно небольшой глубине  $h \approx 8$  км. Механизм очага был определен по данным 34 сейсмических станций Центральной Азии [109 с. 53-58]. Нодальная поверхность (поверхность разрыва) была направлена с северо-запада на юго-восток. Вектор подвижки составил с горизонтом угол около  $70^\circ$ , т.е. подвижка носила преимущественно взбросовый характер. Благодаря наличию обширной нивелирной сети, созданной до землетрясения, удалось составить карту относительных вертикальных движений земной поверхности. Площадь эпицентральной области, испытавшей в среднем поднятие на 15 мм, составила  $S \approx 10^7$  м<sup>2</sup>. По усредненным данным сейсмометрических станций  $h \approx 8$  км, а энергия  $E_c \approx 3,15 \cdot 10^{13}$  Дж. Подставляя известные и найденные величины в формулу (5.6), получим  $E_k \approx 10^{13}$  Дж. Таким образом, и в данном случае рассчитанное значение энергии  $E_k$  подтверждает правомочность представленной теоретической модели.

*Объем очага землетрясения* до последнего времени был во многом неопределенной величиной (п. 1.4). Количественная оценка объема очага производилась по полуэмпирическим данным, не имеющим четкой физической основы. Выведем аналитическую формулу для количественной оценки объема очага, исходя из новых теоретических представлений. В качестве объема очага естественно принять тот объем очага, который приобрел свойства жидкого тела. Для рассмотренных выше землетрясений вещество очага в результате гидроудара выталкивается к поверхности Земли. Это вызывает разрушение вышележащих горных пород и взбросовый характер деформации в эпицентральной области. В первом приближении можно принять, что вещество жидко-

го очага и вышележащих горных пород несжимаемо. В этом случае объем деформированных в эпицентральной области пород должен быть равен объему жидкого очага. Этот объем для любого из рассматриваемых землетрясений был нами определен выше, исходя из данных геодезических наблюдений. Сравним эти эмпирические объемы с расчетными.

Расчетную величину объема очага можно найти из выражения (5.10), взяв в качестве энергии  $E_n$  сумму  $E_c + E_k$ :

$$\Delta V_0 = 2(E_c + E_k) / \mu \epsilon_n \quad (5.11)$$

Некоторая неопределенность остается при выборе величины  $\epsilon$ . В качестве этой величины правильно взять значение предельной деформации горных пород -  $\epsilon_n$ . Это оправдано тем, что по достижении  $\epsilon_n$  горные породы в очаге разрушаются. Оценим вначале объем очага Газлийского землетрясения 19.03.1984 г., подставив в (5.11) следующие значения величин:  $E_c \approx 10^{17}$  Дж,  $\mu = 5 \cdot 10^{10}$  н/м<sup>2</sup>,  $\epsilon_n \approx 10^{-3}$ :

$$\Delta V_0 \approx 2(E_c + E_k) / \mu \epsilon_n = 6 \cdot 10^9 \text{ м}^3.$$

Объем же деформированных в эпицентральной области пород для этого события равен  $\Delta V_d \approx 5,3 \cdot 10^8 \text{ м}^3$ . Сравнение показывает, что расчетное значение объема очага примерно на порядок превосходит эмпирическую величину. Такое расхождение может быть вызвано несколькими причинами. Во-первых, в горных породах могут существовать пустоты, которые заполняются жидким веществом очага. Во-вторых, мы приняли допущение

о несжимаемости горных пород, что не совсем верно. Наконец, величина предельной деформации при разрушении горных пород в очаге может быть больше  $10^{-3}$ . Подобным же образом рассчитаем объем очага Ташкентского события 26.04.1966 г. Подставляя в (5.11) значения  $E_p \approx 10^{13}$  Дж,  $E_c \approx 3.15 \cdot 10^{13}$  Дж,  $\mu = 5 \cdot 10^{10}$  н/м<sup>2</sup>,  $\epsilon_p \approx 10^{-3}$ , получим  $\Delta V_o \approx 1,7 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>. По геодезическим данным объем деформированных пород в эпицентральной зоне составляет  $\Delta V_d \approx 1,5 \cdot 10^5$  м<sup>3</sup>. И в этом случае расчетное значение объема очага также превосходит примерно на порядок величину эмпирическую. Полученные данные по двум землетрясениям хорошо согласуются между собой, что говорит о возможности аналитического расчета объема очага любого мелкофокусного землетрясения по формуле (5.10). При этом рационально в качестве полной энергии  $E_p$  взять величину, равную  $2E_c$ , а значение деформации  $\epsilon_p \approx 2 \cdot 10^{-3}$ . Естественно, что для каждого региона необходимо будет внести свои поправочные коэффициенты.

Интересно сопоставить найденные нами объемы очагов с теми оценками, которые были выполнены ранее. В.Уломов [112] рассчитал объем Ташкентского землетрясения 26.04.1966 г., полагая, что он имеет форму сферы, диаметр которой равен протяженности афтершоковой области  $l_o \approx 5$  км. Нетрудно рассчитать, что в этом случае объем очага должен быть равен  $\sim 65$  км<sup>3</sup>. Трудно представить себе такой объем очага при глубине гипоцентра всего 8 км. Вышеописанный подход оценки объема очага часто используют и другие авторы [например, 46, 140]. В таком случае объем каждого из Газлийских землетрясений должен быть приблизительно равен 1140 км<sup>3</sup>, т.е. величина гигантская и нереальная. Для того

чтобы понять методическую ошибку проведенных в работах расчетов объема очага, выясним физику образования многочисленных афтершоков.

#### **5.4. ФОРШОКИ И АФТЕРШОКИ**

Мелкофокусным землетрясениям в некоторых случаях предшествуют форшоки, число которых незначительно, а выделившаяся энергия относительно главного толчка мала. Сразу после события наблюдаются многочисленные афтершоки, частота и магнитуда которых убывают со временем. Использовать форшоки для предсказания катастрофических землетрясений не представляется возможным. Связано это со следующими причинами. Во-первых, отличить форшок от землетрясения с малой магнитудой невозможно. Во-вторых, интервал времени между форшоком и основным толчком может быть самым различным. И, наконец, часто перед сильными землетрясениями форшоки не наблюдаются.

Рассмотрим особенности проявления форшоков и афтершоков с позиций гидроударной модели. Ежегодно на земном шаре происходит несколько сот тысяч землетрясений. Для того, чтобы произошло событие, одного наличия тектонических напряжений недостаточно. Необходимо также наличие очага, обладающего свойствами жидкого тела. Необходимый очаг может подготавливаться в течение длительного времени. Естественно, что существует некоторая вероятность образования нескольких близко расположенных друг к другу очагов. Отметим, что количество землетрясений с уменьшением магнитуды на единицу увеличивается примерно в восемь раз. Отсюда следует, что вероятность формирования очага меньшего объема выше, чем большего.

Поэтому независимые от основного толчка слабые землетрясения могут восприниматься как форшоки. Этот вывод согласуется с данными наблюдений: интервал времени, отделяющий форшоки от основного толчка, лежит в широких пределах.

Насыщенную информацию об основном толчке несут афтершоки. Как правило, афтершоки являются предметом тщательных исследований после катастрофических землетрясений. В связи с этим по ним собрана значительная информация. Ранее по размерам области проявления афтершоков судили об объеме очага и магнитуде землетрясения. Популярным было мнение, что афтершоки являются проявлением высвобождения остаточной энергии деформации горных пород. Согласно гидроударной модели, после гидроудара вещество жидкого очага выдавливается в сторону наименьшего сопротивления. При этом нарушается целостность прилегающих к очагу пород и туда поступает дополнительное количество жидкости из очага. Таким путем создаются условия быстрого образования большого количества небольших по объему очагов, что затем проявляется в виде роя афтершоков. Для убедительности приведенных рассуждений подкрепим их рассмотрением конкретных примеров.

Сразу после Газлийского землетрясения 19.03.1984 г. были организованы непрерывные наблюдения в эпицентральной зоне по семи сейсмическим станциям, две из которых были стационарными. За период с 26 марта по 3 апреля были зафиксированы параметры 407 афтершоков. На рис. 5.4 представлена схема распределения эпицентров афтершоков. Интересно отметить, что основная масса эпицентров афтершоков занимала площадь, примерно равную площади поверхности, которая испытала вертикальное поднятие при основном толчке.

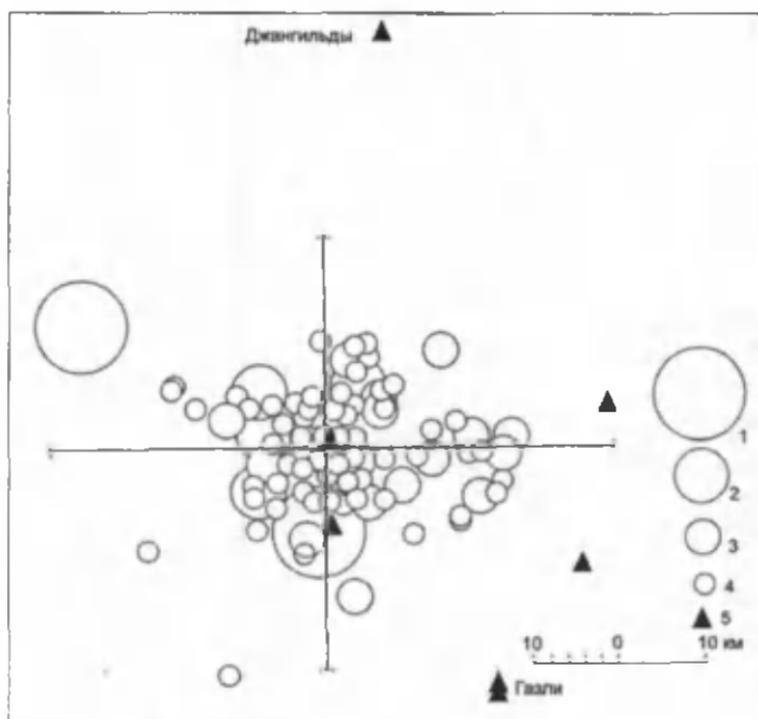


Рис. 5.4. Схема распределения эпицентров афтершоков с  $K \geq 10$  Газлийского землетрясения 19.03.1984 г. (Узбекистан) за период наблюдения с 26.03.1984 г. по 3.04.1984 г., согласно данным работы [126]: 1 -  $K=13$ ; 2 -  $K=12$ ; 3 -  $K=11$ ; 4 -  $K=10$ ; 5 - сейсмические станции слежения.

На рис. 5.5 и 5.6 представлены проекции гипоцентров афтершоков на широтный и меридиональный разрез очаговой зоны, соответственно. Проведем мысленно на этих рисунках прямые линии, симметрично лежащие относительно проекции гипоцентров. Если на рис. 5.5 такая линия будет почти перпендикулярна широте местности, то на рис. 5.6 эта линия будет проходить с севера на юг под углом около  $60^\circ$  к меридиану. Анализ области проявления афтершоков позволяет сделать вполне определенные выводы. Во-первых, подвижка по разлому происходила с севера на юг под углом  $60^\circ$  к горизонту. Во-вторых, гипоцентры большинства афтершо-

ков лежат внутри объема, который хорошо описывается конусом высотой  $h$  и площадью основания  $S$  деформированных на поверхности пород:  $V=hS/3$ . Отсюда становится понятным, почему именно объем конуса был использован нами ранее (п. 5.3) при оценке энергии по формуле (5.6).

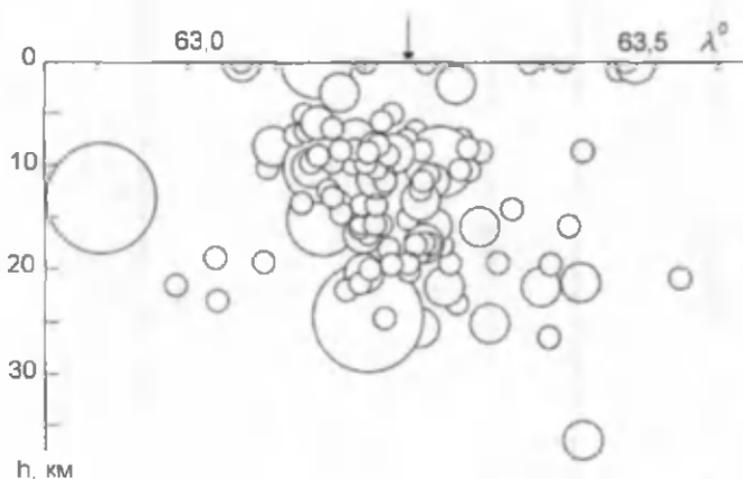


Рис. 5.5. Схема распределения проекций гипоцентров афтершоков Газийского землетрясения 19.03.1984 г. на широтный разрез вертикальной плоскостью очаговой зоны по данным работы [126].

После Ташкентского землетрясения 26.04.1966 г. сейсмологами были получены сведения о гипоцентрах более 1000 афтершоков. На рис. 5.7 представлена схема распределения эпицентров части этих афтершоков, энергетические классы которых лежат в диапазоне  $K=6\div 12$ . Там же нанесены перпендикулярные друг другу профильные линии АВ и СД, длины которых равны 7 и 6 км, соответственно. На рис. 5.8 дана схема распределения проекций гипоцентров афтершоков на вертикальные плоскости, проходящие через линии АВ и СД. Видно, что область проявления афтершоков четко локализована и вытянута с севера-запада на юго-восток. Анализируя область проявления афтершоков, можно сделать следующие вы-

воды. Во-первых, подвижка по разлому происходила с северо-запада на юго-восток под углом  $70^\circ$  к горизонту. Во-вторых, как и в вышерассмотренном случае, гипоцентры большинства афтершоков хорошо описываются конусом высотой  $h$  и площадью основания  $S$ .

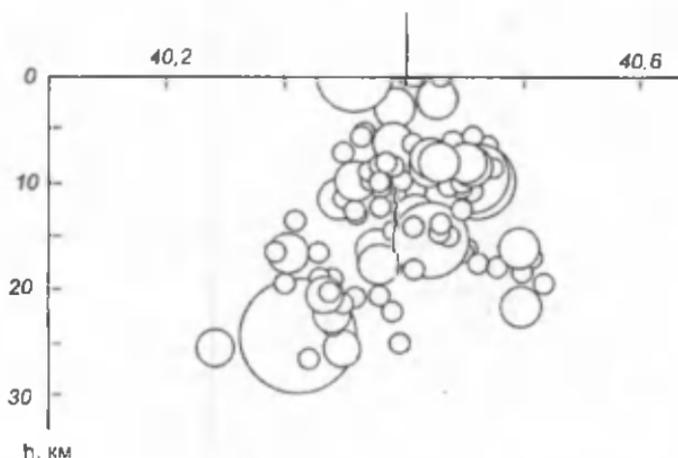


Рис. 5.6. Схема распределения проекций гипоцентров афтершоков Газлийского землетрясения 19.03.1984 г. на меридиональный разрез очаговой зоны вертикальной плоскостью [126].

Большинство мелкофокусных землетрясений можно условно подразделить на два типа. К землетрясениям первого типа отнесем такие, при которых подвижка горных пород в эпицентральной зоне характеризуется взбросом или взбросо-сдвигом, а ко второму типу те, при которых наблюдается сдвиг. Согласно гидроударной модели, взбросовые подвижки происходят при выполнении условия (5.3), а сдвиговые – критерия (5.4). Рассмотренные выше землетрясения относятся к первому типу. Землетрясения в Калифорнии (США) в большинстве своем относятся ко второму типу. Области проявления афтершоков для землетрясений двух рассмотренных типов должны иметь свои отличительные черты. При землетрясениях первого типа, как видно из

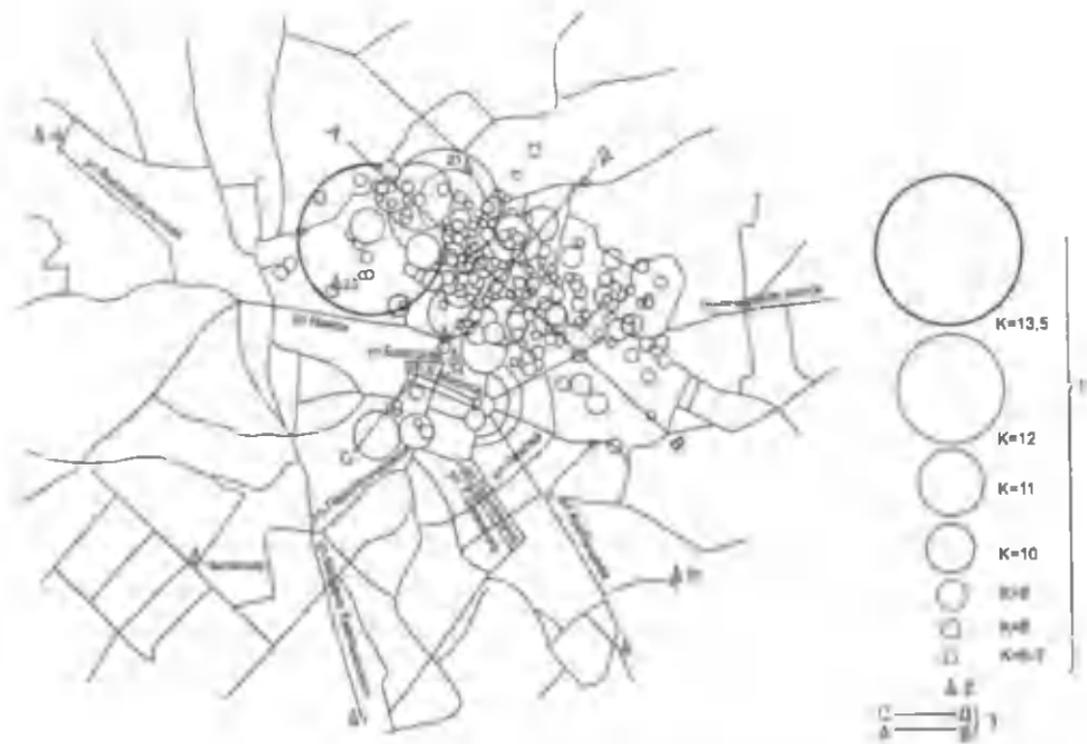


Рис. 5.7. Схема распределения эпицентров афтершоков с  $K=6-12$  Ташкентского землетрясения 26.04.1966 г. по данным работы [114]: 1 – эпицентры афтершоков; 2 – положение сейсмических станций; 3 – профили АВ и СД, перпендикулярные друг другу и пересекающиеся в точке, соответствующей наибольшей плотности афтершоков.

рис. 5.5, 5.6 и 5.8, гипоцентры афтершоков лежат в диапазоне глубин от гипоцентра основного толчка до глубин залегания рыхлых приповерхностных слоев. При землетрясениях второго типа в результате гидроудара в очаге должно происходить перемещение горных пород в горизонтальном направлении. В этом же направлении разрушаются горные породы, выдавливается вещество жидкого очага, и тем самым создаются условия для быстрого образования многочисленных небольших по объему очагов афтершоков в этой области. Из указанного следует, что при землетрясениях второго типа средняя глубина залегания гипоцентров афтершоков должна быть близка к глубине гипоцентра основного толчка.

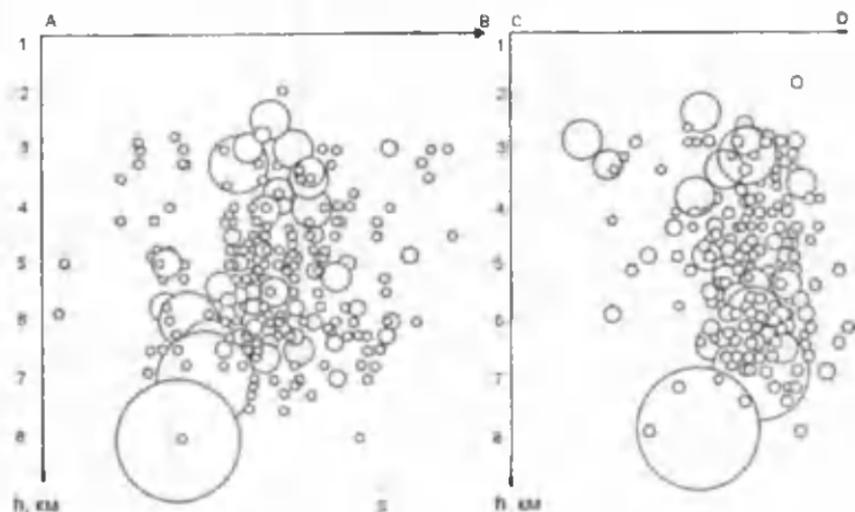


Рис. 5.8. Схема распределения проекций гипоцентров афтершоков с  $K=6+12$  Ташкентского землетрясения 26.04.1966 г. на вертикальные плоскости, пересекающиеся с земной поверхностью по линиям АВ и СД, по данным работы [114].

В качестве примера на рис. 5.9 приведены проекции гипоцентров афтершоков с  $M \geq 2$  Мугуйского землетрясения в Калифорнии (США) 21.02.1973 г. на вертикальные плоскости, проходящие вдоль (а) и поперек (б) плоскости скольжения. Данное землетрясение имело

магнитуду  $M=6$  при гипоцентре  $h=17,4$  км. Землетрясение сопровождалось подвижкой типа сдвиго-взброса. Было подробно изучено распределение 141 афтершока во времени и пространстве [195].

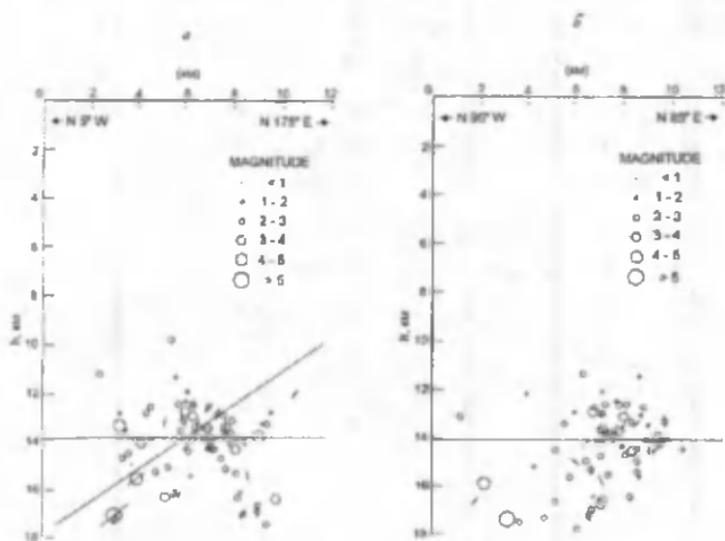


Рис. 5.9. Схема распределения проекций гипоцентров афтершоков с  $M \geq 2$  Музейского землетрясения в Калифорнии (США) 21.02.1973 г. на вертикальные плоскости, проходящие вдоль (а) и поперек (б) разлома [195].

Сопоставление глубин залегания афтершоков при землетрясениях 1-го и 2-го типов подтверждает вышесказанное. При землетрясениях обоих типов область проявления афтершоков хорошо описывается конусом, вершина которого находится в гипоцентре основного толчка. Этот факт также не является случайным. После гидроудара в очаге происходит разрушение целостности прилегающих к нему пород. Причем разрушение распространяется от очага в определенном угловом диапазоне, что и вызывает наблюдаемое распределение афтершоков.

Как известно, гипоцентры землетрясений с сильно различающимися магнитудами могут происходить на

одной глубине. Для того, чтобы объяснить этот факт, обратимся к критерию (5.2). Из него следует, что для возникновения события необходимо наличие определенного уровня давления в жидком очаге, определяемого тектоническими силами.

Приведем выражение (5.10) к виду

$$E_n = \Delta V_o \mu \epsilon / 2 . \quad (5.12)$$

Из (5.12) следует, что при прочих равных условиях энергия, а значит, и магнитуда землетрясения определяется объемом очага. К такому же выводу можно прийти, если преобразовать формулу (5.6) следующим образом:

$$E_k = \Delta h \rho g V = \Delta h \rho g h S / 3 = \rho g h \Delta V_d / 3 . \quad (5.13)$$

Из (5.13) следует, что энергия  $E_k$  также линейно зависит от объема деформированных на поверхности пород  $\Delta V_d$ , а значит, и от объема очага  $-\Delta V_o$ .

Критерий (5.2) является необходимым, но не достаточным условием образования события. Возможна такая ситуация, когда жидкий очаг существует, а землетрясение не происходит. Причиной такого состояния могут быть как высокий уровень сил сцепления пород друг с другом, так и недостаточная величина механических напряжений, вызванных тектоническими силами. В то же время существование ряда сейсмически активных разломов, в которых происходит большинство мелкофокусных землетрясений, говорит о наличии некоторых еще не раскрытых физических факторов, способствующих этому. Этот вопрос будет подробно освещен в следующей главе.

## ТРАКТОВКА ОСНОВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЯВЛЕНИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И СОПУТСТВУЮЩИХ ИМ ЯВЛЕНИЙ С ПОЗИЦИЙ ГИДРОУДАРНОЙ МОДЕЛИ

### 6.1. РАЗЛОМ, ГЕНЕРИРУЮЩИЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Уже давно подмечено, что большинство мелкофокусных землетрясений приурочено к разломам. Более того, часто землетрясения происходят в зоне одного разлома. Классическим примером указанному может служить разлом Сан-Андреас в Калифорнии (США), который был кратко описан нами ранее (п. 2.1). Землетрясения в зоне данного разлома подробно изучаются уже на протяжении более ста лет [33, 99]. Исследования [например, 147] позволили установить, что значительный сдвиг в зоне разлома произошел за последние несколько миллионов лет. Причем периоды значительных сдвиговых смещений перемежались с периодами относительного затишья. Считается, что землетрясения в системе разломов Сан-Андреас вызваны взаимодействием тихоокеанской и североамериканской плит, и при этом океанская плита как бы скользит относительно материковой.

Другим классическим примером разлома, генерирующего землетрясения, является Каржантаусский разлом в Центральной Азии [102]. Здесь периодически происходят внутриплитовые землетрясения. Подобных примеров можно привести множество. С другой стороны, можно привести множество разломов, которые не генерируют землетрясения. Рассмотрим эти противоре-

чивые данные с позиций гидроударной модели. Согласно модели, для образования землетрясения необходимо выполнение критерия (5.2). Этот критерий определяет нижний предел значения тектонического напряжения, при котором может произойти событие. Другим необходимым условием для генерации землетрясения является формирование жидкого очага. В зоне разлома создаются благоприятные условия для образования жидкого очага. Во-первых, породы в зоне разлома находятся в менее плотном состоянии. Во-вторых, они обладают большей пористостью, что создает благоприятные условия для инфильтрации жидкости сквозь них. Поэтому в зоне разломов, которые постоянно или периодически пополняются водой, создаются условия, необходимые для формирования жидкого очага. Тем не менее, приуроченность многих землетрясений к зоне конкретного разлома говорит о наличии там еще одного фактора, способствующего периодической разрядке на нем тектонических землетрясений.

Таким фактором, на наш взгляд, является формирование в зоне разлома своеобразного природного гидравлического пресса. На рис. 6.1 изображена схема часто используемого в технике устройства – гидравлического пресса. Действие пресса основано на законе Паскаля. В технике используется гидравлический пресс, состоящий из двух цилиндров разного диаметра с поршнями и гидравлического соединения между ними. Все пространство внутри пресса заполняется жидкостью. Обозначим через  $S_1$  и  $S_2$  площадь малого и большого поршня, соответственно. Приложим к малому поршню давление  $p$ . Тогда, согласно закону Паскаля, внутри пресса давление во все стороны будет одинаковым и равно  $p$ . Поэтому со стороны жидкости на больший поршень будет дей-

ствовать сила, равная:  $F_2 = pS_2$ . Если учесть, что к малому поршню была приложена сила  $F_1 = pS_1$ , то мы получили выигрыш в силе, равный:  $F_2 / F_1 = S_2 / S_1$ .

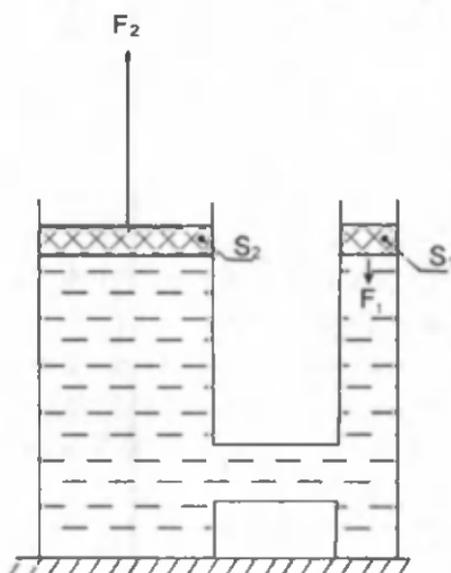


Рис. 6.1. Схема работы распространенного в технике устройства – гидравлического пресса.

В зоне разлома могут создаваться условия для образования не только жидкого очага, но и природного гидравлического пресса. Уже давно сейсмологами замечен факт приуроченности сейсмичности к местам резкого перепада рельефа, будь то на суше, побережье или под океаном [99, с. 161]. Резкие перепады рельефа местности говорят, во-первых, о наличии разлома и, во-вторых, о питании этого разлома поверхностными водами. Обратимся к конкретному примеру – Каржантаусскому разлому. Разлом приурочен к зоне перехода Тянь-Шанского орогена к Туранской плите. По участку Каржантаусского разлома северо-восточного простирания разрабатывает свое русло р.Бозсу [102]. Таким образом, резкие перепады высоты местности создают необ-

ходимые гидрогеологические условия питания разлома водами. В настоящую эпоху Туранская плита испытывает воздействие со стороны Индостанской.

Отметим, что жидкий очаг и его размеры формируются постепенно. Выполнение критерия (5.2) и наличие жидкого очага являются необходимыми, но не достаточными условиями образования события. Представим себе, что в зоне разлома сформировался жидкий очаг, имеющий форму параллелепипеда (рис. 6.2). Пусть малая грань этого параллелепипеда  $S_M = bc$  перпендикулярна направлению действия тектонического напряжения -  $t$ . Тогда величину тектонической силы  $F_T$ , действующей на очаг, можно найти из очевидного выражения:

$$F_T = S_M \cdot t = t \cdot b \cdot c . \quad (6.1)$$

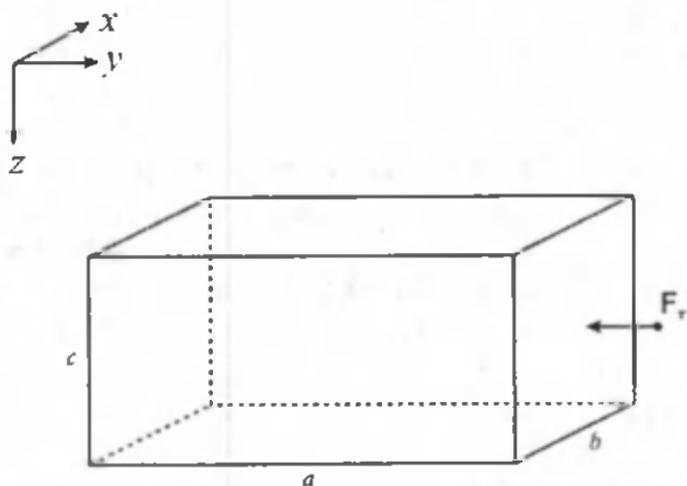


Рис. 6.2. Схема работы природного гидравлического пресса, представленного в форме параллелепипеда.

Со стороны жидкого очага на все грани параллелепипеда действуют одинаковое давление, но разные по величине силы. Так, на большую грань  $S_B = ab$  действует сила, равная  $F_B = tab$ , на среднюю грань  $S_C = ac$  — сила  $F_C = tac$ , а на малую грань  $S_M$  действует сила, равная по величине  $F_T$ . Таким образом, благодаря наличию природного гидравлического пресса произошло увеличение силы во столько же раз, во сколько площадь большей грани превосходит площадь малой. Изменение размеров очага может привести к изменению отношения  $S_B/S_M$ , а значит, и силы  $F_B$  до уровня, достаточного для образования события. Естественно, что геометрическая форма очага может быть произвольной. Тем не менее, как несложно убедиться, приведенные рассуждения справедливы для очага с любой геометрией. Из сказанного становится понятным, почему ряд разломов периодически генерирует землетрясения.

Рассмотрим причины, приводящие к наблюдению сдвиговых или взбросовых подвижек при землетрясениях. Обратимся вновь к рис. 6.2. Как уже отмечалось выше, силы, действующие со стороны очага на грани, прямо зависят от их площадей. Рассмотрим случай, когда грань  $S_B = ab$  много больше граней  $S_M = bc$  и  $S_C = ac$ . Тогда сила  $F_B$  по величине будет много больше сил  $F_C$  и  $F_T$ . Сила  $F_B$  направлена от очага к поверхности Земли и перпендикулярна ей. Если под действием этой силы произойдет землетрясение, то подвижка пород в эпицентральной области будет носить взбросовый характер. Возможен случай, когда наибольшей из сил будет  $F_C$ . Если событие произойдет под действием силы  $F_C$ , то подвижка пород будет носить сдвиговый характер. Это связано с тем, что сила  $F_C$  направлена по горизонтали, т.е. параллельно поверхности Земли. Понятно, что возможны промежуточные случаи, тогда подвижка будет типа взбросо-сдвига или сдвига-взброса.

## 6.2. ГЛУБОКОФОКУСНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Глубокофокусные землетрясения менее изучены, чем мелкофокусные. Напомним, что основная информация о мелкофокусных землетрясениях была получена путем наблюдений в ближней зоне. В случае же глубокофокусных землетрясений очаг всегда расположен на заметном расстоянии от станций слежения и поэтому информацию получают путем наблюдения только объемных волн. Кроме того, в этом случае и макросейсмические наблюдения являются малоинформативными в силу удаленности очага. К тому же глубокофокусные землетрясения происходят заметно реже мелкофокусных.

Картина излучения первых вступлений Р и S-волн глубокофокусных землетрясений аналогична мелкофокусным. В связи с этим резонно считать, что в очаге действуют две пары сил, как и в случае мелкофокусных землетрясений. В отличие от мелкофокусных глубокофокусные землетрясения не могут генерироваться разломами в земной коре. Об этом свидетельствуют данные сейсмологических наблюдений, полученных при изучении механизма очага. При мелкофокусных землетрясениях одна из найденных фокальных плоскостей, как правило, совпадает с простираем плоскости разлома. При глубокофокусных же землетрясениях наблюдается различный механизм очага, т.е. направление осей сжатия и растяжения могут быть самыми различными, причем ни одна из выявленных фокальных плоскостей не совпадает с плоскостью простираения глубоких разломов [например, 15, 62].

Для объяснения физики глубокофокусных землетрясений часто привлекались те же идеи, что были апробированы на мелкофокусных. Очевидно, что поводом для этого было квадрантное распределение областей сжатия и расширения Р и S-волн (рис.2.1). Поэтому ряд иссле-

дователей полагали, что и при глубоких землетрясениях могла происходить подвижка типа сдвига. В связи с этим было уделено большое внимание различным вариантам разрушения пород на глубине. Согласно концепции тектоники литосферных плит, глубокофокусные землетрясения часто бывают вызваны взаимодействием океанических плит с островными дугами (рис. 3.2). Океаническая плита при таком взаимодействии погружается в мантию и при этом, естественно, постепенно меняются физические условия ее состояния: давление —  $p$ , и температура —  $t$ . Изменение  $p$ ,  $t$ -условий может привести к изменению состояния вещества: дегидратации, фазовым переходам и пр. Некоторые исследователи считают, что уже на глубине 100 км дегидратация минералов будет полностью завершена [151]. Однако мы полагаем, что это далеко не так. Для такого утверждения у нас есть несколько доводов. Известно, что все горные породы содержат в нормальных условиях связанную воду. Отделить полностью связанную воду от породы не удалось, ни применяя гигантские прессы (до  $10^8$  кг/м<sup>2</sup>), ни высокие центробежные ускорения (до  $3 \cdot 10^6$  м/с<sup>2</sup>), ни значительные термообработки (до 170 °С) [53]. Кроме того, теплообмен между плитой и окружающей ее астеносферой протекает достаточно медленно. Это означает, что на одной и той же глубине температура в плите и мантии могут существенно различаться. В то же время давление, существующее в мантии на любой глубине, практически мгновенно передается плите. В связи с этим нельзя исключать, что и на глубинах до 700 км возможно наличие воды в литосферных плитах.

Для объяснения происхождения глубокофокусных землетрясений привлекались идеи о прерывистом скольжении, пластическом разрушении горных пород под давлением, фазовые переходы. Представления о прерывистом скольжении обосновывались лабораторными опытами. Д.Григс и Д.Бейкер [151] выдвинули

идею сдвигового плавления, при котором должна наблюдаться экспоненциальная зависимость скорости деформации от температуры, т.е. процесс может иметь взрывной характер. Однако в этом случае трудно объяснить наблюдаемую картину излучения Р и S-волн. Интересную идею выдвинул Дж.Сэвидж [189], согласно которой в погружающейся плите сохраняются полости ослабленных пород, где в дальнейшем могут происходить подвижки.

Рассмотрим широкофокусные землетрясения с предложенных нами теоретических представлений. В погружающейся плите за счет процессов дегидратации может идти образование свободной жидкости. Наличие больших гидростатических давлений в мантии способствует образованию трещин в горных породах погружающейся литосферной плиты. В эти трещины попадают водные растворы, которые снижают прочность пород. В какой-то момент времени горные породы в очаге приобретают свойства жидкого тела. Тогда, согласно закону Паскаля, в любой точке очага во все стороны будет действовать одинаковое давление. Естественно, что и при широкофокусных землетрясениях жидкий очаг может выполнять роль природного гидравлического пресса, т.е. многократно усиливать действующую на него силу в каком-либо направлении. Если в этом направлении рядом с очагом будет находиться полость ослабленных пород, то может произойти гидроудар, т.е. землетрясение. Представленная картина заманчива тем, что хорошо объясняет наблюдаемое квадрантное распределение областей сжатия и расширения первых вступлений Р и S-волн. Широкий диапазон глубин залегания гипоцентров широкофокусных землетрясений, возможно, связан со следующим. Взаимодействие конкретных литосферных плит с островными дугами или друг с другом имеет свою геологическую историю. При этом скорости погружения различных литосферных плит в

мантию могут заметно различаться. Теплопередача же между мантией и погружающейся в нее плитой зависит как от времени их взаимодействия, так и от мощности плиты. Поэтому участки различных плит, находящихся на одной глубине в мантии, будут иметь различную температуру. Фазовое же состояние вещества во многом зависит от температуры. Поэтому образование жидкого очага глубокофокусных землетрясений также во многом зависит от  $p$ ,  $t$ -условий. Наверное, поэтому глубокофокусные землетрясения происходят в широком диапазоне глубин. В результате гидроудара в очаге горные породы смещаются в направлении простирания ослабленной зоны, находящейся недалеко от очага. При этом ось сжатия, определенная по первым вступлениям сейсмических волн, должна быть направлена от жидкого очага в направлении простирания этой зоны.

Отметим одну особенность глубокофокусных землетрясений. Ранее нами было показано, что тектонические силы, вызывающие мелкофокусные землетрясения, имеют субгоризонтальное направление (см. п.п. 4.2; 6.1). В случае же глубокофокусных землетрясений события вызываются напряжениями, существующими в мантии. Из вышеизложенного следует, что гидроударная модель хорошо объясняет как образование, так и наблюдаемый механизм очага глубокофокусных землетрясений.

### **6.3. СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОМЕНТ, МЕХАНИЗМ ОЧАГА, ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ, ГИПОЦЕНТР И ЭПИЦЕНТР ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**

*Сейсмический момент.* Ранее (п.1.5) было показано, что количественная оценка сейсмического момента имеет ряд неопределенностей. Во-первых, это предположение, что ортогональная пара сил приложена к точкам очага, отстоящим друг от друга на неопределенном расстоянии, которое априори принимается равным половине величине дислокации  $U$ , т.е. смещения. Определение

величины подвижки по сейсмограммам также производится путем введения ряда предположений. С позиций гидроударной модели понятие сейсмического момента теряет всякий смысл, так как еще до толчка очаг должен приобрести свойства жидкого тела.

*Механизм очага* по определению характеризует систему сил, приложенных к нему в момент гидроудара, т.е. начала землетрясения. При гидроударе к очагу приложены две пары сил. В связи с этим и наблюдается квадрантное распределение первых вступлений волн сжатия и растяжения. Однако в отличие от рассмотренных ранее схем действия сил (рис.2.2) каждая пара сил между собой может быть и не ортогональна. Для такого утверждения имеются следующие доводы. Примем условно в качестве разлома зону между двумя вертикальными плоскостями, ортогональными земной поверхности. Пусть на жидкий очаг, находящийся в разломе, действует ортогонально плоскости разлома и коллинеарно горизонту (земной поверхности) тектоническая сила. Разберем вначале событие, когда в результате него произошло сдвиговое перемещение в зоне разлома. В этом случае на жидкий очаг будет действительно действовать две пары ортогональных друг другу сил. Представим себе теперь, что в результате землетрясения в зоне разлома произошла подвижка типа взброса, т.е. в перпендикулярном земной поверхности направлении. В данном случае, как и в разобранный выше, на очаг будет действовать пара ортогональных сил. Во всех промежуточных вариантах, когда наблюдаются подвижки типа взбросо-сдвиг, сдвиго-взброс, сдвиго-сброс, сбросо-сдвиг и пр., пара сил, действующих в очаге, как не сложно убедиться, также будет ортогональна друг другу. Однако тектонические силы могут действовать под произвольным углом к плоскости разлома, и разломная поверхность может быть не вертикальной, а составлять произвольный угол с горизонтом. В этом случае в мо-

мент гидроудара в очаге будут действовать также две пары сил, которые, однако, могут быть ортогональными только в некоторых случаях.

Магнитуда, несмотря на то, что она является величиной относительной, стала основной характеристикой землетрясения, оперативно получаемой из данных сейсмометрических наблюдений. Зная магнитуду, можно, используя эмпирическую формулу (1.9), определить сейсмическую энергию. Из выражения (5.12) можно также найти полную энергию землетрясения, зная объем очага  $\Delta V_0$ . Расчет энергии  $E_c$ , затрачиваемой на подвижку пород при землетрясениях, показал, что она одного порядка с сейсмической энергией  $E_s$  (п. 5.3). Этот вывод согласуется с литературными данными [46, 149, 167]. Поэтому в первом приближении формулу (5.12) можно преобразовать к виду

$$E_c \approx \Delta V_0 \mu \epsilon . \quad (6.2)$$

Комбинируя выражения (1.9) с (6.2), найдем соотношение, связывающее магнитуду с объемом очага для мелкофокусных землетрясений

$$M \approx 2(\lg \Delta V_0 \mu \epsilon - 4.8) / 3 . \quad (6.3)$$

Из (6.3) следует, что магнитуда землетрясений находится в логарифмической зависимости от объема очага.

*Продолжительность землетрясения* является важной характеристикой, значимость которой нередко упускается из виду. Важность этого параметра отмечали еще Г.Ингл [144] и Ф.Рихтер [99]. Продолжительность землетрясения наряду с магнитудой является решающим фактором, определяющим степень повреждения зданий. При гидроударе в очаге образуются первые объемные волны. Затем происходит разрушение горных пород прилегающих к очагу. Причем разрушение происходит

в направлении гидроудара. Направление, по которому происходит гидроудар и разрушаются горные породы, определяет ось сжатия. Необходимо особо оговорить различие между объемом горных пород, излучающих сейсмические волны, и объемом очага. Интервал времени, при котором происходит разрушение горных пород после гидроудара, определяет продолжительность землетрясения.

О распространении разрушений со скоростью не больше скорости распространения упругих волн писал еще Х.Рейд [185]. Впервые эффект распространения разрушений был зарегистрирован Х.Беньофом и др. [137] при Чилийском землетрясении 22.05.1960 г. Авторы [137] показали, что зафиксированная разность фаз вертикальной и горизонтальной компонент свободных колебаний Земли, вызванных Чилийским событием, хорошо объясняется в предположении о распространении разрушения. Метод сравнения фаз, примененный в работе [137], возможен лишь при очень сильных землетрясениях. Для мелкофокусных землетрясений средней силы часто используют метод построения функции сравнения. Основой метода является сравнение амплитуд спектров поверхностных волн, распространяющихся от источника в разных направлениях. Развитие метода и его применение к конкретным землетрясениям позволило оценить скорость распространения разрушений:  $v \approx 3,5$  км/с. Более подробно вопрос о распространении разрушений можно найти в литературе [12, 46]. Здесь же отметим, что представления о распространении разрушений прямо следуют из гидроударной модели: вначале следует гидроудар, рождающий первые объемные волны, а затем идет разрушение горных пород, которое может носить ступенчатый характер.

Рассмотрим конкретный пример хорошо изученного Ташкентского землетрясения 26.04.1966 г., гипоцентр которого находился на глубине 8 км, а подвижка по раз-

лону носила преимущественно взбросовый характер. Ранее было показано, что область проявления афтершоков прямо связана с областью разрушения горных пород. Линейный размер области разрушения при подвижках типа взброса приблизительно соответствует гипотенузному расстоянию  $h$  (рис. 5.4-5.7). Поэтому продолжительность Ташкентского землетрясения можно оценить из выражения

$$\tau \approx h/v_r \approx 2,3 \text{ с.} \quad (6.4)$$

Продолжительность Ташкентского землетрясения, зарегистрированное по колебаниям почвы в эпицентральной области, и по шуму, издаваемому подземным гулом, оказалась равной  $6 \div 8$  с [109]. Расхождение в  $2 \div 3$  раза может быть вызвано как субъективными ощущениями людей, так и ступенчатым характером распространения разрушений. Возможно также, что скорость распространения разрушений при Ташкентском землетрясении была достаточно низкой —  $1$  км/с. Необходимо отметить, что определение продолжительности землетрясения методом построения функции направленности можно использовать при таких подвижках, основной компонентой которых является сдвиг. При подвижках типа взброса использование этого метода вряд ли целесообразно. Связано это с тем, что расположение станций вокруг эпицентра будет симметричным относительно направления распространения разрушений. Формула (6.4) позволяет оперативно оценить продолжительность землетрясений  $\tau$ , при которых происходят подвижки типа взброса. В случае землетрясений, при которых наблюдается сдвиг, время  $\tau$  можно оценить из выражения

$$\tau \approx l_{\text{эф}}/v_r, \quad (6.5)$$

где  $l_{\text{аф}}$  – линейный размер афтершоковой области. Формула (6.5) позволяет оценить продолжительность главного толчка по данным регистрации афтершоков и сравнить ее с данными, полученными другими методами. Так, для Чилийского события 1960 г. протяженность афтершоковой области составляла 1000 км. В этом случае время этого землетрясения, согласно (6.5), будет 285 с, что неплохо согласуется с данными работы [137]. Формула (6.4) позволяет оперативно и просто оценить продолжительность землетрясений, при которых наблюдаются подвижки типа взброса. Особенно важно это для таких регионов, как Центральная Азия, где землетрясения часто сопровождаются взбросовыми подвижками.

*Установление местоположения гипоцентра и эпицентра землетрясений* в свое время было достаточно неоднозначным. Для того, чтобы разрешить эту неопределенность, исследователи пришли к соглашению принимать за гипоцентр точку, откуда приходят первые вступления Р и S-волн. В результате оказалось, что при землетрясениях, сопровождающихся сдвиговыми подвижками, эпицентр всегда находился на краю плейстосейстовой области, а в случае взбросовых подвижек – в ее центре [99]. Рассмотрим эти экспериментальные факты с позиций гидроударной модели. Действительно, при гидроударе в очаге образуются первые упругие волны, которые регистрируются на станциях как первые вступления Р и S-волн. При направлении гидроудара от гипоцентра к эпицентру последний будет находиться в центре плейстосейстовой области. Если же гидроудар направлен горизонтально, т.е. параллельно земной поверхности, то эпицентр будет находиться на краю плейстосейстовой области. Поэтому при сдвиговых подвижках эпицентр находится на краю плейстосейстовой области, а при взбросовых – в центре. Очевидно, что во

всех промежуточных типах смещений эпицентр землетрясения будет находиться не на краю и не в центре плейстосейстовой области.

#### **6.4. ГЕОГРАФИЯ И СТАТИСТИКА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

География землетрясений изучает закономерности их распределения по земному шару. До развития инструментальной сейсмологии о географии землетрясений судили исключительно по данным макросейсмических наблюдений. В связи с этим сейсмичность густо населенных территорий была явно завышенной. С развитием инструментальной сейсмологии была получена обширная информация о сейсмичности Земли, которая показала ограниченность данных, базирующихся только на макросейсмических наблюдениях. География землетрясений достаточно хорошо была изучена уже к середине XX века и подробно изложена в ряде статей и монографий. Оказалось, что большинство землетрясений приурочены к океанам. Наиболее сейсмичным является тихоокеанский пояс со многими ответвлениями. Сейсмичными зонами также являются: зона Центральной Азии (Памиро-Байкал); Альпийский пояс Европы; активная площадь в Восточной Азии (Гималаи); зоны разломов Восточной Африки; Атлантическо-Арктический пояс и пр. С появлением и развитием концепции тектоники литосферных плит (КТЛП) образование землетрясений стали объяснять межплитовыми взаимодействиями. Данная концепция настолько хорошо объясняла многие факты наблюдений, что, казалось, осталось выяснить лишь небольшие детали. Однако до последнего времени эти «детали» оставались нерешенными. К ним относятся внутриплитовые и вынужденные землетрясения, а также вопрос о механизме тектогенеза.

Исследуя географию землетрясений в различные исторические эпохи, Ч.Рихтер [99, с. 375] пришел к интересным выводам, которые не потеряли своего значения и сегодня. Согласно ему, «с точки зрения исторической геологии наши карты с их сейсмическими поясами и сейсмоактивными зонами – это только моментальные снимки...» «...Мы можем сказать в отношении нашего современного представления о сейсмичности Земли, это то, что оно фиксирует временное необычное состояние. Каменная летопись природы не оставляет ни малейшего сомнения в том, что в прошлом, особенно в отдаленные от нас эры, география тектоники сильно отличалась от современной». Даже сегодня, обладая заведомо большей информацией, чем в свое время Рихтер, трудно так точно и кратко осветить вопрос о сейсмичности Земли в различные геологические эпохи. Ч.Рихтер связывал сейсмичность той или иной территории с тектоническими процессами: образованием гор и разломов. К своим выводам он пришел, анализируя орогению и образование разломов в различные эпохи. С позиций тектоники литосферных плит (КТЛП) приведенные выше выводы Ч.Рихтера не всегда находили разумного объяснения. Рассмотрим их с точки зрения модернизированной концепции мобилизма (МКТЛП). Согласно МКТЛП, тектоника плит вызвана неравномерным замедлением суточного вращения Земли (п.4.2). В различные геологические эпохи угловая скорость вращения мантии была то больше, то меньше угловой скорости вращения жидкого ядра. Благодаря силам трения между ядром и мантией происходило перераспределение момента количества движения между ними. В свою очередь, благодаря астеносферному слою, происходит взаимодействие между литосферными плитами и мантией. Изменение угловой скорости вращения мантии приводит к перераспределению момента количества движения между ней и литосферными плитами. В результате взаимодействие

между теми или иными литосферными плитами в различные геологические эпохи могло иметь характер то сжатия, то растяжения. Отмеченное полностью объясняет выводы, к которым ранее во многом интуитивно пришел Ч.Рихтер [99].

Введение шкалы магнитуд дало универсальный способ классификации землетрясений. Классификация землетрясений позволила открыть и развить новую отрасль сейсмологии – статистику землетрясений. Статистика землетрясений тесно связана с географией. Она изучает вопросы распределения землетрясений во времени и пространстве, определяет риск тех или иных событий на конкретных территориях. Благодаря классификации землетрясений выяснилось, что с увеличением магнитуды землетрясений на единицу их количество за равный промежуток времени уменьшается примерно в восемь раз. Выяснилось также, что более 80% землетрясений приходится на Тихоокеанский сейсмический пояс, а на Трансазиатский – на порядок меньше.

Объясним эти факты наблюдений с позиций гидродинамической модели. Как следует из выражения (6.3), магнитуда землетрясений находится в логарифмической зависимости от его объема. В п. 6.1 было подробно объяснено, почему ряд разломов периодически генерирует землетрясения. Напомним, что большинство мелкофокусных землетрясений генерируется в разломах. Поэтому факт уменьшения количества землетрясений с ростом магнитуды прямо связан с уменьшением вероятности образования очага землетрясения большего размера. Образование события возможно при наличии жидкого очага и необходимого уровня тектонических напряжений. Вероятность образования жидкого очага возрастает с увеличением количества ослабленных пород и свободной воды в них. Необходимый уровень тектонических напряжений для генерации события определяется критерием (5.2). По-видимому, в Тихоокеанском

кольцевом поясе вероятность выполнения этих условий значительно выше, чем в других сейсмических зонах и поясах.

### **6.5. О ЯВЛЕНИЯХ, СОПУТСТВУЮЩИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМ**

Землетрясения часто сопровождаются сопутствующими явлениями, к которым относятся: обвалы, сели, оползни, свечение небосвода, изменение уровня и химического состава воды в колодцах и скважинах, вариации электромагнитного поля Земли и пр. Подробное их рассмотрение не входит в задачу настоящих исследований. В связи с этим кратко опишем некоторые из них с позиций представленной модели.

*Свечение небосвода* наблюдалось при ряде землетрясений [например, 98 с. 38; 109 с. 182; 142]. Свечение пытались объяснить за счет местных гроз, искрения линий электропередач, трибоэлектричества и пр. Однако эти гипотезы при первом же рассмотрении не выдерживали критики. Так, свечение наблюдалось и при отсутствии гроз и линий электропередач. Часто свечения наблюдались и при землетрясениях небольшой силы. Вот как описывает свечение один из очевидцев Ташкентского землетрясения 1966 г. «Я услышал с левой стороны сильный шум, напоминающий работу мотора. Тотчас же в той же стороне возникла необычайно яркая вспышка ослепительно белого света, которая в течение нескольких секунд ( $4\div 5$  с) возрастала по яркости до такой силы, что мне пришлось прикрыть глаза. Затем произошел толчок, едва не сбивший меня с ног. После толчка свет быстро стал меркнуть...». Свидетелей свечения небосвода этого события было так много, что сомневаться в реальности этого явления нет оснований. При Бричмуллинском землетрясении 24.10.1959 г., которое произошло примерно в ста километрах от г. Ташкента, по рассказам местных жителей светились склоны окру-

жающих горных хребтов. Отметим, что явление свечения атмосферы перед землетрясениями наблюдались в основном в горных и предгорных районах.

Объяснить явление свечения атмосферы можно с позиций пьезоэлектричества [85]. Один из основных минералов земной коры – кварц ( $\text{SiO}_2$ ) – обладает пьезоэлектрическими свойствами. Лабораторными экспериментами обнаружено и изучено наличие пьезоэлектрических свойств у многих кварцсодержащих горных пород [25, 73, 74]. Разработка и внедрение пьезоэлектрического метода разведки позволили обнаружить пьезоэлектрические свойства ряда горных пород в естественных условиях их залегания [106]. В работах [81-84, 95, 96] и монографии Д.Расулова [88] как качественно, так и количественно показано, что образование ряда естественных электрических полей Земли хорошо объясняется с позиций пьезоэлектричества. Пьезоэлектрический эффект кристалла диэлектрика характеризуется образованием разноименных электрических зарядов на его противоположных гранях под воздействием механических напряжений. Тектонические силы вызывают напряжения в горных породах. В жидком очаге эти напряжения передаются окружающим горным породам во всех направлениях. Перед толчком напряжение достигает своего максимального значения. Поэтому кварцсодержащие горные породы вокруг очага приобретают заметную пьезоэлектрическую поляризацию. При этом пьезоэлектрическая поляризация может охватывать и породы, залегающие близко к поверхности Земли. Благодаря этому в этом месте образуется аномальное электрическое поле. Из курса физики известно [116], что экстремальные значения напряженности электрического поля наблюдаются у неровностей поверхности, имеющих вид острия. В естественных условиях в качестве острия выступают возвышенности. К тому же, на возвышенных участках местности рыхлые отложения

отсутствуют или имеют небольшую мощность, что препятствует экранировке электрического поля. По достижении критического значения напряженности поля возникает коронный электрический разряд, что и создает эффект свечения атмосферы. Из изложенного ясно, почему при одних землетрясениях свечение небосвода наблюдается, а при других, даже больших по силе, — нет. Небольшую продолжительность свечения небосвода можно объяснить следующим. Непосредственно перед гидроударом в очаге механические напряжения, которые жидкий очаг передает вышележащим породам, достигают максимума. В это время пьезоэлектрический эффект этих пород, содержащих пьезоэлектрические текстуры типа  $(\infty \cdot m)T$ , также достигает максимума (Приложение 1). Сразу после гидроудара в очаге механические напряжения в них спадают, а значит, падает по величине и пьезоэффект. Кроме того, образующиеся на поверхности Земли электрические заряды нейтрализуются за счет наличия свободных зарядов в атмосфере. Указанные факторы и определяют непродолжительность свечения атмосферы при землетрясениях.

*Оползни* часто сопровождают крупные землетрясения [99, 182]. Под оползнем мы будем подразумевать сползание массива приповерхностных горных пород по склону. Отметим, что оползни часто происходят и без землетрясений. Описанию оползней посвящено множество статей и ряд монографий [например, 42, 67, 152]. Проблема физики оползней до конца не решена и требует отдельного рассмотрения. Здесь же мы кратко опишем физические факторы, которые способствуют образованию оползней при землетрясениях. Важность некоторых физических факторов, способствующих сползанию тела оползня, отмечалась и ранее. Так, в монографии Е.Емельяновой [42] упомянут такой фактор, как ускорение. Каких-либо пояснений к этому утверждению

автор [42] не приводит. Действительно, землетрясения вызываются тектоническими силами. Поэтому, согласно второму закону Ньютона, тело приобретает ускорение при действии на него силы. Известно, что оползни могут сопровождать землетрясения и при сравнительно небольшой их магнитуде. Кроме того, одни оползневые тела могут придти в движение, а другие нет при конкретном землетрясении. Другой важный фактор, способствующий образованию оползня при взрывах, дан в работе Б.Нуртаева [76, с. 237]. Таким фактором является явление резонанса. При взрывах и землетрясениях тело оползня начинает колебаться с некоторой частотой, которое может совпасть с частотой собственных колебаний. При этом наступает явление резонанса и, согласно автору [76, с. 237], тело оползня разрушается. На наш взгляд, представленные выше физические факторы недостаточно полно раскрыты и нуждаются в уточнении и дополнении.

Основное количество оползней наблюдается в горных и предгорных районах. Тело оползня формируется на склонах и слагается из рыхлых отложений, например, лёссов. Горные породы, слагающие тело оползня, и породы, подстилающие его, имеют различный генезис. Исследованиями установлено, что оползни происходят на склонах, углы падения которых лежат в определенных интервалах [42]. Оползни часто происходят в весенне-летний период после обильных дождей и таянья снегов. Связано это с тем, что в этот период тело оползня насыщается влагой, и уменьшаются силы сцепления его с подстилающими породами. Для объяснения физики процесса оползня в первом приближении можно рассмотреть пример тела, лежащего на наклонной плоскости, и проанализировать силы, приводящие его в движение. Решение подобной задачи имеется в школьном курсе

физики, суть которой изложена ниже. На плоскость действует сила тяжести тела (оползня)  $P$ , которую можно разложить на две составляющие  $P_1$  и  $P_2$  (рис.6.3 а).

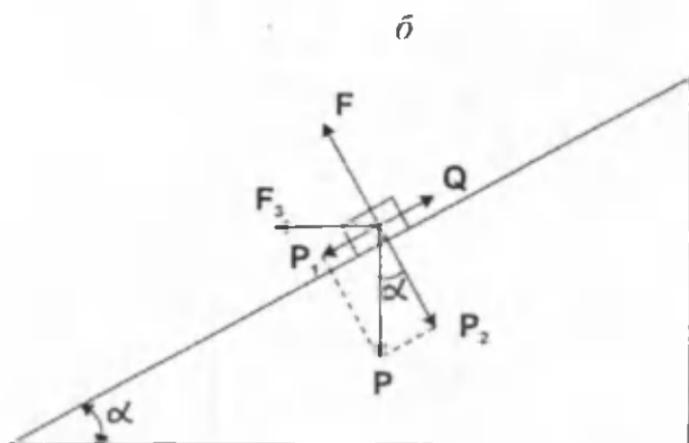
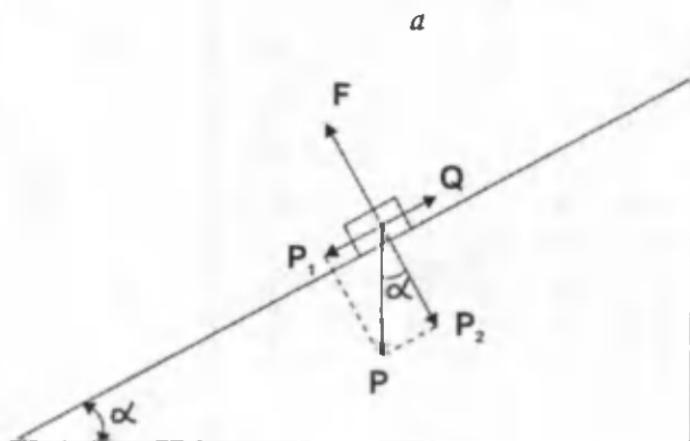


Рис. 6.3. Схема действия сил на тело оползня, находящегося на наклонной плоскости в состоянии равновесия (а) и в момент землетрясения (б).

Сила  $P_2$  перпендикулярна плоскости, а  $P_1$  параллельна ей. Согласно третьему закону Ньютона, на тело со стороны плоскости действует сила  $F$ , равная по вели-

чине  $P_2$  и противоположная ей по направлению. Сила  $P_1$  направлена параллельно плоскости. Под действием силы  $P_1$  тело стремится скатиться с плоскости. Удерживает тело в равновесии на плоскости сила трения покоя  $Q$ , которая равна по величине силе  $P_1$  и противоположна ей по направлению. В первом приближении можно рассматривать оползневое тело как тело на наклонной плоскости. Тело может выйти из равновесия в случае уменьшения силы трения  $Q$  или увеличения силы  $P_1$ . При отсутствии землетрясений эти условия начинают соблюдаться после обильных дождей или резкого таяния снегов. Поступление большого количества влаги в тело оползня, с одной стороны, увеличивает его массу, а с другой – смачивает границу раздела оползня и подстилающих пород. Увеличение веса  $P$  приводит, в свою очередь, к увеличению сил  $P_1$  и  $P_2$ . Смачивание же границы раздела приводит к уменьшению силы трения  $Q$ .

Землетрясение способствует более раннему сползанию тела оползня по следующим физическим причинам. В результате гидроудара горные породы вокруг очага испытывают подвижку. Примем для простоты, что наблюдается подвижка типа сдвига. В этом случае, как было показано ранее (п.6.1), сила, вызывающая подвижку, будет направлена параллельно горизонту и составляет с силой  $P_1$  острый угол. Примем, что в результате толчка на тело оползня стала действовать дополнительная сила  $F_3$  (рис.6.3 б). Разложим силу  $F_3$  на две составляющие, одна из которых  $F_1$  будет направлена параллельно наклонной плоскости, а другая  $F_2$  - перпендикулярно ей. Сложим затем силы, действующие на тело оползня. В результате получим, что  $F_2 + P_2 < P_2$  и  $F_1 + P_1 > P_1$ , что и приводит к сползанию тела оползня. Понятно, что угол между силами  $F_3$  и  $P_1$  зависит от типа подвижки, взаимного расположения очага и оползня, а также угла  $\alpha$  между наклонной плоскостью и горизонтом.

Рассмотрим теперь второй физический фактор, способствующий образованию оползня. Землетрясение вызывает вынужденные колебания как массива горных пород, так и тела оползня на нем. Известно, что частота вынужденных колебаний тела может совпасть с частотой его собственных колебаний. При этом наступает явление резонанса, т.е. амплитуда отклонения тела от положения равновесия становится аномально высокой. Ввиду различия масс массива горных пород и тела оползня частоты их собственных колебаний не совпадают. Поэтому отклонения тела оползня от положения равновесия при резонансе будут происходить и относительно массива горных пород. Это, в свою очередь, нарушает и без того слабые связи тела оползня с подстилающими породами. Так как сила трения скольжения меньше силы трения покоя, то оползень приходит в движение. Рассмотренные выше схемы являются упрощенными и объясняют образование оползней при землетрясениях на качественном уровне. Подробный анализ указанных факторов на оползни, наблюдаемые при землетрясениях, является самостоятельной задачей.

Фонтанирование воды часто наблюдается при сильных землетрясениях. Четкого физического объяснения этого явления до сих пор не было дано. С нашей точки зрения гидроудар в очаге приводит не только к разрушению горных пород, но и к выдавливанию жидкой субстанции к поверхности Земли, что и приводит к фонтанированию воды вместе с песком или глинистыми частицами. Фонтанирование вызывается выдавливанием жидкой субстанции сквозь узкие щели и отверстия на поверхности Земли. Причины некоторых других явлений, сопутствующих землетрясениям, будут нами затронуты в следующей главе.

## ВОЗБУЖДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ И ПРОБЛЕМА ПРЕДСКАЗАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

### 7.1. ВОЗБУЖДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ

В последние десятилетия проблеме возбужденной сейсмичности уделяется большое внимание. Возбужденная сейсмичность отчетливо проявилась в результате строительства в XX веке во многих регионах мира гидротехнических сооружений – водохранилищ. В 60-х годах XX века произошли разрушительные землетрясения вблизи крупных водохранилищ с  $M \geq 6$  в Карибе (пограничный район между Замбией и Родезией), Кремасте (Греция) и Койне (Индия). Возбужденная сейсмичность наблюдалась также при закачке вод в глубокие скважины. Детальный обзор различных случаев возбужденной сейсмичности описан в ряде статей и монографий [например, 32, 47, 61, 150, 154, 159, 160, 175, 192-194, 202]. Основными особенностями возбужденной сейсмичности у водохранилищ являются: небольшая глубина гипоцентров у большинства событий; корреляция между сейсмичностью и уровнем воды в водохранилище; связь сейсмичности с геологическими и тектоническими условиями; отличие статистики возбужденных землетрясений от естественных; подобие механизма очага у возбужденных и естественных землетрясений. Закачка вод в глубокие скважины вызывала возбужденную сейсмичность, основными особенностями которых являются: четкая корреляция между количеством возбужденных событий и объемом закачиваемой воды; небольшой интервал времени (около одного месяца) между началом закачки воды в скважину и проявлением сейсмичности; корреляция между глубиной закачки воды и гипоцен-

трами событий; проявление сейсмической активности и через несколько лет после прекращения закачки воды в скважину на удаленном от нее расстоянии (5 км).

Возбужденную сейсмичность пытались объяснить за счет дополнительного давления  $\Delta p$ , оказываемого на горные породы столбом воды. С этой целью был предложен триггерный механизм возбужденных землетрясений, который заключается в следующем. Представим себе, что тектонические напряжения в заданном районе близки к критическим, по достижении которых происходит землетрясение. В этом случае тектонические напряжения, складываясь с дополнительным давлением  $\Delta p$ , могут привести к разрушению горных пород, а значит, и к землетрясению. Основанием для таких представлений является относительно небольшая величина давления  $\Delta p$  по сравнению с давлением на очаг вышележащих горных пород (литостатическое давление). Большую популярность получили представления о влиянии порового давления на разрушение горных пород. Основанием для этого явилась работа М.Хубберта и В.Руби [164], которые показали важную роль порового давления в ослаблении прочностных свойств горных пород.

Рассмотрим изложенные выше факты и особенности возбужденных землетрясений с позиций гидроударной модели. Подобие механизма очага естественных и возбужденных землетрясений, а также условия проявления последних говорит о следующем. Во-первых, возбужденные землетрясения также как и естественные вызваны тектоническими силами. Во-вторых, они тоже происходят в результате гидроудара в очаге. В-третьих, фильтрация воды из водохранилищ и нагнетание воды в скважины вызывают быстрое формирование большого количества очагов, в которых при наличии тектонических напряжений происходит гидроудар. Наблюдение роя возбужденных землетрясений и небольшая глубина их гипоцентров вызваны следующим. Водоохранилища,

как правило, располагаются в условиях пересеченной местности, где кристаллические породы, обладающие упругими свойствами, выходят на поверхность. При заполнении водохранилищ вода, фильтруясь, проникает в многочисленные трещины поверхностных пород. Это приводит к быстрому формированию большого количества очагов на небольшой глубине в районе расположения водохранилища. Тогда при наличии тектонических напряжений будет наблюдаться рой землетрясений. Те же причины приводят к образованию роя землетрясений в районе расположения нагнетательной скважины. Корреляция между сейсмичностью и уровнем воды в водохранилище вызвана следующим. Увеличение уровня воды в водохранилище приводит, согласно закону Дарси [48, с. 122], к пропорциональному увеличению фильтрации воды из него, что и вызывает увеличение количества формируемых очагов в районе расположения водохранилища, а значит, и к увеличению сейсмичности. Необходимо отметить, что геологические и тектонические условия непосредственно влияют на сейсмичность. Анализ, проведенный Х.Гупта и Б.Растоги [32], говорит о влиянии геологических условий залегания водохранилищ на наблюдаемую сейсмичность. Асейсмичные водохранилища расположены на породах, не обладающих упругими свойствами. Поэтому напряжения, оказываемые на такие породы, будут вызывать у них пластическую деформацию, после которой напряжения, оказываемые на них, исчезают.

Связь возбужденной сейсмичности с тектоническими условиями также следует из анализа данных о сейсмичности того или иного района до и после строительства водохранилища. Данный факт убедительно был показан на примере Нурекского водохранилища в Таджикистане [61, 194]. До введения его в строй в Нурекском районе с 1955 по 1972 гг. наблюдалась естественная сейсмичность, которая проявлялась в области расположения

двух хорошо изученных разломов. Непосредственно в месте расположения водохранилища сейсмичность себя никак не проявляла. По мере заполнения водохранилища сейсмичность в Нурекском районе резко возросла. Причем основная масса эпицентров землетрясений располагалась в прилегающей к водохранилищу территории. В исследуемом районе основные (кристаллические) породы, обладающие упругими свойствами, выходят на поверхность или покрыты слоем рыхлых отложений небольшой мощности. В приведенном примере наличие тектонических напряжений налицо, так как естественная сейсмичность имела место еще до строительства водохранилища, т.е. можно с уверенностью говорить о наличии тектонических напряжений в Нурекском районе во время заполнения и функционирования водохранилища. Поэтому в результате фильтрации воды из водохранилища и формирования большого количества неглубоко залегающих очагов тектонические напряжения вызывали появление роя землетрясений.

Различие статистики естественных и возбужденных землетрясений вызвано различием условий формирования их очагов. Для обоих видов сейсмичности необходимо достижение тектонических напряжений до определенного уровня, которое определяется критерием (5.2). Из (5.3) и (5.4) следует, что при прочих равных условиях величина необходимого тектонического напряжения с уменьшением глубины залегания гипоцентра также должна уменьшаться. Основная масса гипоцентров возбужденных землетрясений расположена сравнительно неглубоко. Отсюда следует, что возбужденные землетрясения по сравнению с естественными при прочих равных условиях имеют большую вероятность образования. Другое необходимое условие образования землетрясения – наличие жидкого очага – выполняется только при наличии в нем необходимого количества свободной

воды. При введении водохранилища в строй вероятность формирования вблизи него очагов, обладающих свойствами жидкого тела, резко возрастает. Из указанного становится понятным различие статистики естественных и искусственных землетрясений. Подробное изложение возбужденной сейсмичности с новых теоретических позиций не входит в задачу настоящей работы и может быть предметом отдельных исследований.

## **7.2. ПРЕДСКАЗАНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

Предсказание катастрофических землетрясений является одной из главных задач и проблем сейсмологии. Освещению этого вопроса посвящены сотни оригинальных статей и ряд монографий [например, 1, 11, 31, 39, 41, 46, 50, 51, 62, 63, 70, 77, 98, 101, 104, 105, 170, 183]. Целью прогноза землетрясений является определение места, времени и силы (энергии) будущего катастрофического землетрясения. Катастрофическими принято считать такие землетрясения, которые наносят ощутимый материальный ущерб и сопровождаются многочисленными человеческими жертвами. За год на Земле происходит несколько сотен тысяч землетрясений и из них только некоторые являются катастрофическими. За последние сто лет рост численности населения и растущая урбанизация привели к увеличению числа катастрофических землетрясений. В последние десятилетия интенсивно ведутся исследования по поиску надежных предвестников землетрясений. В 60–70 годах XX столетия казалось, что проблема должна найти скорое решение. Позже оптимизм сменился пессимизмом, и стало ясно, что научное решение проблемы придет не так скоро. Очень точно об этом сказано в работе И.Гуфельда и Г.Гусева [34], цитату из которой мы приводим ниже: «Проблема точности прогноза многими связывалась с созданием необходимой плотности сети станций наблюдения. Однако опыт показал, что ситуация значительно

неопределенное. Из наблюдений нельзя было предсказать момент перехода среды в критическое состояние и понять, что происходит в среде. При этом явно недооценивали необходимость опережающего развития физических представлений о сейсмическом процессе и сильном землетрясении, как его части. Ряд успешных прогнозов в Китае (пять прогнозов за 1970-1982 гг.) создавал иллюзию возможности разработки методологии прогноза в ближайшие годы. В тот период в Китае прогноз шел под лозунгом, что готовность не принесет вреда. Сейсмические тревоги объявляли неоднократно, и определенные совпадения были неизбежны. В тот же период был пропущен ряд сильнейших землетрясений, унесших сотни тысяч человеческих жизней (г. Таншань, июнь 1976 г.). Китайский опыт показал неоднозначность интерпретации возмущений различных геофизических полей». Последние события в Китае (землетрясения в 2008 г.) полностью подтвердили этот вывод.

### *7.2.1. ИСТОРИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ*

Сведения очевидцев землетрясений в прошлом передавались из уст в уста и поэтому до нас дошли в виде легенд. Многие исследователи относятся к таким легендам с явным предубеждением, считая их досужим вымыслом. Однако, на наш взгляд, в них, несомненно, присутствует рациональное зерно, так как они хорошо дополняют друг друга. Богата на легенды такая густонаселенная страна, как Япония, где землетрясения происходят довольно часто. Большая часть японских легенд хорошо изложена в монографии Т.Рикитакэ [98]. Перед землетрясениями неоднократно отмечалось необычное поведение зубаток, глубоководных рыб, омаров, каракатиц, угрей, которые почему-то в этот момент находились ближе к поверхности воды. Наиболее подробно в легендах изложено поведение зубаток, которые большую часть времени проводят погруженными в ил или песок на дне рек и озер. Перед некоторыми землетрясениями

наблюдалось также возбужденное поведение ряда млекопитающих (собак, крыс, лошадей, обезьян, кошек), птиц (кур, голубей), пресмыкающихся (лягушек, змей), насекомых (червей, многоножек и пр.).

Указанное выше необычное поведение живых обитателей моря и суши пытались объяснить за счет электрических токов, изменением минерализации воды, шумовым эффектом форшоков и пр. С нашей точки зрения все изложенные случаи можно объяснить, исходя из следующих соображений. Известно, что землетрясения сопровождаются выделением в атмосферу газов из недр Земли, причем этот канал пополнения атмосферы соперничает с газовыделением при вулканической деятельности [24]. Внезапное изменение газового состава подземных вод, зоны аэрации и нижнего слоя атмосферы в эпицентральной зоне готовящегося землетрясения, безусловно, должно приводить к необычному поведению рыб и животных. Связано это с тем, что изменение привычного газового баланса при дыхании резко нарушает жизнедеятельность живых организмов и приводит к их необычному возбужденному поведению.

Отмеченное выше хорошо дополняет поверье о некоем человеке, который, почувствовав исходящий из земли ветерок, предвосхитил последующее землетрясение. Японское название этого ветерка – «Уики» [98, с. 36]. Данный факт передавался из уст в уста и в некоторых случаях, обнаружив «Уики», людям удавалось избежать неминуемой гибели. Интенсивное выделение различных газов при землетрясениях связано со следующими причинами. Субгоризонтально направленные тектонические напряжения в жидком очаге приобретают всевозможное направление. Горные породы земной коры содержат вещества, которые находятся в твердом, жидком и газообразном состояниях. Газовая составляющая горных пород является наиболее подвижной. Давление, оказываемое на вышележащие породы жидким очагом, вытесняет газы к поверхности Земли. Движение

газов может происходить как по порам горных пород, так и по образующимся в них трещинам. Когда газы доходят до дна водоемов и проникают в зону аэрации, они оказывают моментальное воздействие на живые организмы, там обитающие. Благодаря своей подвижности, газы, согласно описанию легенд, выделяются примерно за сутки до толчка и могут быть использованы как прогностический признак. При этом возникает очевидный вопрос: может ли выделение газов и возбужденное поведение животных и рыб происходить при отсутствии событий? Ответ – положительный. О причинах этого будет сказано ниже.

Одна из загадочных легенд касалась поведения естественных магнитов перед землетрясениями. По описанию [98, с. 41] в центральной Японии жил некто Эдо-оптик, у которого был подковообразный магнит размером около одного метра. За два часа до разрушительного землетрясения 1855 г. все гвозди и железные предметы, удерживаемые магнитом, внезапно упали на землю. Хозяин Эдо был неприятно удивлен и огорчен увиденным, так как магнит был рекламой его заведения. После землетрясения Эдо обнаружил, что к магниту вновь вернулись его прежние свойства. Факты, подобные вышеописанному, наблюдались и при разрушительном Неаполитанском землетрясении 1857 г. Рассмотрим причины кажущейся потери магнитных свойств магнитами перед землетрясениями с позиций представленных в работе теоретических представлений. Формирование жидкого очага будущего землетрясения приводит к трансформации горизонтальных тектонических напряжений в нем во всевозможных направлениях. Наличие пьезоэлектрических текстур в горных породах приводит к их пьезоэлектрической поляризации. При благоприятных условиях (отсутствие мощных рыхлых поверхностных отложений) в результате поляризации электрические заряды образуются и на дневной поверхности в эпицентральной области. Поэтому на подвешенные железные

предметы в этой области могут действовать электрические силы. Напомним, что в середине XX века отсутствовали железобетонные конструкции. Поэтому на подвешенный во дворе подковообразный магнит и прилипшие к нему железные детали начинало действовать электрическое поле, образованное поляризационными зарядами. Железо, как и другие металлы в обычном состоянии, являются электрически нейтральными. Металлы содержат свободные электроны – электроны проводимости. Электрическое поле вызывает в металлах электрическую индукцию.

Примем для наглядности, что на поверхности земли прямо под естественным магнитом с прилипшим к нему металлическим стержнем находится положительный (или отрицательный) заряд  $q_n$ . В результате индукции отрицательные (или положительные) заряды в стержне переместятся к тому его концу, который ближе расположен к земле (рис. 7.1). Нетрудно убедиться, что в результате этого металл начнет притягиваться к земле. Действительно, согласно закону Кулона сила взаимодействия между двумя электрическими зарядами обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Пусть стержень имеет длину  $l$ , и его средняя точка отстоит от земли на расстоянии  $l_0$ . Тогда величину силы притяжения  $F_n$  стержня электрическим полем можно определить из очевидного выражения

$$F_n = [k q_n q_c^- / (l_0 - l/2)^2] - [k q_n q_c^+ / (l_0 + l/2)^2], \quad (7.1)$$

где  $q_n$  – заряд на поверхности земли, вызванный пьезоэлектрической поляризацией горных пород;  $q_c^-$  и  $q_c^+$  – электрические заряды на концах стержня, вызванные электрической индукцией в нем;  $k$  – коэффициент пропорциональности. Первый член выражения (7.1) определяет силу притяжения заряда  $q_c^-$  к земле, а второй – силу отталкивания заряда  $q_c^+$ . Так как первый член выражения (7.1) превосходит второй, то стержень будет притягиваться к земле. Отметим, что гравитационное поле

много слабее электрического. Нетрудно подсчитать, что сила отталкивания между двумя электронами более чем в  $10^{42}$  раз превосходит силу гравитационного притяжения между ними! В обычное время сила притяжения магнитом железных предметов превосходила силу притяжения их гравитационным полем Земли. Непосредственно перед землетрясением возникшее электрическое поле притягивает железные предметы, которые в результате падают на землю, что и воспринималось как потеря магнитом своих свойств.

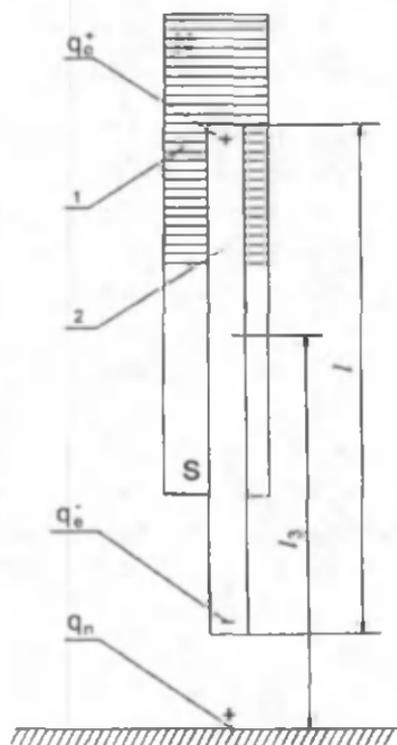


Рис. 7.1. Электрическая индукция в металлическом стержне, висящем на магните, под действием электрического заряда на поверхности Земли: 1 – естественный магнит; 2 – металлический стержень;  $q_n$  – электрический заряд на поверхности земли;  $q_e^+$  и  $q_e^-$  – положительный и отрицательный индукционные электрические заряды у концов металлического стержня, соответственно;  $l$  – длина металлического стержня;  $l_2$  – расстояние от поверхности земли до средней точки стержня.

В 70-е годы XIX века граф Мальвазия в Италии в течение длительного времени проводил эксперименты с подковообразным магнитом, к которому был притянут небольшой железный груз [98, с. 41]. В некоторых случаях перед землетрясением этот груз отлипал от магнита, а в других нет. Результаты экспериментов графа можно объяснить следующим образом. Во-первых, данный магнит с грузом не всегда располагался в эпицентральной области. Во-вторых, образующаяся электрическая сила могла быть недостаточной для отрыва груза от магнита.

### *7.2.2. Предвестники землетрясений*

В качестве предвестников принимаются выявленные эмпирическим путем аномальные изменения физических или химических параметров горных пород и атмосферы перед землетрясениями. Предвестники подразделяются по измеряемым параметрам и могут быть деформационными, геомагнитными, геоэлектрическими, гидрогеологическими, геохимическими и пр. Предвестники также можно условно подразделить на универсальные и локальные. Универсальным предвестником землетрясений являются вариации механических напряжений в земной коре, вызывающие деформацию горных пород. Действительно, землетрясения вызываются тектоническими силами. Нарастание тектонических напряжений до критической величины вызывает событие. Поэтому изменение напряжений и деформаций в земной коре должно сопровождать любое землетрясение. Об изменении деформаций судят по показаниям различных приборов-наклономеров, измеряющих изменение наклона земной поверхности во времени. Данные об изменении деформаций горных пород получают также путем проведения повторных геодезических наблюдений (нивелировок). При непрерывных наблюдениях за де-

формациями используются различные датчики (деформографы, наклономеры, гидроневелиры). Классическим примером определения деформаций горных пород при землетрясениях были результаты С.Цубои [197], полученные путем обработки данных геодезических наблюдений (п. 6.2).

При Ташкентском землетрясении 26.04.1966 г. было обнаружено аномальное изменение концентрации радона в пробах гидротермальных вод [113]. Концентрация радона плавно нарастала в течение 5 лет, затем в течение 5 месяцев рост резко увеличился, после чего перед толчком замедлился, а после него сравнительно быстро вернулся к фоновому уровню (рис.7.2). Последующими исследованиями было выяснено, что радоновый предвестник не всегда проявляется перед землетрясениями [62].

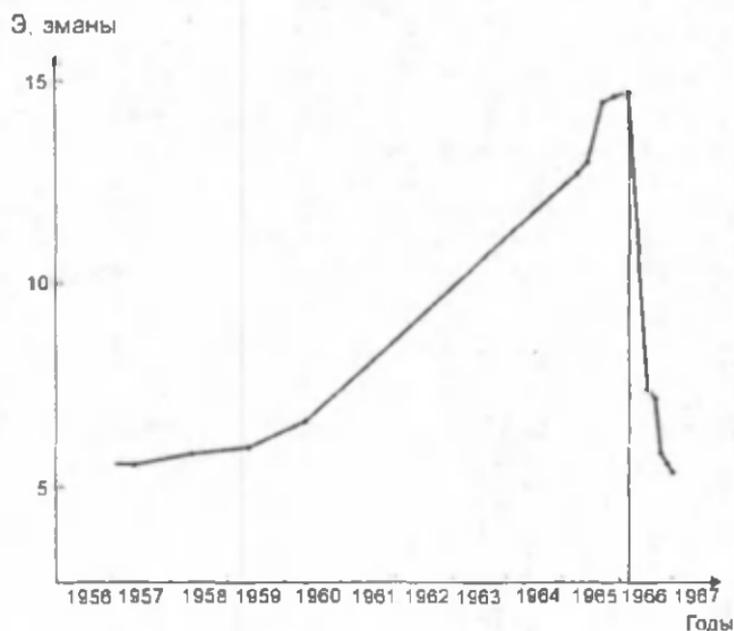


Рис. 7.2. Вариация содержания радона в термоминеральных водах перед и после Ташкентского землетрясения 26.04.1966 г. по данным работы [113].

Важные результаты были получены сейсмологами при выявлении предвестников на Гармском полигоне (Таджикистан). Среди них можно отметить аномальное изменение отношения скоростей продольных и поперечных волн (рис. 7.3) и электропроводности среды. Изменение электропроводности среды фиксировалось также в зоне разлома Сан-Андреас и при некоторых землетрясениях в Китае.

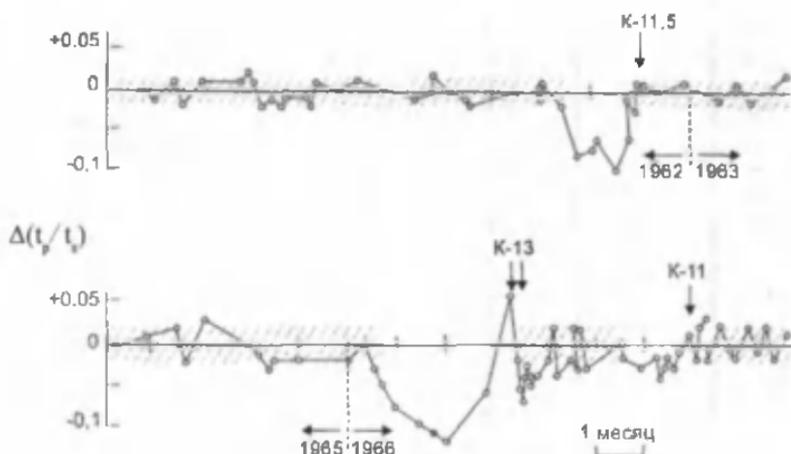


Рис. 7.3. Изменение отношения сейсмических волн  $v_p/v_s$  перед сильным землетрясением в Гарме, Таджикистан [103]: по оси ординат отложена величина отклонения  $v_p/v_s$  от нормального значения, полученного из отношения времен пробега  $P$  и  $S$ -волн ( $t_p$  и  $t_s$ , соответственно), излучаемых близкорасположенным очагом, через исследуемую территорию.

Интересные результаты были получены П.Мандалом и др. [172], которые провели сейсмическую томографию очаговой области Бхуджского землетрясения 26.01.2001 г. в Индии. Согласно авторам [172], очаговая область характеризуется заметно меньшими скоростями сейсмических волн по сравнению с окружающими горными породами.

Вариации геомагнитного поля перед землетрясениями наблюдались в Узбекистане, США, Японии и в других регионах [например, 1, 62, 98]. Наиболее впечатляющие результаты были получены при изучении

вариаций геомагнитного поля на сейсмоактивных полигонах Узбекистана. На рис.7.4 представлены вариации геомагнитного поля, полученные на станции Андижан перед Алайским землетрясением 1.11.1978 г. с  $M \approx 6,8$ . Видно, что аномалия за 3-4 дня достигла максимума, а затем с 30 октября стала резко падать и к 2.11.1978 г. вернулась к фоновому уровню. Магнитометрические наблюдения в данном случае позволили сделать верный прогноз времени готовящегося сильного землетрясения. В то же время эпицентр Алайского землетрясения отстоял от прогнозируемого на расстоянии  $\sim 100$  км.

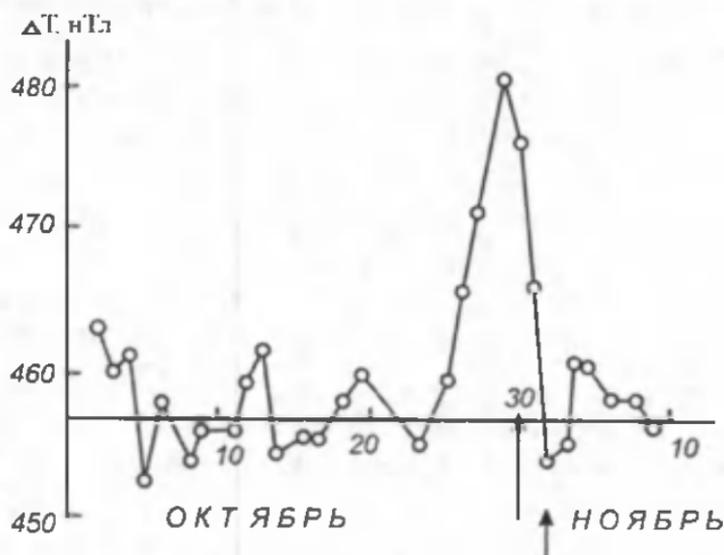


Рис. 7.4. Быстрые вариации геомагнитного поля на ст. Андижан, связанные с Алайским землетрясением 1.11.1978 г. с  $M=6.8$  [1, с. 134].

Аномальные изменения компонентного состава подземных вод регистрировались при ряде землетрясений. Среди них можно выделить такие компоненты, как хлор, сероводород, бром, йод и др. [например, 31,70]. При этом изменение того или иного компонента происходит до события, а сразу после толчка его концентрация восстанавливается. Изменение уровня воды в колодцах и скважинах и дебита воды в самоизливающихся скважинах также наблюдается перед землетрясениями. В по-

следние десятилетия много работ посвящено изучению возможности использования ионосферных предвестников землетрясений в целях прогноза [50]. Существует еще целый ряд предвестников землетрясений, которые мы даже не затрагиваем, так как это выходит за рамки настоящих исследований и подробно описано в ряде монографий. Несмотря на выявленное множество предвестников, задача прогноза землетрясений далека от разрешения. О причинах такого положения дел будет отмечено ниже.

### **7.2.3. Вопросы прогнозирования землетрясений**

До настоящего времени не разработана методика исследований, позволяющая однозначно предсказать место, время и силу будущего землетрясения. В некоторых случаях удавалось предсказать время будущего землетрясения, оценить его силу, но точность определения его эпицентра оставляла желать лучшего. Возможно, поэтому существуют различные виды прогнозирования, которые подразделяют на статистическое и эмпирическое.

Статистическое прогнозирование основано на изучении статистики землетрясений в том или ином районе. С этой целью анализируются данные о количестве событий на изучаемой территории в прошлом и их силе (магнитуде), т.е. проводится сейсмическое районирование. Результатом исследований является определение вероятности осуществления в ближайшем будущем на этой территории землетрясения с той или иной магнитудой. Статистический прогноз является долгосрочным и определяет вероятность осуществления события в том или ином временном и силовом интервале на исследуемой территории. Статистическое прогнозирование используется для определения сейсмического риска и при сейсмостойком строительстве сооружений.

Эмпирическое прогнозирование позволяет дать краткосрочный прогноз, который основан на анализе поведения предвестников землетрясений. Аномальные вариации предвестников позволили в ряде случаев предсказать будущее событие. Самым слабым местом краткосрочных прогнозов является точность предсказания эпицентра будущих землетрясений. Краткосрочный прогноз определяет время будущего события с точностью от нескольких часов до 1÷2 суток. В настоящее время данные краткосрочного прогноза о надвигающемся землетрясении до населения доводятся крайне редко. Связано это с точностью прогноза и возможными в связи с этим неоправданными решениями, несущими панику и хаос. Поэтому повышение надежности краткосрочных прогнозов является крайне важной задачей.

Рассмотрим причины появления предвестников с общих теоретических позиций, изложенных в работе. Тектонические напряжения вызывают разрушение горных пород в очаге и приводят к образованию трещин в земной коре. Очаг со временем приобретает свойства жидкого тела, в котором тектонические напряжения передаются во всех направлениях. По трещинам на земную поверхность вначале выходит наиболее подвижная часть горных пород – газы. Землетрясения, как известно, сопровождаются выделением большого количества газов в атмосферу [24]. По трещинам также выдавливается и жидкая составляющая горных пород, что вызывает изменение компонентного состава подземных вод. Необходимо отметить различие в направлениях деформации горных пород на различных расстояниях от очага. В непосредственной близости от очага породы испытывают деформацию во всевозможных направлениях. По мере удаления от очага деформация горных пород, вызванная тектоническими силами, происходит преимущественно

в горизонтальном направлении. Из сказанного следует, что формирование жидкого очага вызывает изменение деформации горных пород вблизи него. В результате могут наблюдаться ряд явлений: изменение газового и компонентного состава подземных вод: изменение уровня подземных вод и дебита самоизливающихся скважин и пр. К примеру, объясним образование ионосферных предвестников. Пьезоэлектрическая поляризация вызывает изменение электрического поля в эпицентральной области, что и приводит к появлению ионосферных предвестников. Этот вывод согласуется с данными о локальных вариациях электрического поля перед землетрясениями [например, 50 с. 27].

В ряде случаев наблюдались предвестники, а само событие не происходило. Причины этого заключаются в следующем. Формирование жидкого очага может привести к появлению предвестников. Однако величина тектонических напряжений может быть недостаточной для осуществления события. Сейсмологи уже давно опытным путем пришли к выводу, что информативность тех или иных предвестников во многом зависит от региона исследований. Во многом, возможно, в связи с этим в том или ином регионе предпочитают следить за комплексом тех или иных предвестников. В то же время массовые наблюдения за последние десятилетия не позволили решить проблему прогноза. Связано это, на наш взгляд, с чисто эмпирическим подходом к решению проблемы. Еще несколько десятилетий назад такой подход был оправдан. За прошедшее время был накоплен огромный экспериментальный материал, который необходимо проанализировать с точки зрения физических процессов, происходящих в очаге. Основываясь на изложенных в монографии теоретических представлении-

ях, рассмотрим ряд вопросов методического характера, которые, на наш взгляд, помогут решить проблему прогноза.

### **7.3. ГИДРОУДАРНАЯ МОДЕЛЬ О МЕТОДИКЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

#### **7.3.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

Решение проблемы прогноза каждого крупного землетрясения, по-видимому, является задачей отдаленного будущего. На сегодняшний день актуальной задачей является предвосхищение катастрофических событий в мегаполисах и густо населенных территориях. Рассмотрим возможность решения этой задачи с изложенных нами теоретических представлений. На рис. 5.2. показан разрез очаговой области вертикальной плоскостью, перпендикулярной земной поверхности. Горизонтальными стрелками на рисунке показано направление действия тектонических напряжений. В жидком очаге тектонические напряжения приобретают всевозможное направление. Для наглядности на рис.5.2 показано также направление действия тектонических напряжений в произвольной точке очага. Если эту точку принять за центр сферы, то направления действия напряжений будут перпендикулярны ее поверхности. Поэтому на горные породы, залегающие между жидким очагом и эпицентром, тектонические напряжения будут действовать в субвертикальном направлении.

Таким образом, направления действия тектонических напряжений в эпицентральной области и за ее пределами существенно различаются. В связи с этим для определения положения эпицентра будущего события необходимо наблюдения вести так, чтобы зафиксировать это различие. Вести оперативные и подробные наземные

наблюдения на значительной части земной поверхности – дело очень затратное и бесперспективное. Поэтому наблюдения необходимо сосредоточить в сейсмоактивных районах там, где расположены мегаполисы или важные стратегические объекты. Вести наблюдения следует комплексом методов, которые себя наиболее хорошо зарекомендовали ранее на исследуемой территории. К примеру, при сейсмологических исследованиях часто применяются деформографы различного типа. Желательно использовать скважинные деформографы, которые позволяют избавиться от различных помех. Причем необходимо использовать скважинные приборы, измеряющие вертикальные деформации в земной коре. Установка ряда таких деформографов у мегаполиса позволит однозначно выявить наличие или отсутствие аномальных вертикальных деформаций. Площадь поверхности  $S_p$ , под которой зафиксированы такие деформации, будет свидетельствовать о наличии поблизости жидкого очага. Величина этой поверхности по нашим оценкам для землетрясения с  $M \leq 8$  должна быть  $S_p \leq 15 \text{ км}^2$ . Вертикальные деформации должны наблюдаться на площади, линейные размеры которой должны быть того же порядка, что и линейные размеры очага. Уже вне этой площади на сравнительно небольшом от нее расстоянии вертикальные деформации должны отсутствовать или быть сравнительно небольшими. Из табл. № П 4.1 следует, что при землетрясениях с магнитудой  $M \approx 8$  объем очага составляет  $\Delta V_o \approx 2 \cdot 10^{10} \text{ м}^3$ . Тогда, принимая объем очага за сферу, легко найти площадь сечения ее большого круга -  $S_k$ . Величины площадей  $S_p$  и  $S_k$  должны соответствовать друг другу, т.е. они должны быть одного порядка.

Наблюдения за деформациями земной коры должны быть подкреплены данными других методов. Одним

из таких методов является слежение за уровнем грунтовых вод в колодцах и скважинах. Уровень грунтовых вод (УГВ) может меняться как до, так и после землетрясения, как в ближней, так и в более удаленной зоне. УГВ, согласно наблюдениям, где-то опускается, а где-то поднимается. В эпицентральной области перед землетрясением УГВ в большинстве колодцев и скважин должен повыситься. Связано это с субвертикальным давлением, оказываемым со стороны жидкого очага на вышележащие породы. Как и в описанном выше случае, определяется площадь поверхности, в пределах которой в колодцах и скважинах наблюдается повышение УГВ. Линейные размеры этой площади должны быть того же порядка, что и линейные размеры очага. Отметим, что разработка подробных методических рекомендаций при производстве наблюдений тем или иным способом является самостоятельной задачей. Выше же мы описали лишь общие положения, которыми необходимо руководствоваться при производстве наблюдений произвольным способом. Для примера ниже приведены методические рекомендации при использовании магнитометрического способа наблюдений.

### ***7.3.2. Перспективы использования магнитометрического способа наблюдений***

Рассмотрим возможности решения проблемы прогноза магнитометрическим способом. Магнитометрические наблюдения хорошо себя зарекомендовали при сейсмологических наблюдениях в Узбекистане. В качестве исследуемого мегаполиса выберем г. Ташкент. Вначале вкратце рассмотрим интерпретацию данных магнитометрических наблюдений с позиций пьезоэлектрической модели образования земного магнетизма

(см. гл. 4, а также Приложения 2 и 3). Типичным примером магнитной аномалии  $\Delta T$ , наблюдаемой при землетрясениях, могут служить вариации геомагнитного поля перед Алайским событием 1.11.1978 г. (рис. 7.4). При землетрясениях наблюдаются как положительные, так и отрицательные вариации  $\Delta T$ . Причины этого заключаются в следующем. При произвольном направлении воздействия силы на горные породы, содержащие пьезоэлектрические текстуры, может наблюдаться как поперечный, так и продольный пьезоэффекты, которые различаются по своему знаку. Другая возможная причина вызвана тем, что горные породы, окружающие очаг, могут находиться в различном состоянии напряжения. Если в одном месте они находятся в сжатом состоянии, то в другом относительно первого в более расслабленном. Тогда, согласно закону пьезоэффекта, это и будет приводить к наблюдению вариаций различного знака.

Нами было показано, что знак вариаций  $\Delta T$ , генезис которых вызван инженерной деятельностью человека, хорошо объясняется с позиций пьезоэлектрической модели образования земного магнетизма (Приложение 3). К примеру, вариации  $\Delta T$  у водохранилищ вызваны воздействием веса воды  $\Delta P$  на нижележащие горные породы, содержащие пьезоэлектрические текстуры кварца. Причем уменьшение величины  $\Delta P$  вызывает увеличение вариаций  $\Delta T$ , а увеличение – наоборот. Отметим, что знаки вариаций, вызванных силами различного происхождения, согласуются между собой. Так, действие на горные породы сил, направленных против силы тяжести, всегда вызывает появление положительных вариаций  $\Delta T$ . Этот вывод был подтвержден магнитометрическими наблюдениями при Назарбекском землетрясении 11.12.1980 г. с  $M \approx 5,2$  и  $h = 17$  км (рис. 7.5). Наблюдения, которые были начаты в эпицентральной области на сле-

дующий день после основного толчка, велись с помощью двух автономных станций, установленных в пунктах ЛЮ и Назарбек (НЗ) [14]. Вариации определялись путем синхронного сравнения поля на станциях ЛЮ и НЗ с полем на удаленных от эпицентра пунктах. Несмотря на то, что станции ЛЮ и НЗ были расположены всего в 5 км друг от друга, характер вариаций в них сильно различался. На станции ЛЮ, которая располагалась в эпицентре, поле со временем постепенно уменьшалось со средней скоростью около 2 нТл/мес. На станции же НЗ амплитуда вариаций за время наблюдений даже несколько возросла.

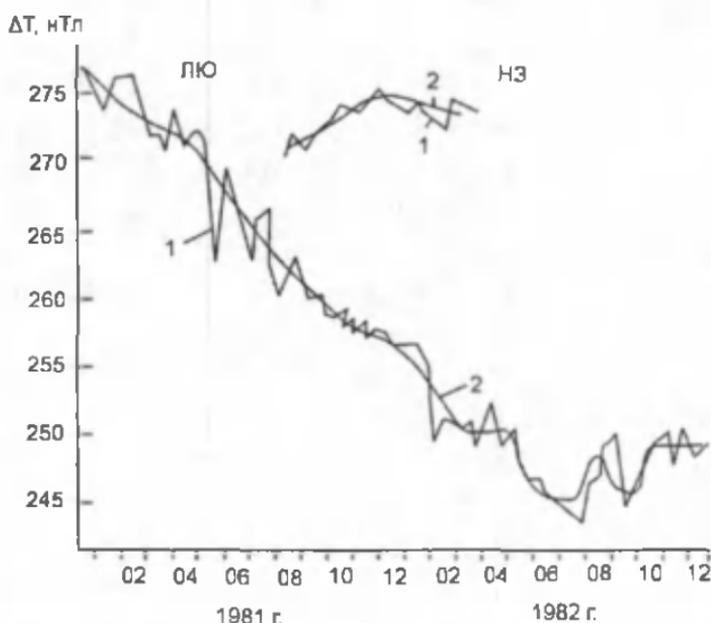


Рис. 7.5. Вариации геомагнитного поля в эпицентре Назарбекского землетрясения 11.12.1980 г. по данным работы [14]: 1 и 2 – среднедекадная и среднемесячная кривые, соответственно; ЛЮ и НЗ – станции наблюдения.

Такое различие в характере вариаций между двумя довольно близко расположенными станциями можно объяснить следующим образом. На горные породы, залега-

ющие между эпицентром и очагом, действуют субвертикальные тектонические напряжения, направленные к поверхности Земли. Отсюда следует, что эти напряжения должны вызывать появление положительных вариаций  $\Delta T$ , что и наблюдалось на ст. ЛЮ. Станция же НЗ, расположенная в 5 км от эпицентра, фиксировала вариации  $\Delta T$  вызванных действием тектонических сил на горные породы, залегающие под ней. Из сказанного можно сделать вывод, что различие в характере вариаций на станциях ЛЮ и НЗ вызваны различием направлений действия тектонических сил на породы, залегающие под ними. Это возможно в случае, если линейный размер очага Назарбекского землетрясения был менее 5 км. Объем очага можно рассчитать по формуле (5.10), если известна его энергия или магнитуда. Рассчитанный таким образом объем очага Назарбекского события равен  $\Delta V_0 \approx 2 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ . В первом приближении можно принять, что очаг землетрясения имеет форму сферы. Тогда линейный размер очага будет равен  $l_0 \approx 10^2 \text{ м}$ , т.е. как и ожидалось  $l_0 < 5 \text{ км}$ . В действительности очаг может иметь любую геометрическую форму. Поэтому линейные размеры площади проекции очага на земную поверхность могут при том же объеме  $\Delta V_0$  быть и на порядок больше рассчитанного. Нетрудно убедиться, что и в этом случае условие  $l_0 < 5 \text{ км}$  соблюдалось бы.

Магнитометрические наблюдения при Назарбекском землетрясении являются в некоторой степени уникальными. Дело в том, что данные наблюдений в эпицентре были подкреплены исследованиями в стационарном пункте Хумсан, расположенном в 70 км от него (рис. 7.6). Из рис. 7.6 видно, что устойчивая аномалия амплитудой  $\Delta T \approx 6 \text{ нТл}$  в данном пункте появилась за несколько месяцев до Назарбекского землетрясения и после него не претерпела существенных изменений. Это говорит о

том, что тектонические напряжения в линеаменте, к которому относится и Каржантаусский разлом, появились за несколько месяцев до основного толчка и оставались практически неизменными после него. Отсюда следует, что только небольшая часть энергии сжатия горных пород была затрачена на Назарбекское землетрясение. Приуроченность же ряда событий к Каржантаусскому разлому [40, 71, 102] подтверждает механизм генерации землетрясений разломами, представленной нами ранее (п. 6.1).

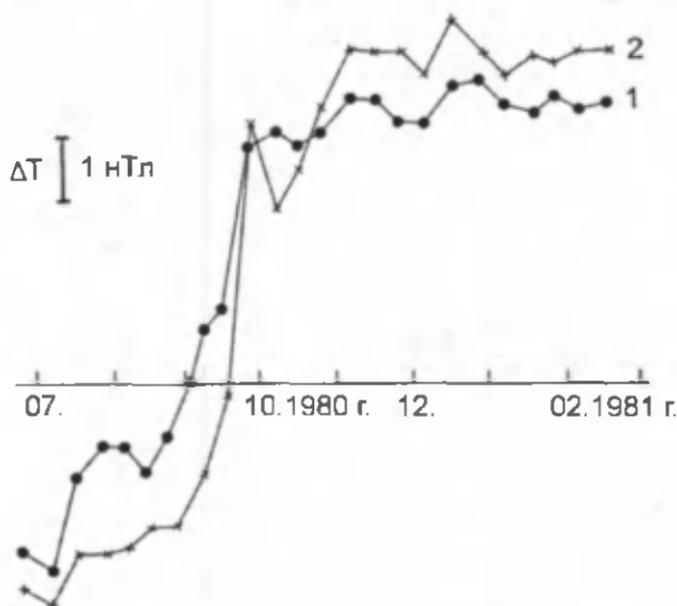


Рис. 7.6. Аномальное поведение геомагнитного поля в п. Хумсан, связанного с Назарбекским землетрясением 11.12.1980 г. с  $M=5.5$  и  $h=17$  км [1, с. 106]: 1 и 2 – кривые вариации поля относительно станций Янгибазар и Андигжан, соответственно.

Магнитометрические наблюдения на станции ЛЮ продолжались в течение длительного времени и после Назарбекского события. В 1983 г. на этой станции в течение 17 дней наблюдалась положительная аномалия амплитудой 4,5 нТл [64]. Синхронные наблюдения

велись также на второй станции (ЛЮ-Д), отстоящей от ЛЮ на расстоянии 500 м. Там в это время также наблюдалась положительная аномалия, но амплитудой 2,5 нТл (рис. 7.7). Эти данные наблюдений с нашей точки зрения имеют следующее объяснение. Можно предположить, что под эпицентральной областью Назарбекского события 11.12.1980 г. к 1983 г. был сформирован жидкий очаг. Когда во второй половине февраля 1983 г. в этом районе появились субгоризонтально направленные тектонические напряжения, они стали действовать в очаге во всех направлениях, что и вызвало появление положительных вариаций на станциях наблюдения. Различие же в амплитудах вариаций, зафиксированных на этих станциях, вызвано различной их удаленностью от очага. Возвращение же величины вариаций к фоновому уровню в начале марта 1983 г. говорит о прекращении действия тектонических сил. Наблюдение вышеописанных вариаций не сопровождалось последующим событием. Отсюда можно сделать вывод, что уровень тектонических напряжений был недостаточен для образования землетрясения.

Основываясь на изложенном выше, мы предлагаем следующую методику наблюдений для прогноза катастрофических землетрясений близ мегаполисов на примере г. Ташкента. Вокруг города и вдоль Каржантаусского разлома организуется проведение магнитометрических наблюдений на нескольких стационарных пунктах. Наблюдение вариаций на каком-либо из них будет сигнализировать о появлении тектонических напряжений в исследуемом районе. Понятно, что вариации, вызванные инженерной деятельностью человека, в расчет не берутся. Сразу после этого вокруг мегаполиса необходимо организовать временные пункты наблюдения.

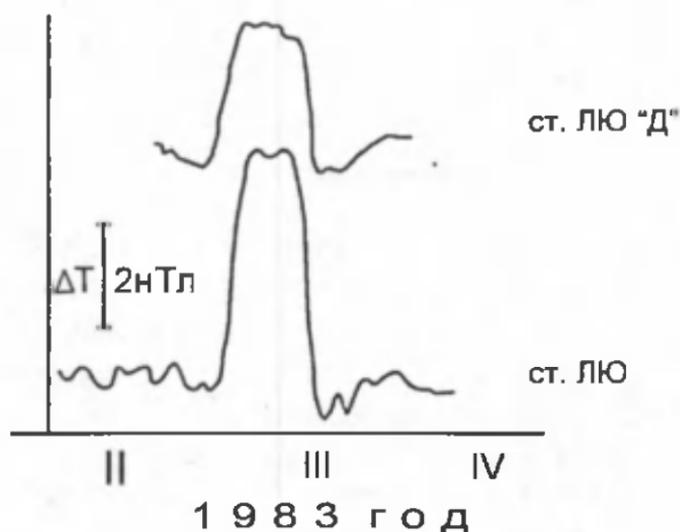


Рис. 7.7. Положительные вариации геомагнитного поля, зарегистрированные двумя станциями, расположенными на расстоянии около 500 м друг от друга [64].

Появление положительной вариации  $\Delta T$  на одном из пунктов наблюдений будет сигнализировать о возможном наличии жидкого очага рядом с ним. После этого вокруг этого пункта оперативно проводятся подробные измерения вариаций поля с целью установления линейных размеров положительной аномалии  $\Delta T$ . Если линейные размеры аномалии не превышают 5 км, то вероятность наличия подготовленного очага в исследуемом районе очень велика. В случае же, если линейные размеры положительной аномалии  $l_A$  будут заметно больше 5 км, то можно будет считать, что вероятность наличия жидкого очага близ мегаполиса очень мала. Такое заключение мы сделали на основании того, что линейные размеры очага для  $M \leq 8$  составляют  $l_0 \leq 5$  км (Приложение 4). Выше было показано, что линейные размеры положительной аномалии и очага должны быть одного порядка. Для территории Узбекистана землетрясения с

магнитудой  $M \geq 8$  не характерны. Поэтому в данном случае можно ограничиться верхним пределом  $l_0 \leq 5$  км для  $M=8$ , что приводит к  $l_A \leq 5$  км.

Приведенные рассуждения касались методики определения эпицентра будущего события близ мегаполиса. Время же будущего землетрясения необходимо определять способом, давно разработанным и хорошо себя зарекомендовавшим. Время будущего события определялось по возвращению аномальных вариаций поля к исходному фоновому уровню. Наблюдениями установлено, что такой способ определения времени подтверждается в большинстве наблюдений (до 90%). Краткосрочный прогноз времени дается при наблюдении быстрых вариаций  $\Delta T$ . В этом случае точность прогноза времени составляет от нескольких часов до 1÷2 дней [1, 62]. Характер поведения поля при землетрясениях на станциях, не расположенных в эпицентральной области, можно объяснить следующим образом. Тектонические силы, как и силы другого происхождения, могут вызвать появление аномалий. Станции наблюдения находятся на различных, заранее неизвестных расстояниях и направлениях от эпицентра будущего события. Во многом это объясняет различный знак и разброс амплитуд наблюдаемых аномалий. Возвращение аномалий к прежнему фоновому уровню говорит и о возвращении напряженного состояния горных пород близ станции наблюдения к исходному уровню. Роль жидкого очага при этом является определяющей. Вещество жидкого очага под действием тектонических напряжений выдавливается наружу. Окружающие очаг горные породы за счет этого расширяются. Так как горные породы обладают инертностью, этот процесс происходит не мгновенно и при этом наблюдается характерное поведение предвестников землетрясения.

Прогноз силы будущего землетрясения ранее определялся по линейным размерам проявления предвестников. Так, И.Добровольский и др. [36] предложили эмпирическую формулу для определения магнитуды события

$$R=10^{0,43M}, \quad (7.2)$$

где  $R$  – есть радиус проявления магнитной аномалии, км. Анализ многолетних магнитометрических наблюдений позволил К.Абдуллабекову и др. [1, с. 197] предложить использование для территории Узбекистана более подходящую эмпирическую зависимость:

$$\lg L=0,46M+0,08, \quad (7.3)$$

где  $L$  – линейный размер проявления аномальных вариаций, км. Для оценки магнитуды будущего землетрясения по формулам (7.2) и (7.3) необходимо наличие сети наблюдательных станций на исследуемой территории. Причем между количеством станций и точностью оценки магнитуды события существует прямая связь. Кроме того, как упоминалось выше, предвестники могут наблюдаться и без наступления события.

Мы предлагаем прогнозировать магнитуду по параметрам положительной аномалии, которая будет зафиксирована в будущем эпицентре события. Этими параметрами являются амплитуда аномалии  $\Delta T$  и линейные размеры ее проявления  $l_A$ . Выше было показано, что линейные размеры очага  $l_o$  и положительной аномалии  $l_A$  должны быть одного порядка. Поэтому, определив  $l_A$ , можно найти тем самым порядок величины  $l_o$ . Тогда, представляя очаг в виде сферы, можно легко оценить его объем  $\Delta V_o$ . В свою очередь, зная  $\Delta V_o$  по формуле (5.12)

можно рассчитать энергетический класс землетрясения, а значит и его магнитуду. Оценку магнитуды будущего события можно производить и по величине положительной аномалии  $\Delta T_A$  в эпицентре. Согласно закону пьезоэффекта, его величина прямо пропорциональна приложенной силе. Поэтому в первом приближении можно считать, что величина  $\Delta T_A$  прямо пропорциональна силе, действующей со стороны очага на вышележащие горные породы. Из выражения (5.6) следует, что энергия землетрясения  $E_k$  также прямо пропорциональна силе. Магнитометрические наблюдения в эпицентре событий позволяют в принципе определить зависимость между силой и амплитудой  $\Delta T$ . В нашем случае классическим примером таких наблюдений являются исследования в эпицентре Назарбекского землетрясения 11.12.1980 г. Величина аномалии в эпицентре составляла 27 нТл, а афтершоки события магнитудой  $M=2\div 3$  сопровождались всплесками на кривой амплитудой не более 5 нТл (рис.7.5). В первом приближении можно считать, что с увеличением магнитуды на единицу величина  $\Delta T_A$  должна увеличиваться приблизительно на 5 нТл. Естественно, что проведение в будущем магнитометрических наблюдений по предлагаемой методике позволит более подробно описать некоторые ее детали. Невыясненным остался вопрос о вероятности осуществления события. Из общих соображений ясно, что чем больше величины  $\Delta T_A$  и  $l_A$ , тем больше вероятность осуществления события. Экспериментальные наблюдения показывают, что при  $0 \leq \Delta T_A \leq +5$  нТл вероятность осуществления события и его возможная сила достаточно низки. При  $\Delta T_A > +10$  нТл и  $l_A \approx 500$  м вероятность осуществления события уже ощутима. При  $\Delta T_A \geq +20$  нТл и  $1000 < l_A < 5000$  м можно говорить, что вероятность готовящегося землетрясения близ мегаполиса близка к единице. При наблюдении положи-

тельной аномалии  $\Delta T_A$  при  $l_A \gg 5$  км можно утверждать о том, что если событие и произойдет, то на расстояние  $\sim 100$  км от мегаполиса. Таким образом, магнитометрический способ наблюдений позволяет, в принципе, прогнозировать эпицентр землетрясения близ мегаполиса с точностью до  $\pm 1$  км, его магнитуду с точностью  $M = \pm 1$ , и время с точностью до нескольких дней. Несмотря на то, что магнитометрические наблюдения хорошо себя зарекомендовали в Узбекистане, их необходимо подкрепить наблюдениями за другими предвестниками. Кроме того, магнитометрический способ прогноза имеет свои недостатки. Основным из них является наличие помех рядом с промышленными объектами. Наряду со многими известными предвестниками имеются и незаслуженно забытые. Некоторые из них, на наш взгляд, требуют более внимательного анализа.

### **7.3.3. О ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ НЕКОТОРЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

Гидроударная модель землетрясений позволила по-новому взглянуть на физику очага. В жидком очаге тектонические напряжения трансформируются во всех направлениях. Горные породы, залегающие между очагом и эпицентром, испытывают действие субвертикально направленных сил. Исследователь, находящийся в эпицентральной области, может наблюдать эффект действия этих сил на предвестники события. Одним из таких предвестников является появление электрических зарядов в эпицентральной области в результате пьезоэлектрической поляризации горных пород. В п. 7.2.1 с физически четких представлений был объяснен эффект кажущейся потери естественными магнитами своих притягательных свойств перед землетрясениями. Мы предлагаем следующую простую методику наблюдений

за предвестником — появлением электрических зарядов на поверхности Земли в эпицентральной области готовящегося землетрясения. Принципиальная схема наблюдений состоит в следующем. К закрепленному на опоре на небольшом расстоянии от земной поверхности динамометру прикрепляется металлический стержень известной массы. При появлении электрических зарядов на поверхности земли в стержне возникает электрическая индукция. Под действием электрического поля стержень притягивается к земле, что приводит к удлинению пружины динамометра и фиксируется наблюдателем. Технические детали устройства могут быть различными и зависят от достижения необходимой точности измерений. Прибор может быть выполнен как в стационарном, так и полевом вариантах. Апробацию устройства, изготовленного по представленной схеме, необходимо проводить как в лабораторных, так и в полевых условиях при изучении афтершоков землетрясений в эпицентральной области. Устройство необходимо располагать там, где покровные отложения отсутствуют или имеют небольшую мощность. Достоинством предлагаемого способа наблюдений является простота исполнения прибора и его относительная дешевизна. Естественно, что предлагаемый способ наблюдений необходимо использовать как дополнительный в комплексе с другими, например, с магнитометрическим. Предлагаемый способ позволяет получить сведения о местонахождении эпицентра будущего события близ исследуемой территории. Проведение экспериментальных наблюдений данным способом, возможно, позволит в дальнейшем судить о силе и времени готовящегося события. Отметим, что, согласно легендам, кажущаяся потеря магнитом своих притягательных свойств происходила за несколько часов до толчка.

Суть другого предлагаемого способа прогнозирования состоит в следующем. Известно, что в процессе землетрясения выделяется огромное количество газов. С другой стороны, согласно легенде, которая была описана ранее (п.7.2.1), перед землетрясениями из-под земли исходил ветерок под японским названием «Уики», который предвсхищал события. Ранее мы объяснили это явление с позиций гидроударной модели. Повторим вкратце основную суть. На горные породы, залегающие между эпицентром и очагом, действуют субвертикально направленные тектонические напряжения. Газовая, наиболее подвижная составляющая горных пород выходит через поры на поверхность земли в эпицентральной области до события. Поэтому мы предлагаем использовать эффект выхода газов из-под почвы в качестве предвестника землетрясения. Так как газы выходят на поверхность земли, то их давление должно превосходить атмосферное. Кроме того, компонентный состав газов также должен отличаться от атмосферного. Устройством, состоящим из двух барометров, можно фиксировать разность между давлением воздуха в почве и на поверхности. Появление разности давлений и будет означать наличие так называемого ветерка - «Уики» - предвестника землетрясений. Дополнительно к этому желательно оперативно проводить анализ подпочвенного воздуха на содержание основных компонентов атмосферного воздуха: кислорода, азота, двуокиси углерода. Зафиксированная аномальная разность давлений или необычный компонентный состав подпочвенного воздуха будут сигнализировать о возможном осуществлении события в ближайшие часы. Технические детали устройств, которые могут быть использованы с целью реализации предлагаемых способов прогнозирования, могут быть различными, и являются самостоятельной задачей исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги настоящим исследованиям, перечислим основные достижения и результаты работы. В монографии получила свое развитие предложенная ранее одним из авторов модернизированная концепция тектоники литосферных плит (МКТЛП). МКТЛП в представленном виде отвечает всем требованиям, предъявляемым к моделям тектогенеза. Главным достижением работы является разработка гидроударной модели тектонических землетрясений, базирующейся на известных физических законах. Согласно модели, очаг будущего землетрясения в какой-то момент времени приобретает свойства жидкого тела. Это приводит, согласно закону Паскаля, к всевозможным направлениям действия тектонических напряжений в нем. Показано, что с позиций модели хорошо трактуются факты экспериментальных наблюдений. Впервые дано четкое однозначное определение понятию объем очага землетрясения  $\Delta V_0$  и выведена аналитическая формула для его расчета. Предложена аналитическая формула для расчета энергии  $E_x$ , затрачиваемой на перемещение горных пород при землетрясениях, подобных Газлийским 1976 и 1984 гг. На конкретных примерах показано хорошее согласие между экспериментальными и расчетными значениями величин  $\Delta V_0$  и  $E_x$ . В работе получена аналитическая формула, позволяющая оперативно оценить объем очага любого землетрясения, зафиксированного сейсмическими станциями.

С позиций гидроударной модели рассмотрена генерация форшоков и афтершоков. Объяснены многочисленность афтершоков и их распределение в пространстве и во времени. Показано, что афтершоки не являются проявлением остаточной деформации, как считалось ранее. Объяснено различие в пространственном распределении

афтершоков при землетрясениях, сопровождающихся различным типом подвижек. Показано, что жидкий очаг в природных условиях может выполнять роль гидравлического пресса. В этом случае тектоническая сила, действующая на очаг, может быть многократно усилена по величине. Исходя из этого, объяснен факт приуроченности большинства мелкофокусных землетрясений к разломам. Объяснено как образование глубокофокусных землетрясений, так и их сходство, и различие по сравнению с мелкофокусными. Рассмотрены вопросы, касающиеся сейсмического момента, механизма очага, продолжительности, гипоцентра и эпицентра землетрясения. Показано, что в условиях наличия жидкого очага понятие сейсмического момента теряет всякий смысл. Объяснено образование различного типа подвижек горных пород при землетрясениях, показано существенное различие между объемами очага и горных пород, излучающих сейсмические волны.

С единых теоретических представлений дано толкование явлениям, сопутствующим землетрясениям: оползням, свечению атмосферы, вариациям геомагнитного поля, фонтанированию воды из под земли и пр. Показано, что возбужденная сейсмичность у водохранилищ и в местах нагнетания воды в глубокие скважины вызваны созданием благоприятных условий для быстрого формирования большого количества очагов, обладающих свойствами жидкого тела. В краткой форме изложены и на конкретных примерах разобраны методические рекомендации по прогнозу катастрофических землетрясений близ мегаполисов, в основе которых лежат предложенные в работе теоретические представления. Показаны потенциальные возможности использования магнитометрического способа в целях прогноза. Предложены и обоснованы новые методы исследования по прогнозу землетрясений.

## ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ О ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ КВАРЦА И КВАРЦСОДЕРЖАЩИХ ГОРНЫХ ПОРОД

Пьезоэлектрический эффект (пьезоэффект) кристаллов диэлектриков, впервые обнаруженный братьями Кюри в 1880 г., обладает следующими свойствами: под влиянием механического напряжения или деформации на противоположных гранях кристалла появляются разноименные электрические заряды; плотность образующихся электрических зарядов, прямо пропорциональна величине приложенного механического напряжения; инверсия механического напряжения, приложенного к кристаллу, приводит к изменению знаков заряда на противоположных гранях кристалла; существует обратный пьезоэлектрический эффект, т.е. при воздействии на кристалл электрического поля в нем возникают механические напряжения.

Пьезоэлектрическим эффектом обладают кристаллы, не имеющие центра симметрии. Численно эффект описывается зависимостью между приложенным к кристаллу механическим напряжением и наблюдаемым вектором поляризации  $P$ . Вектор  $P$  имеет размерность напряженности электрического поля, а механические напряжения – размерность давления. В общем случае в произвольной точке тела можно выделить девять напряжений  $t_{ik}$ , три из которых являются нормальными, а шесть – касательными. Из теории упругости следует, что из шести касательных напряжений три являются независимыми [52, 74]. Известно также, что нормальные напряжения вызывают только деформацию растяжения или сжатия, а касательные – деформацию сдвига. В де-

картовой системе координат нормальные напряжения принято считать положительными, если они совпадают с положительным направлением осей. Поэтому положительные нормальные напряжения вызывают деформацию растяжения, а отрицательные – сжатия. Из вышеуказанного следует, что напряжения, действующие в любой точке кристалла, можно описать с помощью шести компонент. Пьезоэффектом могут обладать анизотропные минералы. В связи с этим для численного его описания используется тензор. К примеру, пьезоэлектрический эффект монокристалла  $\alpha$ -кварца описывается следующим тензором [74]:

$$\begin{array}{ccccccc}
 & t_{11} & t_{22} & t_{33} & t_{23} & t_{31} & t_{12} \\
 P_1 & d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\
 P_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -2d_{11} \\
 P_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{array} \quad (\text{П 1.1})$$

Здесь через  $t_{ik}$  обозначены величины напряжения растяжения (сжатия) и сдвига; через  $d_{ik}$  – коэффициенты пропорциональности, которые называются пьезоэлектрическими модулями;  $P_1, P_2, P_3$  – компоненты вектора поляризации  $P$ , направленные по осям декартовой системы координат.

Более 100 минералов обладают пьезоэлектрическими свойствами (кварц, турмалин, нефелин, канкренин, лед, нашатырь и др.). Из этих минералов для нас наибольший интерес представляет кварц ( $\text{SiO}_2$ ), так как он является одним из самых распространенных в природе минералов. Кварц обладает высоким электрическим сопротивлением и присутствует в большинстве горных пород земной коры: кварцевом порфире, граните, гранит - порфире, липарите, гнейсах, слюдястых сланцах и пр. Почти целиком состоят из кварца песчаники,

кварциты, конгломераты, пески, галечники и жильные породы. Различают высокотемпературный и низкотемпературный кварц. Высокотемпературный  $\beta$ -кварц образуется при температуре  $870^{\circ}\text{C}$ , а низкотемпературный  $\alpha$ -кварц – при температуре  $573^{\circ}\text{C}$ .  $\beta$ -кварц называют еще порфиловым кварцем, так как он встречается в богатых кремнекислотой лавах. Кварц является энантиоморфным кристаллом, т.е. имеет правую и левую формы (зеркальные формы). Из курса кристаллографии известно, что все кристаллы подразделяются по классам симметрии и сингониям [129]. Элементы симметрии кристалла показывают, при каких преобразованиях (например, поворотах) облик кристалла не меняется. Сингония же определяется системой кристаллографических осей, мысленно помещенной в кристалл. Сингонию во многом определяют углы между кристаллографическими осями. Так,  $\alpha$ -кварц относится к тригональной сингонии и обладает классом симметрии 3:2 [74].

В горных породах кристаллы кварца редко имеют линейные размеры больше 1–2 миллиметров. Ориентация этих кристаллов относительно друг друга, казалось бы, должна быть произвольной. Тем не менее, анализ большого количества отобранных образцов показал, что вероятность их преимущественной ориентации вдоль того или иного направления достаточно велика. В этом случае, как было выяснено, ряд горных пород обладает пьезоэлектрическими свойствами. А. Шубниковым [128] было введено понятие пьезоэлектрических текстур, смысл которого был нам дан ранее (гл.4).

Так как кварц является наиболее распространенным минералом – пьезоэлектриком, то интересно рассмотреть существующие разновидности пьезоэлектрических текстур кварцосодержащих горных пород. Пьезоэлектриче-

ские текстуры состоят из множества пьезоэлектрических кристаллов, определенным образом ориентированных в пространстве. Каждый отдельный кристаллик кварца в этом множестве относится к классу симметрии 3:2. В то же время множество идентичных кристаллов, образующих пьезоэлектрическую текстуру, может обладать тем или иным типом симметрии. Между симметрией текстуры и симметрией кристаллов, ее образующих, существует зависимость, подробно рассмотренная в литературе [например, 128, 129].

Экспериментальными и теоретическими исследованиями установлено, что кварцсодержащие породы принадлежат к текстурам двух типов:  $(\infty\cdot m)T$  или  $(m\cdot 3:m)T$ . Указанные выше формы симметрии кварца даны в символах, принятых в русскоязычной литературе. В англоязычной литературе для обозначения форм симметрии используются символы, предложенные Шенфлисом. В этой символике текстурам симметрии  $(\infty\cdot m)T$  и  $(m\cdot 3:m)T$  отвечают символы  $C_{4v}$  и  $D_{3h}$ , соответственно [74]. Пьезоэлектрические текстуры кварца могут быть образованы только  $\alpha$ -кварцем. Лабораторные методы изучения прямого пьезоэлектрического эффекта горных пород подразделяются на статический и динамический. При статическом методе исследования образец подвергается сжатию и между его гранями измеряется образующаяся разность потенциалов [73]. Достоинством статического метода является возможность проведения абсолютных измерений, а недостатком – влияние токов утечки на полученные результаты. Критерием надежности полученных данных является линейная зависимость между приложенным механическим напряжением и измеряемой разностью электрических потенциалов  $U$ :

$$U=K \cdot F_n,$$

(П.1.2)

где  $F_n$  – нагрузка, приложенная к образцу;  $K$  – коэффициент пропорциональности. Как видно из рис. П.1.1, данный критерий при измерениях пьезоэффекта в исследованиях [73, 74] строго выдерживался.

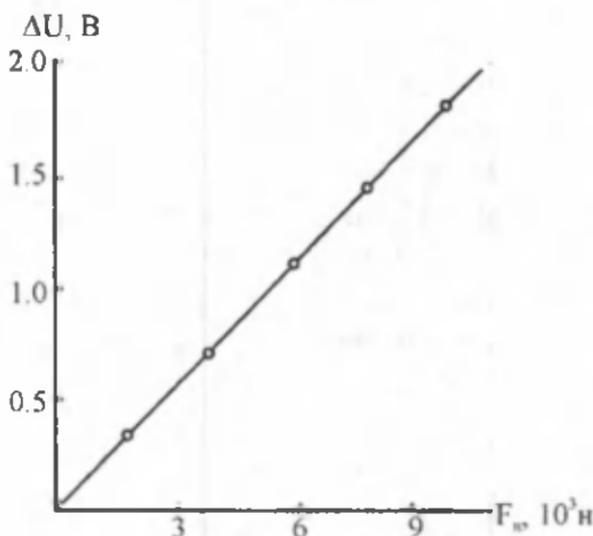


Рис. П 1.1. Зависимость величины пьезоэффекта от приложенного к образцу гранита механического усилия по данным работы [74].

В динамическом методе на образец действует пульсирующая нагрузка. Достоинствами динамического метода являются чувствительность, производительность, простота при эксплуатации. Исследования с использованием статического метода позволили установить, что при удельном электрическом сопротивлении образцов  $\rho < 10^3$  Ом·м на результаты измерений сильно влияли токи утечки. Был также определен минимальный размер образца, необходимый для надежного измерения пьезомодулей. Кварцсодержащие породы бывают как мелко, так и крупнозернистыми. Поэтому при малом размере

исследуемого образца возможна регистрация не пьезоэффекта данной текстуры, а пьезоэффекта отдельных некомпенсированных в ней зерен кварца. Экспериментально установлено [74], что для проведения корректных измерений пьезоэффекта горных пород различного генезиса образец кубической формы должен иметь ребро длиной не менее  $4 \cdot 10^{-2}$  м.

При проведении лабораторных исследований образец, как правило, находится в произвольной системе координат, которую мы далее будем именовать подвижной. В подвижной системе координат при действии на образец одного нормального или касательного напряжения пьезоэффект наблюдается между всеми его противоположными гранями. Для правильного определения пьезомодулей и типа симметрии текстуры необходимо измерения, проведенные в подвижной системе координат, привести к главной. В работе [74] рассчитаны изменения продольного и поперечного эффекта текстур  $(\infty:m)T$  и  $(m:3:m)T$  при переходе от главной системы координат к подвижной. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных позволило выявить тип текстуры исследуемых образцов. Необходимо отметить, что в большинстве исследованных случаев тип текстуры можно было определить лишь экспериментальным путем [74]. Экспериментальные исследования [74] позволили установить пределы изменения пьезоэлектрических модулей кварцосодержащих пород различного генезиса (табл. П.1.1).

Из табл. П.1.1 следует, что песчаники обладают незначительным пьезомодулем, хотя почти полностью состоят из кварца. Связано это с тем, что в песчаниках зер-

на кварца имеют слабую ориентированность. Граниты в среднем имеют пьезомодуль на порядок меньше, чем гидротермальные кварцы. Исследования на образцах горных пород различного генезиса показали, что продольный и поперечный эффекты в них различаются не более чем в два раза [74]. Отметим, что этот факт верен для образцов пород, вырезанных в виде куба.

Таблица П 1.1

№	Наименование горной породы	Величина пьезомодуля $\times 10^{-15}$ , кл/н
1	Жильный кварц	20÷230
2	Пегматитовый кварц	17÷300
3	Гидротермальный высокотемпературный кварц	10÷340
4	Кварциты	1,7÷330
5	Граниты	2,3÷10
6	Гнейсы	1,7÷3,3
7	Песчаники	0,7

Лабораторные исследования пьезоэлектрических свойств ряда горных пород во многом способствовали разработке наземного и шахтного варианта пьезоэлектрического метода разведки полезных ископаемых [26, 66]. При использовании пьезоэлектрического метода разведки (ПМР) в земле искусственно создается упругая волна при помощи взрыва или удара. Распространяясь в породе, содержащей пьезоэлектрические текстуры, эта волна вызывает появление электромагнитных волн. При

этом частоты упругой и пьезоэлектрической волн совпадают. ПМР нашел применение при поиске месторождений жильного кварца, пегматитов, сфалеритовых руд, рудных жил кварцсодержащих пород, горного хрусталя. Применение ПМР подтвердило широкую распространенность пьезоэлектрических текстур в природе. Условия вечной мерзлоты не оказывали влияние на результаты исследований, полученных пьезоэлектрическим методом разведки [106]. Использование ПМР показало, что эффект жил в несколько раз превышает эффект гнейсов или гранит - гнейсов, но сравним с пьезоэффектом кварцитов, что находится в согласии с данными лабораторных измерений пьезомодулей этих пород.

Широкое распространение пьезоэлектрических текстур в горных породах позволило Д. Расулову высказать предположение о наличии естественных пьезоэлектрических полей в Земле. В работах Д. Расулова с сотр. [81-84, 95, 96] с позиций пьезоэлектричества было объяснено образование ряда видов естественных электрических полей в Земле, среди которых можно выделить: «меняющиеся во времени поля», аномалии потенциала над рудными месторождениями, положительные аномалии над пегматитовыми жилами, «интенсивные отрицательные аномалии». В монографии Д. Расулова [88] приведены подробные количественные выкладки, которые подтверждают качественные выводы. Убежденность автора [88] в широком распространении в природе естественных пьезоэлектрических полей во многом способствовала разработке постулата пьезоэлектрической модели.

## СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Из всех видов вариаций геомагнитного поля суточные являются наиболее хорошо изученными и уникальными. Объяснение их происхождения и особенностей проявления было важным этапом в развитии пьезоэлектрической модели. Суточные вариации имеют следующие особенности проявления [72, 115, 130, 145, 174]: суточная периодичность солнечно-суточных  $S_q$  и лунно-суточных L-вариаций; наличие полусуточных составляющих  $S_q$  и L-вариаций; существенное различие в амплитудах суточных и полусуточных  $S_q$ -вариаций; зависимость амплитуды  $S_q$ -вариаций от времени года; примерно 30-кратное различие в амплитудах  $S_q$  и L-вариаций; изменение амплитуды L-вариаций при изменении расстояния между Землей и Луной (рис. П 2.1 и П 2.2).

Рассмотрим образование суточных вариаций с позиций пьезоэлектрической модели [88]. С этой целью выясним силы, действующие на тело массы  $m$ , которое находится в произвольной точке земной поверхности. Для этого будем использовать систему координат, связанную с телом. Пусть тело имеет форму параллелепипеда и содержит пьезоэлектрические текстуры кварца типа  $(\infty \cdot m)T$  (рис.4.4). На тело действует сила тяжести  $F_g$ , которую можно считать постоянной по величине и направлению. Тело испытывает также действие сил гравитации, связанные, в первую очередь, с Солнцем и Луной. Сила гравитационного воздействия Солнца  $F_s$  на тело постоянна по величине, а по направлению меняется с суточной периодичностью. Подобным же образом ведет себя и сила гравитационного взаимодействия между Луной и

телом  $F_n$  с той лишь разницей, что периодичность здесь равна лунным суткам. Напомним, что, согласно тензору (4.10), при действии на текстуру нормальных напряжений  $t_{11}$ ,  $t_{22}$ ,  $t_{33}$  пьезоэлектрический эффект наблюдается только вдоль оси  $y$  (рис.4.4).

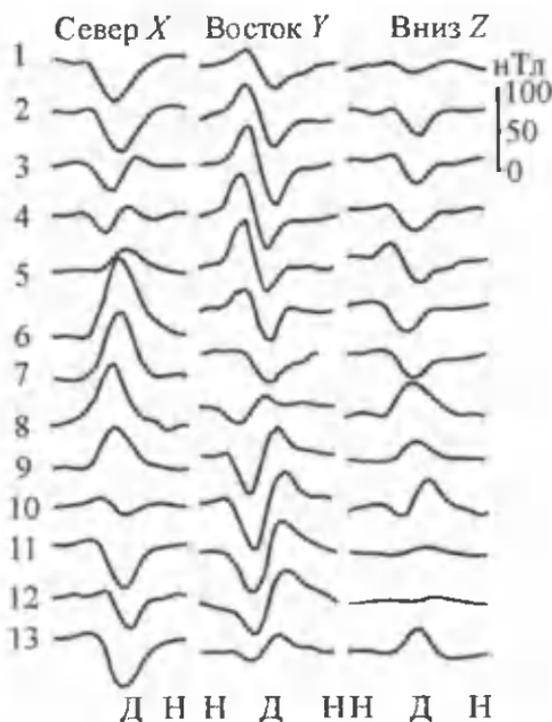


Рис. П2.1. Поле суточных вариаций в зависимости от местного солнечного времени для обсерваторий, лежащих на разных географических широтах: 1 – Нурмиярви,  $60,5^\circ$  с.ш.; 2 – Валенсия,  $51,9^\circ$  с.ш.; 3 – Ташкент,  $41,4^\circ$  с.ш.; 4 – Тусон,  $32,2^\circ$  с.ш.; 5 – Гонолулу,  $21,3^\circ$  с.ш.; 6 – Гуам,  $13,4^\circ$  с.ш.; 7 – Татуока,  $1,2^\circ$  ю.ш.; 8 – Луанда,  $8,8^\circ$  ю.ш.; 9 – Татанариве,  $18,9^\circ$  ю.ш.; 10 – Уотеру,  $30,3^\circ$  ю.ш.; 11 – Амберли,  $43,2^\circ$  ю.ш.; 12 – Порт-о-Франсе,  $49^\circ$  ю.ш.; 13 – Аргентина,  $65,2^\circ$  ю.ш. (Н – ночь, Д – полдень).

В полдень на широтах, близких к экватору, сила  $F_c$  действует на горные породы по нормали к поверхности Земли, что должно вызывать появление поперечного пьезоэлектрического эффекта вдоль оси  $y$ . Данный пьезоэлектрический эффект будет причиной появления на

локальном участке земной коры некоторого электрического тока  $\Delta J$ . Нетрудно убедиться, что ток  $\Delta J$  должен приводить к появлению  $X$ -компоненты  $S_q$ -вариаций в точке наблюдения. Действительно, представим себе, что под точкой наблюдения вдоль оси  $y$  протянули прямой длинный провод и по нему пустили ток. Ясно, что этот ток будет вызывать появление магнитного поля, направление которого в точке наблюдения будет перпендикулярно току, т.е. направлено вдоль оси  $x$ .

Проанализируем причины наблюдения в полдень у экватора положительных  $S_q$ -вариаций. Напомним, что поле  $\mathbf{V}_0$  направлено, как и главное поле  $\mathbf{V}_r$  и вызвано продольным пьезоэлектрическим эффектом вдоль оси  $y$ . Из тензора (4.10) следует, что пьезомодули  $y$  продольного и поперечного эффектов имеют разные знаки. Это означает, что при действии только растягивающих или сжимающих напряжений вдоль осей  $y$  и  $z$  продольный и поперечный пьезоэффекты будут иметь разные знаки. Одинаковые знаки эти эффекты имеют в случае действия растягивающих напряжений по оси  $y$  и сжимающих по оси  $z$  или наоборот. Наблюдение в полдень у экватора максимума  $X$ -компоненты  $S_q$ -вариаций означает, что знаки вышеназванных пьезоэффектов одинаковы.

На умеренных и высоких широтах  $X$ -компонента  $S_q$ -вариаций имеет вид двойной волны. Объяснить это можно следующим образом. Сила  $\mathbf{F}_c$  по направлению меняется с суточной периодичностью. Поэтому в каждый момент времени ее можно разложить на три компоненты по осям координат. В этом случае пьезоэлектрический эффект, согласно тензору (4.10), определяется суммой продольного и двух поперечных эффектов. При этом продольный и поперечный пьезоэффекты имеют разные знаки при воздействии только растягивающих или сжимающих напряжений. Кроме того, их величины довольно сложным образом зависят от углов, составляе-

мых направлением силы воздействия с осями главной системы координат [74]. В связи с этим на умеренных и высоких широтах в течение суток должна наблюдаться смена знака суммарного пьезоэлектрического эффекта, что и вызывает появление  $S_q$ -вариаций северной компоненты в виде двойной волны (рис. П 2.1).

В полдень на экваторе  $Y$  и  $Z$ -компоненты  $S_q$ -вариаций, практически, отсутствуют. В работе [74] было показано, что при воздействии на образец силы, составляющей произвольные углы с осями главной системы координат, пьезоэффект наблюдается между всеми противоположными гранями образца. Поэтому, исключая полуденное время, в экваториальной области сила  $F_c$  будет вызывать появление пьезоэффекта и по осям  $x$  и  $z$ . Пьезоэлектрический эффект в направлении оси  $x$  вызывает появление восточной компоненты  $S_q$ -вариаций. Для доказательства этого утверждения достаточно привести рассуждения, подобные тем, что были сделаны выше при анализе северной компоненты.

Осталось доказать, что  $Z$ -компонента  $S_q$ -вариаций вызвана пьезоэлектрическим эффектом по оси  $z$ . Пусть мы имеем фиксированную точку наблюдения, расположенную на земной поверхности вне полярной области. По отношению к ней горные породы с пьезоэлектрическими текстурами протягиваются в обе стороны по оси  $x$  и  $y$ , а по оси  $z$  — лишь в одну сторону. Пьезоэлектрический эффект по оси  $z$  будет вызывать появление вертикального тока. Точка наблюдения при этом будет расположена прямо над токовой линией на небольшом расстоянии от нее. Известно, что у концов прямого провода с током линии магнитного поля начинаются и замыкаются. Поэтому в непосредственной близости у любого конца прямой линии с током магнитное поле будет иметь направление, совпадающее с линией тока. Отсюда становится понятным, почему пьезоэффект по

оси  $z$  вызывает появление  $Z$ -компоненты  $S_q$ -вариаций в точке наблюдения.

Таким образом, суточная периодичность  $S_q$ -вариаций вызвана суточной периодичностью изменения направления силы  $F_c$ , действующей на горные породы земной коры. Особенности проявления  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ -компонент  $S_q$ -вариаций связаны с особенностями пьезоэффекта при изменении направления воздействия силы  $F_c$ . Из указанного выше становится понятным почти неизменный характер зависимости  $S_q$ -вариаций от местного времени в точках, расположенных на одной широте. Действительно, в этих точках в одно и то же местное время сила  $F_c$  имеет одинаковую величину и направление, а значит, при прочих равных условиях, должна вызывать равный по величине пьезоэффект. Для более точного количественного описания особенностей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ -компонент  $S_q$ -вариаций необходимо получить следующую информацию. Во-первых, определить для конкретной широты местности функциональную зависимость от времени углов наклона силы  $F_c$  к осям главной системы координат. Затем сопоставить наблюдаемые компоненты  $S_q$ -вариаций с известными данными лабораторных экспериментов по изучению продольного и поперечного пьезоэффектов на образцах горных пород, на которых воздействовали силой, направленной под различными углами к осям главной системы координат [74]. Полученная информация может также способствовать установлению типа симметрии пьезоэлектрических текстур кварца, ответственных как за образование  $S_q$ -вариаций, так и, вообще, за поле  $B_0$ .

Наличие полусуточных составляющих  $S_q$  и  $L$ -вариаций объясним вначале на примере лунных вариаций (рис. П 2.2). Лунно-суточные вариации выделяют из общих суточных путем статистической обработки

данных за многие дни наблюдений [72, 145]. Связано это с тем, что амплитуда L-вариаций составляет около 1/30 от амплитуды S-вариаций, и лунные сутки составляют около 24ч. 50', т.е. чуть больше солнечных. Отличительной особенностью L-вариаций является наличие двух максимумов в течение лунных суток, амплитуды которых практически одинаковы.

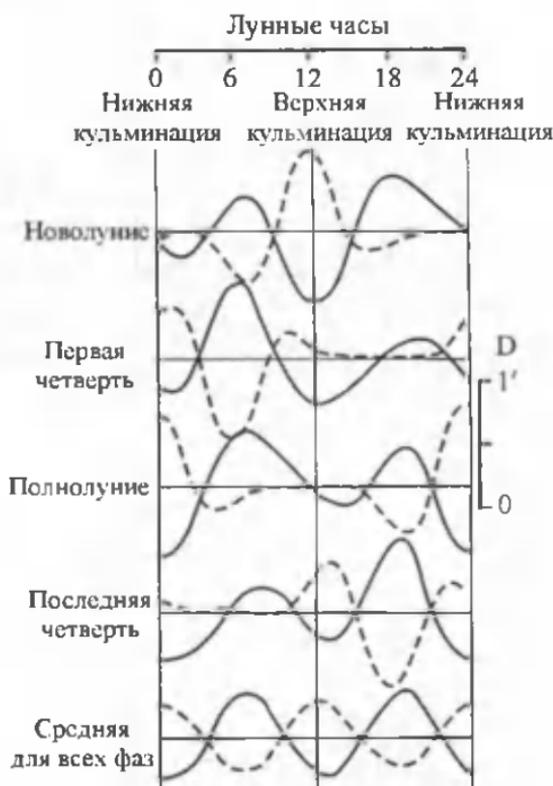


Рис. П 2.2. Лунно-суточные вариации склонения в г. Батавия (пунктирные линии) и г. Лондоне (сплошные линии) при разных фазах Луны по данным работы [145].

В остальном L-вариации подобны  $S_q$ -вариациям. Связано это с тем, что гравитационное воздействие Луны на тело  $F_d$  ведет себя в течение суток подобно силе  $F_c$ . Также как  $F_c$  сила  $F_d$  меняется по направлению с суточной

периодичностью, что и является причиной подобия  $S_q$  и  $L$ -вариаций. Для примера объясним характер поведения северной компоненты  $L$ -вариаций у экватора. Сила  $F_n$  в течение суток меняется по величине. Дважды в лунные сутки Луна находится в кульминационном положении относительно точки наблюдения: зените и нодире. В зените сила  $F_n$  перпендикулярна поверхности Земли и направлена в противоположную силе  $F_T$  сторону. В этот момент результирующая сила  $(F_T - F_n)$  вызывает наибольший пьезоэлектрический эффект в направлении оси  $y$ , а значит, и наблюдение амплитудного значения северной компоненты  $L$ -вариаций. При нахождении Луны в нодире вновь наблюдается максимум  $X$ -компоненты  $L$ -вариаций. Объяснить это можно так. В нодире сила  $F_n$  становится наименьшей и направлена в ту же сторону, что и сила  $F_T$ . В результате тело испытывает со стороны Земли и Луны действие таких же по величине и направлению сил, как и в зените. Это и приводит к наблюдению в нодире второго максимума  $X$ -компоненты  $L$ -вариаций. Более подробно этот вопрос освещен в монографии [88].

Приведенные выше рассуждения можно использовать и для объяснения образования полусуточной составляющей  $S_q$ -вариаций. Заметное различие в амплитудах 12-часовой и 24-часовой составляющих  $S_q$ -вариаций связано с тем, что плоскость земного экватора составляет угол  $23^{\circ}27'$  с плоскостью эклиптики. Для доказательства этого утверждения выберем какую-либо точку наблюдения у экватора. Пусть в полдень в этой точке сила  $F_c$  будет составлять с поверхностью Земли угол  $\alpha=90^{\circ}$ . В полночь же в этой точке этот угол будет равен  $\alpha=(90^{\circ}-23^{\circ}27')$ . Выше было отмечено, что изменение угла  $\alpha$  должно приводить к изменению  $S_q$ -вариаций, что и наблюдается. В принципе, амплитуды полусуточных  $L$ -вариаций также должны различаться между со-

бой. Связано это с тем, что средний угол наклона лунной орбиты к плоскости земного экватора составляет около  $23^\circ$ . По-видимому, методика выделения L-вариаций из общих суточных путем усреднения за многие дни наблюдения приводит к некоторому искажению истинной картины.

Зависимость амплитуды  $S_q$ -вариаций от времени года связано, в основном, с тем, что при вращении Земли вокруг Солнца ее ось вращения не меняет своего направления. В дни осеннего и весеннего равноденствия земная ось перпендикулярна направлению на Солнце. В эти дни X-компонента  $S_q$ -вариаций ведет себя наиболее симметрично относительно линии экватора, а Y и Z-компоненты в северном и южном полушариях являются как бы зеркальным отражением друг друга. Связано это с тем, что в эти дни подобным же образом меняется относительно экватора направление силы  $F_c$ . В дни летнего и зимнего солнцестояния такого, симметричного относительно экватора поведения силы  $F_c$  уже не происходит, что и определяет характер  $S_q$ -вариаций в это время года. Амплитуда  $S_q$ -вариаций в течение года изменяется и из-за изменения расстояния между Землей и Солнцем. Действительно, величина пьезоэффекта прямо пропорциональна приложенной силе, а величина силы  $F_c$ , как известно, обратно пропорциональна квадрату расстояния между Землей и Солнцем. Однако из-за малости эксцентриситета земной орбиты изменение величины силы  $F_c$  в течение года составляет не более 7% и поэтому ее влияние не столь заметно проявляется.

Амплитуда  $S_q$ -вариаций  $A_c$  примерно в 30 раз превышает амплитуду L-вариаций  $A_n$ . Вызвано это тем, что сила  $F_c \gg F_n$ . Действительно, величина пьезоэффекта прямо пропорциональна приложенной силе. Отсюда следует, что раз  $F_c \gg F_n$ , то должно выполняться условие  $A_c \gg A_n$ , что и наблюдается. Проведем некоторые коли-

чественные сопоставления. Согласно закону Ома, электрический ток, протекающий по участку цепи, прямо пропорционален падению напряжения на нем. Магнитное поле тока также прямо пропорционально его величине. Поэтому между величинами сил  $F_c$  и  $F_n$ , и наблюдаемыми амплитудами  $S_q$  и  $L$ -вариаций, соответственно, должна наблюдаться прямая пропорциональная зависимость. В этом случае отношение  $F_c / F_n$  должно быть равно отношению  $A_c / A_n$ . Несложный расчет показывает, что  $F_c / F_n \approx 180$ . Почти 6-кратное расхождение между теоретическими и экспериментальными данными может быть вызвано следующими причинами. Обратимся вновь к рис.4.4. Пусть под влиянием сил  $F_c$  и  $F_n$  в теле возникнут продольный и поперечный пьезоэффекты. Отметим, что тело находится в Земле, которая является единым проводником электрического тока. Поэтому пьезоэлектрический эффект в направлении оси  $y$  будет вызывать появление электрического тока во всем проводнике, которым является Земля. Кроме того, появление разности потенциалов между различными гранями тела приведет к протеканию тока между ними. Главная же причина расхождения, на наш взгляд, связана с методикой выделения  $L$ -вариаций из общих суточных.

Изменение амплитуды  $L$ -вариаций при изменении расстояния между Землей и Луной связано с изменением величины силы  $F_n$ . Так как она изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от Луны до тела -  $r^2$ , то в перигее амплитуда  $L$ -вариаций должна быть больше, чем в апогее, что и наблюдается. Определим характер зависимости разности амплитуд  $L$ -вариаций  $\Delta A_n$  в точке наблюдения при нахождении Луны на двух разных расстояниях  $l_1$  и  $l_2$  от Земли. Так как амплитуда  $A_n$  прямо пропорционально зависит от величины  $F_n$ , то можно записать:

$$\Delta A_n = K_n (l_1^{-2} - l_2^{-2}), \quad (\text{П } 2.1)$$

где  $K_n$  – некоторая постоянная, а  $l_1$  и  $l_2$  – расстояния от Луны до точки наблюдения в двух ее положениях, причем  $l_1 < l_2$ . После несложных преобразований и, опуская малые члены, выражение (П 2.1) приобретает вид

$$\Delta A_n \approx 2K_n \Delta l / l^3, \quad (\text{П } 2.2)$$

где  $l = (l_1 + l_2) / 2$ , а  $\Delta l = l_2 - l_1$ . Таким образом, амплитуда лунных вариаций с изменением расстояния от Земли до Луны должна изменяться обратно пропорционально этому расстоянию в кубе, что и наблюдается [145].

Суммируя изложенное, можно сказать, что пьезоэлектрическая модель позволила физически стройно объяснить происхождение и основные особенности проявления суточных вариаций. Необходимо отметить исключительно важную роль  $S_q$ -вариаций в поддержание квазистабильного поля  $V_0$ . Поле  $V_0$ , как было показано ранее, образовано благодаря действию тектонических сил в субширотном направлении. В связи с этим по оси  $u$  должен наблюдаться продольный пьезоэффект. Однако при отсутствии суточных вариаций пьезоэлектрические заряды должны были бы сравнительно быстро «нейтрализоваться» за счет свободных электрических зарядов в земной коре. В этом случае поле  $V_0$  перестало бы существовать, а значит, не генерировалось бы и главное поле в жидком ядре. Благодаря суточным вариациям блуждающие заряды не успевают собраться и «нейтрализовать» поляризационные. Суточные вариации, образно говоря, выполняют «роль» своеобразного зарядового устройства, поддерживающее квазистабильное поле  $V_0$  в течение всего времени существования геомагнитного поля.

## ЛОКАЛЬНЫЕ ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Локальные вариации геомагнитного поля имеют линейные размеры не более первых десятков километров. Для их изучения используется специальная методика измерений, подробно изложенная в ряде монографий [например, 1, 4]. Для выделения локальных аномалий геомагнитное поле измеряется в ряде точек у объекта исследования и сопоставляется с полем, измеренным в базисной точке, которая отстоит от них на расстоянии не более нескольких десятков километров. Время от времени цикл измерений повторяют. Отметим, что в подавляющем большинстве случаев измеряется модуль полного геомагнитного поля  $T$ . Результаты измерений представляют в виде графиков зависимости величины  $\Delta T$  от времени наблюдения. Интерес к изучению локальных вариаций геомагнитного поля связан, в первую очередь, с поиском предвестников природных катаклизмов.

Локальные вариации можно подразделить на вариации искусственного и естественного происхождения. Локальные вариации, вызванные инженерной деятельностью человека, были подробно изучены на ряде объектов в Узбекистане и описаны в работах К. Абдуллабекова [1] и С. Максудова [57]. В последние годы в наших работах [5-8] образование этих вариаций рассмотрено с позиций пьезоэлектрической модели. Как правило, амплитуда локальных вариаций, вызванных инженерной деятельностью, не превышает 10 нТл, но с точки зрения теории они имеют существенное значение. Вызвано это возможностью не только качественного, но и количественного объяснения образования аномалий  $\Delta T$  с пози-

ций предлагаемой модели и сопоставления полученных результатов с данными экспериментальных исследований.

Наиболее подробно в течение ряда лет изучались вариации  $\Delta T$  у Чарвакского водохранилища [1, 2]. Чарвакское водохранилище находится в 70 км от г. Ташкента. Его длина составляет  $10 \div 12$  км, при ширине  $2 \div 5$  км. Объем запасаемой воды достигает  $2 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>. Как правило, с конца мая и до первых чисел июля водохранилище находится в заполненном состоянии. С июля по конец сентября водохранилище разгружается и находится в таком состоянии до января. С февраля по май оно вновь заполняется и далее все идет вновь по повторному циклу. Многолетними наблюдениями установлено уменьшение поля  $\Delta T$  с заполнением водохранилища и наоборот (рис. П 3.1).

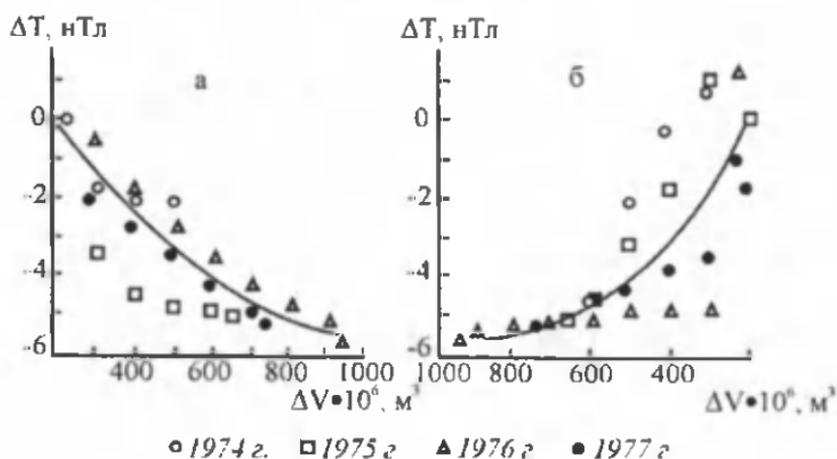


Рис. П.3.1. Зависимость величины вариации геомагнитного  $\Delta T$  поля при нагрузке (а) и разгрузке (б) Чарвакского водохранилища по данным работы [1].

Увеличение объема воды в водохранилище на  $10^9$  м<sup>3</sup> вызывало уменьшение поля  $\Delta T$  на величину около 6 нТл. Зависимость величины вариации  $\Delta T$  от объема воды в

хранилище можно представить в виде ее зависимости от массы  $M$  воды в нем (рис. П 3.2). Из рис. П 3.2 следует, что изменение массы воды в хранилище на величину  $1,5 \cdot 10^{11}$  кг вызывают вариации поля в среднем на величину  $\Delta T \approx 1$  нТл. Вариации у водохранилищ, подобные вышеописанным, наблюдались в различных регионах земного шара [например, 69, 141].

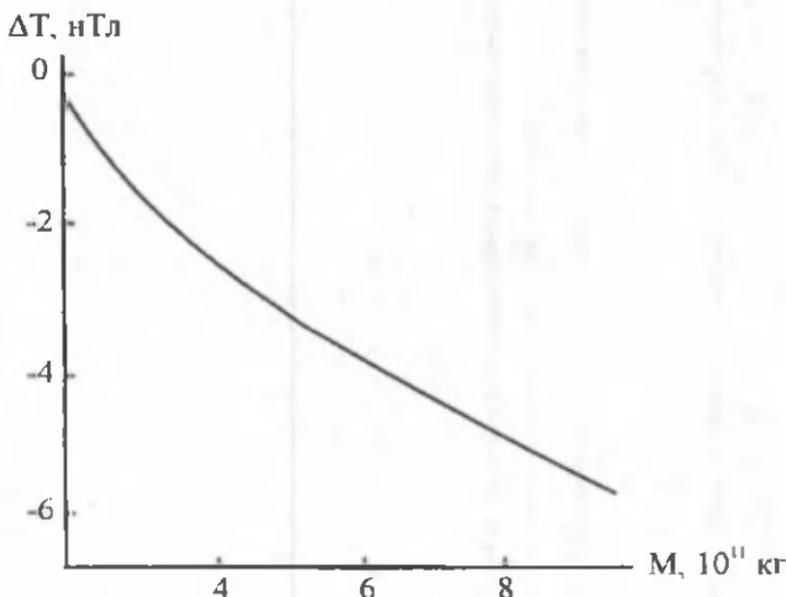


Рис. П 3.2. Зависимость величины вариации геомагнитного поля  $\Delta T$  у Чарвакского водохранилища от массы  $M$  воды в нем.

Для качественного объяснения наблюдаемых вариаций обратимся к рис.4.4. При заполнении водохранилища на нижележащие горные породы, содержащие пьезоэлектрические текстуры, начинает действовать дополнительная сила  $\Delta F_r$ , направленная к центру Земли. Сила  $\Delta F_r$  отвечает за появление механических напряжений  $t_{11}$  вдоль оси  $z$ . Согласно тензору (4.10), напряжение  $t_{11}$  вызывает появление пьезоэлектрического эффекта вдоль оси  $y$ . В предыдущем разделе было показано, что

появление положительного максимума северной компоненты суточных  $S_q$ -вариаций вызвано пьезоэлектрическим эффектом вдоль оси  $y$ . Напомним, что амплитудное значение  $X$ -компоненты  $S_q$ -вариаций наблюдается у экватора в полдень по местному времени. В это время сила  $F_c$ , действующая на тело со стороны Солнца, перпендикулярна земной поверхности и направлена в противоположную относительно силы тяжести сторону. Одним из свойств пьезоэффекта является изменение его полярности при изменении направления действующей силы на прямо противоположное. Поэтому дополнительная сила  $\Delta F_r$ , вызванная объемом воды в водохранилище, должна вызывать отрицательные вариации, что и наблюдается (рис. П 3.2).

Для количественного описания наблюдаемой картины с позиций модели, вообще говоря, необходимо решить так называемую прямую задачу магниторазведки. С этой целью нужно задать начальные и граничные условия задачи. К ним относятся мощность пьезоактивного слоя земной коры, степень ориентированности пьезоэлектрических текстур в нем, расстояние от точки наблюдения до пьезоактивного слоя, величина механических напряжений в этом слое, геометрические размеры слоя и пр. Прямая задача магниторазведки аналитически может быть решена только для тел правильной формы [55]. Но, даже зная все перечисленные параметры, можно провести лишь оценочный расчет величины  $\Delta T$  для конкретного случая. Мощность пьезоактивного слоя может достигать 30 км, а самая глубокая скважина на Земле пробурена до глубины менее 15 км. Кроме того, параметры пьезоактивного слоя могут меняться как по глубине, так и по простиранию. В связи с этим определить параметры пьезоактивного слоя даже для отдельно взятого случая очень затруднительно, если вообще возможно. Тем не менее, оказалось, что при неко-

торых предположениях, используя данные магнитометрических измерений, можно провести количественные оценки.

Примем, что параметры пьезоактивного слоя по региону, в котором расположен Узбекистан, сильно не варьируются. В этом случае в качестве калибровочных данных для всего региона можно использовать усредненные многолетние наблюдения у Чарвакского водохранилища. Известно [74], что величина пьезоэлектрического эффекта линейно зависит от величины приложенной силы  $F_n$ . По закону Ома ток, текущий по участку цепи, прямо пропорционален падению напряжения на нем. Величина индукции также прямо пропорциональна величине тока. Примем также предположение, что мы имеем дело с горными породами, для которых относительная магнитная проницаемость  $\mu_r \approx 1$ . Из сказанного следует, что расчетную величину вариации  $\Delta T$ , вызванной дополнительной нагрузкой на пьезоактивный слой, можно определить из выражения

$$\Delta T = K_1 \cdot \Delta U = K_1 \cdot K_n \cdot F_n \cdot S_1 / S_2, \quad (\text{П } 3.1)$$

где  $K_1$  и  $K_n$  – постоянные. Из рис.4.4 следует:

$$S_1 / S_2 = cb/ab = c/a, \quad (\text{П } 3.2)$$

где  $c$  – мощность пьезоактивного слоя;  $a$  – линейный размер объекта в широтном направлении. Так как мощность пьезоактивного слоя по региону мы приняли неизменной, то выражение (П 3.1) можно представить в виде

$$\Delta T = C_1 \cdot F_n / a, \quad (\text{П } 3.3)$$

где  $C_1$  – постоянная. Из (П 3.3) следует, что величина вариации  $\Delta T$  прямо пропорциональна нагрузке и обратно пропорциональна протяженности объекта в широтном направлении. Чарвакское водохранилище имеет довольно сложную геометрическую форму и оценочный линейный размер его в широтном направлении лежит в диапазоне  $a_n = 5 \div 10$  км. Величину  $F_n$  можно найти, если известны объем  $V$  и удельный вес  $\rho$  воды в водохранилище:

$$F_n = V \cdot \rho \cdot g = M \cdot g, \quad (\text{П } 3.4)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения. Задавшись величинами  $\Delta T$  и  $a_n$  по Чарваку, можно найти постоянную  $C_1$  из выражения (П 3.3), которое можно несколько упростить и записать в виде

$$\Delta T = C \cdot F_n, \quad (\text{П } 3.5)$$

где  $C = C_1 / a_n$ . Используя экспериментальные данные по Чарвакскому водохранилищу, мы из (П 3.5) нашли величину  $C \approx 6,3 \cdot 10^{-22}$  Тл/н. Формулу (П 3.5) можно использовать для расчета величины  $\Delta T$  у произвольного техногенного объекта региона, добавив к нему очевидный множитель:

$$\Delta T = C \cdot F_n \cdot a_i / a_n, \quad (\text{П } 3.6)$$

где  $a_i$  – линейный размер  $i$ -го объекта в широтном направлении.

*Применим формулу (П 3.6) для расчета величины вариации  $\Delta T$  у разрабатываемого Шуртанского газоконденсатного месторождения. Месторождение расположено в 20 км от г. Карши. В плане оно представляет собой антиклинальную структуру эллипсоидальной*

формы с размерами  $14 \times 18 \text{ км}^2$ . Извлекаемый газ находится в карбонатных породах (известняки и доломиты) верхней юры, залегающих на глубинах  $2670 \div 3270 \text{ м}$ . Изучение вариаций  $\Delta T$  у Шуртанского месторождения проводились с 1985 г. В 1991 г. исследования велись на 30 пунктах повторных и двух станциях непрерывных наблюдений. Вариации  $\Delta T$  измерялись относительно станции «Улугбек», расположенной в 180 км к северо-востоку от месторождения. Одна из станций (Шуртан-1) располагалась над куполом углеводородной залежи, а вторая (Шуртан-2) находилась на расстоянии около 25 км к северу от первой [57]. На рис. П 3.3 а,б представлены графики вариаций среднесуточных значений  $\Delta T$  на станциях Шуртан-1(б) и Шуртан-2(а). Видно, что величина  $\Delta T$  на ст. Шуртан-2 за пять месяцев уменьшилась всего на 3 нТл, в то время как на ст. Шуртан-1 за три месяца уменьшение поля составило 7 нТл. На том же рисунке приведен график вариации  $\Delta T$ , полученный путем усреднения по всем пунктам повторных наблюдений. Изменение  $\Delta T$  за пять месяцев наблюдений составило чуть более 9 нТл. На рис. П 3.3 приведены также кривые изменения эксплуатационных параметров месторождения: объема добычи газа  $Q$  и его пластового давления  $p$ . Усредненные экспериментальные данные наблюдений вариаций  $\Delta T$  по пунктам повторных съемок и на ст. Шуртан-1 хорошо согласуются между собой. Вариации  $\Delta T$  хорошо коррелируют с изменением эксплуатационных параметров месторождения. В то же время наличие сравнительно небольших вариаций  $\Delta T$  на ст. Шуртан-2 свидетельствует о том, что они также связаны с эксплуатацией месторождения.

При эксплуатации Шуртанского месторождения газа изменение со временем его линейных размеров или объема не фиксировалось. Ясно, что давление газа в месторождении уравнивается ответным давлением

на него окружающих пород, в порах которых находится вода и воздух. Давление газа в пласте за 5 месяцев эксплуатации в 1991 г. уменьшилась на величину  $\Delta p = 3,7 \cdot 10^5$  Па (рис. П 3.3).

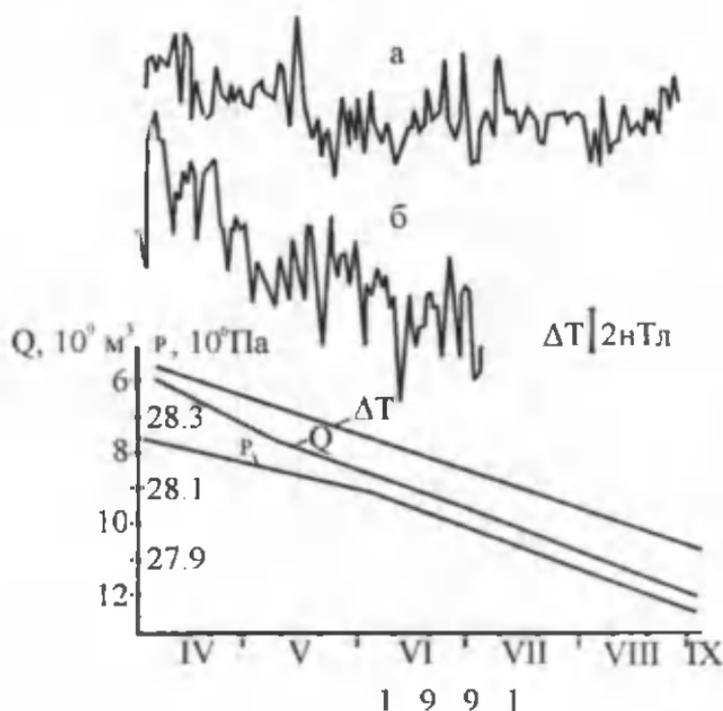


Рис. П 3.3. Вариации геомагнитного поля у газоконденсатного месторождения Шуртан, согласно данным работы [57].

Это, естественно, привело к новому состоянию равновесия между газовой и жидкостной фазами среды. Давление поровой жидкости на границе раздела жидкость-газ должно быть равно давлению газа. Новое состояние равновесия достигается благодаря заполнению части объема месторождения поровой водой. Поэтому на пьезоактивный слой будет оказывать воздействие сила, состоящая из двух компонент:

$$F_{\text{н}} = F_1 + F_2, \quad (\text{П } 3.7)$$

где  $F_1$  - сила, которая определяется изменением давления газа в пласте;  $F_2$  - сила тяжести объема флюида, занявшего место газа, который был вытеснен в результате добычи. Месторождение газа находилось на глубинах 2670÷3270 м и поэтому можно считать, что оно залегает над пьезоактивным слоем. Так как давление газа в пласте падает, то сила  $F_1$  будет иметь противоположное силе  $F_2$  направление. Уменьшение давления газа в пласте приводит к уменьшению силы  $F_1$ , что должно приводить к появлению положительных вариаций  $\Delta T$ . Сила же  $F_2$ , напротив, должна вызывать появление отрицательных вариаций  $\Delta T$ . Так как у месторождения газа геомагнитное поле за 5 месяцев уменьшилось более чем на 9 нТл, то можно считать, что вклад силы  $F_2$  был доминирующим. Величину силы  $F_1$  можно представить в виде

$$F_1 = S \cdot \Delta p, \quad (\text{П } 3.8)$$

где  $S$  - общая площадь пор месторождения в плане, на которую оказывается давление газа. Величина же силы  $F_2$  определяется очевидным выражением

$$F_2 = \Delta V \cdot \rho \cdot g, \quad (\text{П } 3.9)$$

где  $\Delta V$  - объем флюида, занявшего часть объема откаченного газа. Зная активную пористость горных пород месторождения  $n \approx 0,1$  и полную площадь его в плане  $S_n \approx 2,5 \cdot 10^8 \text{ м}^2$ , легко найти величину  $S$ :

$$S = n \cdot S_n. \quad (\text{П } 3.10)$$

Величина  $\Delta V$  неизвестна, но известна величина объема извлеченного газа  $\Delta Q \approx 7,4 \cdot 10^9 \text{ м}^3$ . Очевидно, что  $\Delta V \leq \Delta Q$ . Примем для начала, что  $\Delta V = \Delta Q$ . Подставляя (П 3.7) в

(П 3.6) и учитывая (П 3.9) и (П 3.10), получим следующее выражение для определения расчетного значения вариации  $\Delta T_p$ :

$$\Delta T_p = (n \cdot S_n \cdot \Delta p - \Delta V \cdot \rho \cdot g) \cdot C \cdot a_v / a_i. \quad (\text{П 3.11})$$

Для Шуртанского месторождения  $a_i \approx 15$  км. Подставляя в (П 3.11) известные и заданные величины  $C$ ,  $\Delta p$ ,  $S_n$ ,  $n$ ,  $\rho$ ,  $g$ ,  $\Delta V$ ,  $a_v / a_i \approx 1/2$ , найдем  $\Delta T_p \approx 20$  нТл. Первое слагаемое в (П 3.11), определяемое падением пластового давления газа, оказалось равным около 3 нТл. Расчетное значение вариации оказалось в два раза больше экспериментально наблюдаемой. В целом такое согласие данных можно считать вполне приемлемым. Расхождение в основном вызвано допущением, что весь объем выкаченного газа заполняется водой. Совпадение расчетных и экспериментальных данных получается в случае, если считать, что только около 40% объема выкаченного газа заполняется флюидом.

*Вариации геомагнитного поля над Полторацким газохранилищем* были подробно исследованы в 60÷70-х годах прошлого столетия [1, 3, 4]. Газохранилище расположено недалеко от г.Ташкента и залегает в виде пласта-коллектора на глубине 520÷720 м брахиантиклинальной структуры мощностью 20÷40 м. Протяженность коллектора составляет 6 км при ширине 1,5 км. В качестве покрышки коллектора выступает толща глин мощностью до 80 м. Пластовое давление в коллекторе составляет  $6 \cdot 10^6$  Па. В него периодически закачивается газ под давлением  $9,5 \cdot 10^6$  Па. Над коллектором были заложены 11 пунктов измерений поля  $\Delta T$ , которые проводились с частотой 3÷5 раз в год. На рис. П 3.4 приведены кривые среднегодовых вариаций величин поля  $\Delta T$  и давления  $p$  в газовом куполе за 1968÷1970 гг.

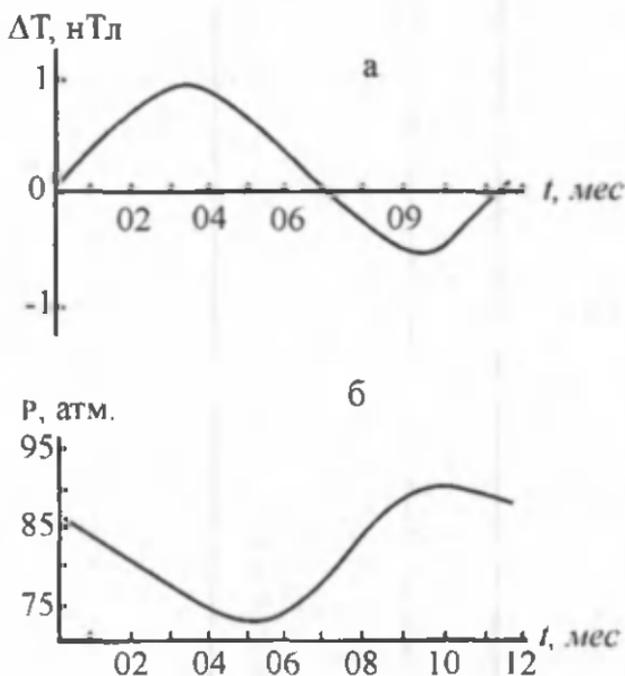


Рис. П 3.4. Вариации геомагнитного поля, связанные с режимом работы Полторацкого газохранилища [1]: а – кривая вариации геомагнитного поля; б – кривая изменения пластового давления.

Видно, что между вариациями поля и давления имеется четкая корреляция: с уменьшением давления увеличивается поле вариаций  $\Delta T$  и наоборот. Вариации  $\Delta T$  у газохранилища во многом напоминают вариации геомагнитного поля у Чарвакского водохранилища: с разгрузкой хранилища вариации  $\Delta T$  увеличиваются, а с нагрузкой – падают. Тем не менее, возникает вопрос о причинах различия характера вариаций у Полторацкого газохранилища и разрабатываемого газоконденсатного месторождения Шуртан.

Прежде чем провести количественные выкладки сделаем качественные сопоставления. С этой целью обратимся к расчетной формуле (П 3.11). Первый член в (П 3.11) ответственен за появление положительных аномалий  $\Delta T$  при откачке газа, а второй – отрицательных за счет

натекания флюида. Так как с падением давления газа в хранилище  $\Delta T$  увеличивается, то можно сделать вывод о доминирующем вкладе первого слагаемого выражения (П 3.11) в наблюдаемую вариацию.

Для выяснения причин малого вклада второго слагаемого выражения (П 3.11) проведем несложные расчеты. Линейная протяженность газохранилища в широтном направлении составляет 4÷5 км. Поэтому отношение  $a_2/a_1$  можно принять равным 1,5. Все остальные параметры, входящие в формулу (П 3.11), нам известны за исключением  $\Delta V$ . Примем, что  $\Delta V$  равно объему  $V$  всего выкаченного (или вкаченного) газа. В этом случае мы сможем оценить верхний предел второго слагаемого в формуле (П 3.11). Площадь газохранилища в плане равна  $S_n \approx 10^7 \text{ м}^2$ , а мощность  $\Delta h \approx 30 \text{ м}$ , при активной пористости  $n \approx 0,1$ . Тогда объем газохранилища будет равен

$$V = n \cdot S_n \cdot \Delta h \approx 3 \cdot 10^7 \text{ м}^3. \quad (\text{П 3.12})$$

Подставляя в (П 3.11) известные и заданные величины, получим  $\Delta T \approx 2,5 \text{ нТл}$ . Вклад второго слагаемого при сделанных предположениях оказался не более  $-0,3 \text{ нТл}$ .

Между расчетными и экспериментальными данными имеется неплохое согласие. Имеющиеся расхождение между ними может быть вызвано принятыми допущениями, а также некоторой неопределенностью геометрических размеров объектов. Формулу (П 3.6) можно использовать для решения обратной задачи, т.е. определения величины силы  $F_n$ . На этом основан предложенный нами способ количественной оценки больших масс перемещенных в земной коре горных пород и минералов [7]. Воспользуемся этим способом для оценки силы извержения вулкана Нгаурохое в Новой Зеландии. Величина  $\Delta T$  при извержениях составляла в среднем около  $15 \text{ нТл}$  (рис. П 3.5).

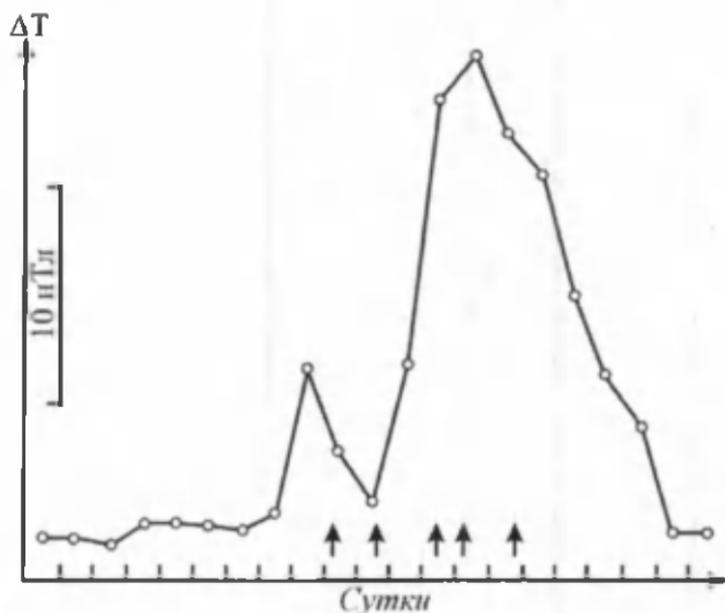


Рис. П 3.5. Вариации геомагнитного поля вблизи вулкана Нгаурохое в Новой Зеландии по данным работы [166]. Стрелками указаны моменты извержений.

Очевидно, что линейный размер вулкана  $a$ , в широтном направлении неизвестен. В ходе наблюдений [166] было выяснено, что всего на расстоянии 8 км от стационарного пункта измерения величины  $\Delta T$  вариация поля была незначительной. Поэтому можно считать, что  $a \leq 5$  км. Кроме того, примем, что для региона, в котором расположена Новая Зеландия, можно использовать найденную нами величину постоянной  $C \approx 6,3 \cdot 10^{22}$  Тл/н. Для такого решения у нас имеются некоторые основания. Дело в том, что у водохранилища в Толбинго (Австралия) были зафиксированы вариации  $\Delta T$ , подобные Чарвакским и одного порядка по своей величине [1, 141]. Объем запасаемой воды в обоих водохранилищах был также, примерно, одинаков. Поэтому величину силы извержения вулкана Нгаурохое  $F_v$  оценим из выражения

$$F_v = \Delta T \cdot a / C \cdot a \leq 1,5 \cdot 10^{13} \text{ н.} \quad (\text{П 3.13})$$

Оказалось, что сила извержения вулкана Нгаурохое имеет тот же порядок величины, что и вес запасаемой в Чарвакском водохранилище воды.

В разобранных выше случаях вариации  $\Delta T$  вызваны действием сил вдоль оси  $z$  и последующим поперечным пьезоэлектрическим эффектом вдоль оси  $y$  (рис.4.4). Эти случаи поддаются количественному описанию, если известны величины  $F_n$  и  $a$ . Во многих случаях наблюдаемые локальные вариации  $\Delta T$  рассчитать по ряду причин очень сложно. К этим случаям можно отнести вариации  $\Delta T$ , наблюдаемые при землетрясениях. Тектонические землетрясения вызваны действием сил, имеющих субгоризонтальное направление. Однако точное направление силы, вызывающей землетрясение, до последнего времени было неизвестным. Неизвестно также месторасположение будущего очага события. В связи с этим расположение пунктов регистрации вариаций  $\Delta T$  относительно очага будущего землетрясения также неизвестно. Наверное, поэтому при землетрясениях регистрируются вариации  $\Delta T$  обоих знаков. Указанное выше объясняет и отсутствие четкой корреляции между амплитудой вариации  $\Delta T$  и энергией землетрясения [1]. Тем не менее, магнитометрический метод остается одним из самых перспективных методов прогнозирования землетрясений. Более подробно механизм образования локальных вариаций  $\Delta T$  с позиций пьезоэлектрической модели был ранее рассмотрен в работе Г.Расуловой [97].

## Приложение 4

Таблица № П 4

Величины объема очага  $\Delta V_0$ , его линейного размера  $l_0$  и магнитуды  $M$  для энергетических классов землетрясений, лежащих в диапазоне  $K=10-19$

№	$K$ энергетический класс	$\Delta V_0$ , $\text{м}^3$	$l_0$ , $\text{м}$	$M$ магнитуда
1	10	$4 \cdot 10^2$	10	3.3
2	11	$4 \cdot 10^3$	20	3.9
3	12	$4 \cdot 10^4$	45	4.5
4	13	$4 \cdot 10^5$	90	5.1
5	14	$4 \cdot 10^6$	200	5.8
6	15	$4 \cdot 10^7$	425	6.4
7	16	$4 \cdot 10^8$	900	7.0
8	17	$4 \cdot 10^9$	2000	7.6
9	18	$4 \cdot 10^{10}$	4300	8.2
10	19	$4 \cdot 10^{11}$	9200	8.9

### Примечание

Энергетический класс землетрясения  $K$  определяет степень, в которую надо возвести число с основанием 10, чтобы получить сейсмическую энергию, выраженную в джоулях. К примеру землетрясение с  $E_c = 10^{17}$  Дж относится к энергетическому классу  $K=17$ .

Объем очага землетрясения был оценен нами по формуле (5.10), где вместо полной энергии  $E_n$  была использована удвоенная величина энергии  $2E_c$ :

$$\Delta V_0 = 2 \cdot E_n / \mu \varepsilon = 4 \cdot E_c / \mu \varepsilon. \quad (\text{П } 4.1)$$

При расчете величины  $\Delta V_0$  по формуле (П 4.1) нами были использованы значения жесткости  $\mu$  и деформации  $\epsilon$  равные  $5 \cdot 10^{10}$  н/м<sup>2</sup> и  $2 \cdot 10^{-3}$ , соответственно.

*Линейный размер очага*  $l_0$  землетрясения был оценен нами в предположении, что очаг имеет форму сферы. В этом случае, как легко убедиться, величину  $l_0$  можно найти из выражения

$$l_0 = 2 \cdot r = (6 \cdot \Delta V_0 / \pi)^{1/3}, \quad (\text{П 4.2})$$

где  $r$  – радиус очага-сферы.

*Магнитуда землетрясения*  $M$  была оценена нами путем использования выражения (1.9). Поэтому для более точного определения величины магнитуды землетрясения, происшедшего в том или ином регионе, необходимо ввести поправочные коэффициенты, которые приведены в литературе [например, 45].

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абдуллабеков К.Н.* Электромагнитные явления в земной коре. Ташкент: Фан, 1989. – 232 с.
2. *Абдуллабеков К.Н., Бердалиев Е.Б., Пушкин А.Н., Шапиро В.А.* Локальные изменения геомагнитного поля при заполнении водохранилища // Геомагнетизм и аэрономия. 1979. №2. С. 317–322.
3. *Абдуллабеков К.Н., Головкин В.П.* Изменения геомагнитного поля и процессы в земной коре // Изв. АН СССР, сер. Физика Земли. 1974. №3. С. 93–100.
4. *Абдуллабеков К.Н., Максудов С.Х.* Вариации геомагнитного поля сейсмоактивных районов. Ташкент: Фан, 1975. – 128 с.
5. *Абдуллабеков К.Н., Расулов Д.Х.* О единой природе аномальных вариаций геомагнитного поля естественного и искусственного происхождения // ДАН РУз. 2000, №4. С. 29–32.
6. *Абдуллабеков К.Н., Расулова Г.Д., Расулов Д.Х.* Физические основы интерпретации данных наблюдений за локальными вариациями геомагнитного поля // Проблемы инженерной геологии и оценки сейсмической опасности. Ташкент: ГПП Узбекгидрогеология, 2000. С. 176–181.
7. *Абдуллабеков К.Н., Расулова Г.Д., Расулов Д.Х.* Способ количественной оценки больших масс перемещенных в земной коре горных пород и минералов // Расмий Ахборотнома. 2001. №6. С. 66.
8. *Абдуллабеков К.Н., Расулова Г.Д., Расулов Д.Х.* Об одном методе количественной оценки величины локальных геомагнитных аномалий // ДАН РУз. 2001. №4–5. С. 33–36.
9. *Абдуллабеков К.Н., Расулова Г.Д., Расулов Д.Х.* О физической природе стационарных геомагнитных и геоэлектрических полей регионального масштаба // Geologiya va mineral resurslar. 2002. №4. С. 29–33.

10. *Абдуллабеков К.Н., Расулова Г.Д., Расулов Д.Х.* Основные аспекты образования аномальных вариаций геофизических полей при тектонических землетрясениях // *Geologiya va mineral resurslar*. 2003. №4. С.30–36.
11. *Абдуллабеков К.Н., Расулова Г.Д., Расулов Д.Х.* Физические предпосылки использования магнитометрического метода исследований для прогноза катастрофических землетрясений // *Проблемы сейсмологии в Узбекистане*. Ташкент: ИС АН РУз. 2006. №3. С. 195–200.
12. *Аки К., Ричардс П.* Количественная сейсмология. М.: Мир, 1983, Т.1–2. – 519 с.
13. Анализ сейсмического риска, спасение и жизнеобеспечение населения при катастрофических землетрясениях (сейсмические, методологические и методические аспекты) / *Шойгу С.К., Шахраманьян М.А., Кофф Г.Л.* и др. М.: ГКЧС РФ, 1992. Ч.1. – 295 с.
14. Аномальные изменения геомагнитного поля в эпицентральной зоне Назарбекского землетрясения / *Цветков Ю.П., Бердалиев Е., Абдуллабеков К.Н.* и др. // Назарбекское землетрясение 11 декабря 1980 г. Ташкент: Фан, 1984. С. 94–97.
15. *Балакина Л.М.* Землетрясения Тихого океана (пространственное расположение и процессы в очагах) // *Геотектоника*. 1983. №5. С. 20–37.
16. *Белоконь В.И., Кочегура В.В., Шолпо Л.Е.* Методы палеомагнитных исследований горных пород. Л.: Недра, 1973. – 247 с.
17. *Белоусов В.В.* Основы геотектоники. М.: Недра, 1989. – 382 с.
18. *Буллен К.Е.* Плотность Земли. М.: Мир, 1978. – 448 с.
19. *Бунэ В.И.* Об использовании метода Голицына для приближенной оценки энергии близких землетрясений // *Труды Ин-та сейсм. АН Таджикистана*. 1956. №54. С. 327.
20. *Бурлацкая С.П., Нечаева Т.Б., Петрова Г.Н.* Напряженность геомагнитного поля за последние 2000 лет

- по мировым данным // Геомagnetизм и астрономия. 1970. Т. 10. №5. С. 878–882.
21. *Вегенер А.* Происхождение материков и океанов. Л.: Наука, 1984. – 285 с.
  22. *Введенская А. В.* Об определении полей смещения при землетрясениях с помощью теории дислокаций // Изв. АН СССР. Сер. геоф. 1956. №3. С. 277–284.
  23. *Введенская А. В.* Об определении напряжений, действующих в очагах землетрясений, по наблюдениям сейсмических станций // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1960. №4. С. 513–519.
  24. *Войтов Г. И.* О газовом дыхании Земли // Природа. 1975. №3. С. 91–98.
  25. *Воларович М. П., Пархоменко Э. И.* Пьезоэлектрический эффект горных пород // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1954. №3. С. 215–222.
  26. *Воларович М. П., Соболев Г. А.* Пьезоэлектрический метод геофизической разведки кварцевых и пегматитовых жил. М.: Наука, 1969. – 132 с.
  27. *Воларович М. П., Томашевская И. С., Будников В. А.* Механика горных пород при высоких давлениях. М.: Наука, 1979. – 152 с.
  28. *Вольвовский Б. С., Кунин Н. Я., Терехин Е. И.* Краткий справочник по полевой геофизике. М.: Недра, 1977. – 391 с.
  29. Газлийские землетрясения 1976 г. / *Алиев С. Х., Атабаев Х. А., Бутовская Е. М.* и др. М.: Наука, 1984. 199 с.
  30. Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг. / *Уломов В. И., Ибрагимов Р. Н., Плотницкий А. Ю.* и др. Ташкент: Фан, 1986. – 368 с.
  31. Гидрогеосейсмологические предвестники землетрясений / *Султанходжаев А. Н., Латипов С. У., Чернов И. Г.* и др. Ташкент: Фан, 1983. – 136 с.
  32. *Гунта Х., Растоги Б.* Плотины и землетрясения. М.: Мир, 1979. – 252 с.

33. *Гуттенберг Б., Рихтер Ч.Ф.* Сейсмичность Земли. М.: Ин. Лит., 1948. – 160 с.
34. *Гуфельд И.Л., Гусев Г.А.* Современное состояние работ по прогнозу землетрясений // Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов: Докл. конф. М.: ОИФЗ РАН, 1998. С. 7–25.
35. *Далимов Т.Н., Троицкий В.И.* Эволюционная геология. Ташкент: Universitet. 2005. С. 584.
36. *Добровольский И.П., Зубков С.И., Мячкин В.И.* Об оценке размеров зоны проявления предвестников землетрясений / Моделирование предвестников землетрясений. М.: Наука, 1980. С. 7–24.
37. *Жарков В.Н.* Физика ядра Земли. Термодинамические свойства // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1960. №10. С. 1417–1425.
38. *Жарков В.Н.* Внутреннее строение Земли и планет. – М.: Наука, 1983. – 416 с.
39. *Завьялов А.Д.* Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. – 154 с.
40. *Захарова А.И.* Некоторые результаты изучения механизма очагов землетрясений Приташкентского района // Геология, стратиграфия и сейсмология Узбекистана. Ташкент: Фан, 1966. С. 90–108.
41. *Зубков С.И.* Предвестники землетрясений. М.: ОИФЗ РАН, 2002. – 140 с.
42. *Емельянова Е.П.* Основные закономерности оползневых процессов. М.: Недра, 1972. – 308 с.
43. *Ермолин Н.П.* Электрические машины. М.: Высшая школа, 1975. – 295 с.
44. *Иванов И., Плотникова Д.* Коллоиды. Л.: Химия, 1975. – 152 с.
45. Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях единой системы сейсмических наблюдений СССР / *Аранович Н.В., Соловьева О.Н., Шебалин Н.В.* и др. М.: Наука, 1981. – 272 с.

46. *Касахара*. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. – 264 с.
47. *Киссин И. Г.* Землетрясения и подземные воды. М.: Наука, 1982. – 176 с.
48. *Климентов П. П., Богданов Г. Я.* Общая гидрогеология. М.: Недра, 1977. – 358 с.
49. *Кондратенко А. М., Нерсесов И. Л.* Некоторые результаты изучения изменения скоростей продольных и поперечных волн в очаговой зоне / Труды ИФЗ, 1962. №25 (192).
50. Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов / Докл. конф. М.: ОИФЗ РАН, 1998. – 164 с.
51. *Курскеев А. К.* Проблемы прогнозирования землетрясений. Алматы: Наука, 1990. – 264 с.
52. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теория упругости. М.: Наука, 1967. – 246 с.
53. *Ларионов А. К., Алексеев В. М., Липсон Г. А.* Влажность грунтов и современные методы ее определения. М.: Недра, 1962. – 134 с.
54. *Ле Пишон К., Франшто Ж., Боннин Ж.* Тектоника плит. М.: Мир, 1977. – 288 с.
55. *Логачёв А. А., Захаров В. П.* Магниторазведка. Л.: Недра, 1979. – 351 с.
56. *Люстих Е. Н.* Изостазия и изостатические гипотезы. М.: Из-во АН СССР, 1957. – 90 с.
57. *Максудов С. Х.* Тектономагнетизм и вариации магнитного поля Земли на геодинамических полигонах Узбекистана: Автореф. дис... докт. физ.-мат. наук. Ташкент, 1996. – 50 с.
58. *Медведев С. В.* Новая сейсмическая шкала // Труды геофиз. ин-та АН СССР. 1953. №21. С.148.
59. *Мейерхофф А. А., Мейерхофф Г. А.* Новая глобальная тектоника – основные противоречия / Новая глобальная тектоника. М.: Мир, 1974. С.377–455.

60. *Мельхиор П.* Земные приливы. М.: Мир, 1968. – 482 с.
61. *Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Симпсон Д., Соболева О.В.* Возбужденная сейсмичность в районе водохранилища Нурекской ГЭС. Душанбе. М.: Дошиш, 1987. – 404 с.
62. *Мози К.* Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. – 382 с.
63. *Моргунов В.А.* Реальности прогноза землетрясений // Физика Земли. 1999. №1. С.79–91.
64. *Муминов М.Ю.* Пространственно-временные особенности проявления сейсмомагнитного эффекта в Узбекистане и их использование в прогнозировании землетрясений: Автор. дис... канд. физ.-мат. наук. Ташкент, 1990. – 18 с.
65. *Мячник В.И.* Процессы подготовки землетрясений. М.: Наука, 1978. – 232 с.
66. *Нейштадт Н.М.* Использование сейсмоэлектрических и пьезоэлектрических явлений в разведочной геофизике. Л.: Недра, 1970. – 80 с.
67. *Ниязов Р.А.* Оползни в лессовых породах. Ташкент: Фан, 1974. – 148 с.
68. Новая глобальная тектоника / *Хесс Г., Вайн Ф., Мэтьюз Д.* и др. М.: Мир, 1974. – 471 с.
69. *Оганесян С.Р., Пушкин А.Н., Баграмян А.Х., Геодакян Э.Г.* О временных изменениях геомагнитного поля и сейсмичности на территории водохранилища «Азат» // Изв. АН Арм. ССР. Сер. Науки о Земле, 1979. С.72–79.
70. *Осика Д.Г.* Флюидный режим сейсмически активных областей. М.: Наука, 1981. – 204 с.
71. Параметры землетрясений и очаговых зон / *Захарова А.И., Матасова Л.М., Фадина М.П.* и др. Ташкент: Фан, 1973. – 144 с.
72. *Паркинсон У.* Введение в геомагнетизм. М.: Мир, 1986. – 527 с.
73. *Пархоменко Э.И.* Измерение пьезоэлектрических модулей горных пород статическим способом // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1957. №4. С.516–519.

74. *Пархоменко Э.И.* Явления электризации в горных породах. М.: Наука, 1968. – 254 с.
75. *Полинг Л., Полинг П.* Химия. М.: Мир, 1978. – 683 с.
76. Проблемы сейсмологии в Узбекистане / Материалы международной конф. «Проблемы оценки сейсмической опасности и снижения последствий землетрясений». Ташкент 16–18 октября 2008 г. Ташкент: ИС АН РУз. 2008. №5. – 302 с.
77. Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности / *Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Ранцман Е.Я.* и др. М.: Наука, 1988. – 176 с.
78. *Пудовкин И.М., Валужева Г.Е.* О причинах так называемого западного дрейфа геомагнитного поля // Геомагнетизм и аэрономия. 1967. Т. 7. №5. С. 923–926.
79. *Пухляков Л.А.* Обзор геотектонических гипотез. – Томск: Томский ун-т. 1970. – 266 с.
80. *Райс Дж.* Механика очага землетрясения. М.: Мир, 1982. – 217 с.
81. *Расулов Д.Х.* Физическая природа «меняющихся во времени полей» // Узб. геол. журн. 1986. №6. С. 74–76.
82. *Расулов Д.Х.* К вопросу определения динамики напряженного состояния горных пород при изучении ЭГП на полигонах // Вопросы мониторинга экзогенных процессов. Труды Ин-та ГИДРОИНГЕО. Ташкент: САИГИМС, 1986. С. 78–83.
83. *Расулов Д.Х.* Положительные аномалии над пегматовыми жилами // Применение ЭВМ при решении задач гидрогеологии и инженерной геологии. Труды ГИДРОИНГЕО, Ташкент: САИГИМС, 1987. С. 94–97.
84. *Расулов Д.Х.* Пьезоэлектрические поля Земли и их практическое значение. М., 1988. – 42 с. Деп. в ВИЭМС 26.04.88, №569 МГ.
85. *Расулов Д.Х.* Об эффекте свечения атмосферы перед сильными землетрясениями // Проблемы сейсмологии и ин-

женерной геологии / Тез. докл. Ташкент: ГГП «Узбекгидро-геология», 1995. С.12.

86. *Расулов Д.Х.* О природе некоторых видов аномалий геомагнитного поля // Докл. АН РУз. 1999. №12. С. 31–34.
87. *Расулов Д.Х.* Основные следствия пьезоэлектрической модели образования земного магнетизма // Докл. АН РУз. 2001. №8–9. С. 72–75.
88. *Расулов Д.Х.* Геомагнетизм и геоэлектричество. Происхождение и взаимосвязь. Ташкент: Фан, 2007. – 236 с.
89. *Расулов Д.Х.* О проблемах тектоники литосферных плит / Мат. науч. конф. «Актуальные вопросы геологии и геофизики», Ташкент 4–6 сентября 2007 г. Ташкент: Фан, 2007. Т.1. С. 41–43.
90. *Расулов Д.Х., Расулов У.Х.* Некоторые аспекты происхождения земного магнетизма // Докл. АН РУз. 1996. №3. С. 20–23.
91. *Расулов Д.Х., Расулова Г.Д.* О механизме генерации главного геомагнитного поля в жидком ядре Земли // Докл. АН РУз. 2000. №2. С. 41–44.
92. *Расулов Д.Х., Расулова Г.Д.* О механизме землетрясений в земной коре // Geologiya va mineral resurslar. 2001. №3. С. 46–48.
93. *Расулов Д.Х., Расулова Г.Д.* Процесс землетрясения с позиций гидроударной модели // Geologiya va mineral resurslar. 2003. №1. С. 29–34.
94. *Расулов Д.Х., Расулова Г.Д.* Физические причины генерации мелкофокусных землетрясений в зонах разлома. Проблемы сейсмологии в Узбекистане. Ташкент: ИС АН РУз. 2008. №5. С. 73–75.
95. *Расулов Д.Х., Рахматуллаев Х.Н.* О физической природе термоэлектрического эффекта природных минералов // Узб. геол. журн. 1996. №1. С. 74–79.
96. *Расулов Д.Х., Рахматуллаева М.Ф.* О возможной природе естественного электрического поля над

- рудными месторождениями // *Geologiya va mineral resurslar*. 1999. №4. С. 40–47.
97. *Расулова Г.Д.* Физические основы интерпретации аномальных вариаций геомагнитного поля на сейсмоактивной территории Узбекистана: Автореф. дис... канд. физ.-мат.наук. Ташкент, 2004. – 19 с.
98. *Рихтаке Т.* Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1979. – 390 с.
99. *Рихтер Ч.Ф.* Элементарная сейсмология. М.: ИЛ., 1963. – 671 с.
100. *Саваренский Е.Ф., Кинос Д.П.* Элементы сейсмологии и сейсмометрии. М.: Гос. изд-во технико-теоретич. литры, 1955. – 544 с.
101. Сейсмическое районирование и прогноз землетрясений в Узбекистане / *Абдуллабеков К.Н., Артиков Т.У., Ибрагимов Р.Н.* и др. Ташкент: ГИДРОИНГЕО, 2002. – 132 с.
102. Сейсмогеодинамика Каржантауского разлома / *Ярмухамедов А.Р., Умурзаков Р.А., Турапов М.К.* и др. Ташкент: Universitet, 2000. – 236 с.
103. *Семенов А.Н.* Изменение отношения времен пробега продольных и поперечных волн перед сильным землетрясением // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. 1969. №4. С. 72–77.
104. *Соболев Г.А.* Проблема прогноза землетрясений // *Природа*. 1989. №12. С. 47–55.
105. *Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. – 313 с.
106. *Соболев Г.А., Демин В.М.* Механоэлектрические явления в Земле. М.: Наука, 1980. – 215 с.
107. *Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. – 270 с.
108. *Стейси Ф.Д.* Физика Земли. М.: Мир, 1972. – 342 с.
109. Ташкентское землетрясение 26 апреля 1966 / Под редакцией *Мавлянова Г.А.* Ташкент: Фан, 1971. – 672 с.
110. *Тяпкин К.Ф.* Физика Земли. Киев: Вища школа, 1998. – 312 с.

111. *Уеда С.* Новый взгляд на Землю. М.: Мир, 1980. – 216 с.
112. *Уломов В. И.* Деформация горных пород в области очага / Ташкентское землетрясение 26 апреля 1966 года. Ташкент: Фан, 1971. С. 58–68.
113. *Уломов В. И., Мавашев Б. З.* О предвестнике сильного тектонического землетрясения // Докл. АН СССР. 1967. №7. С. 81–85.
114. *Уломова Н. В., Захарова А. И., Уломов В. И.* Очаговая область повторных толчков Ташкентского землетрясения / Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг. Ташкент: Фан, 1986. С. 80–88.
115. *Фаткуллин М. Н., Фельдштейн Я. И.* Спокойные солнечно-суточные вариации в период МГТ. 111. Основные особенности планетарного распределения вариаций на средних и низких широтах // Геом. и аэрон., 1965. №5. С. 858–867.
116. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. М.: Мир, 1966. вып. 5. – 296 с.
117. Физические свойства горных пород при высоких давлениях и температурах / Материалы 6 совещания, сентябрь, 1981 г. Ташкент: Фан, 1981. – 199 с.
118. Физические основы прогнозирования разрушения горных пород / Тезисы докладов 2 школы-семинара, 3–12 сентября 1985 г. Фрунзе: Илим, 1985. – 165 с.
119. *Фриш С. Э., Тиморева А. В.* Общий курс физики. М.: Физматгиз, 1962. Т. 1. – 466 с.
120. *Хаин В. Е.* Общая геотектоника. М.: Недра, 1973. – 511 с.
121. *Холмс А.* Основы физической геологии. М.: ИЛ, 1949. – 590 с.
122. *Храмов А. Н.* Магнитное поле Земли в позднем палеозое // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1967. №1. С. 86–108.
123. *Храмов А. Н., Шолпо Л. Е.* Палеомагнетизм. Принципы, методы и геол. приложения палеомагнитологии. Л.: Недра, 1967. – 251 с.

124. *Шамина О. Г.* Модельные исследования физики очага землетрясения. М.: Наука, 1981. – 191 с.
125. *Шебалин Н. В.* О связи между энергией, бальностью и глубиной очага землетрясения // Изв. АН СССР. Сер. Геофиз., 1955. №4. С. 377–380.
126. *Шебалин Н. В., Иодко В. В.* Вопросы оперативной гипоцентрии / Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг. Ташкент: Фан, 1986. С. 180–184.
127. *Шимони К.* Физическая электроника. М.: Энергия, 1977. – 607 с.
128. *Шубников А. В.* Пьезоэлектрические текстуры. М.: Из-во АН СССР, 1946. – 100 с.
129. *Шубников А. В., Флинт Е. Е., Бокий Г. Б.* Основы кристаллографии. М.Л.: Изд-во АН СССР, 1940. – 488 с.
130. *Яновский Б. И.* Земной магнетизм. Л.: ЛГУ, 1978. – 592 с.
131. *Aggarwal Y. P., Sykes L. R., Simpson D. W., Richards P. G.* Spatial and temporal variations in  $t_s/t_p$  and P-wave residuals at Blue Mountain Lake; application to earthquake prediction // J. Geophys. Res. 1975. 80. 718–732.
132. *Aki K.* Study of earthquake mechanism by a method of phase equalization applied to Rayleigh and Love waves // J. Geophys. Res. 1960. 65. 729–740.
133. *Aki K.* Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964. Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from the G-wave spectrum // Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo University, 1966. 44. P. 73–88.
134. *Anderson J. A., Wood H. O.* Description and theory of the torsion seismometer // Bull. Seismol. Soc. Am., 1925. 15. P. 129–137.
135. *Bauer L. A.* The physical decomposition of the Earth's permanent magnetic field // Terr. Mag., 1904. 9. P. 173–186.
136. *Belousov V. V.* Against the Hypothesis of Sea-Floor Spreading // Tectonophysics, 1970. 9. P. 489–511.

137. *Benioff H., Hress F., Smith S.W.* Excitations of the free oscillations of the Earth by earthquakes // *J. Geophys. Res.*, 1961. **66**. P. 605–618.
138. *Brace W.F., B.B. Paulding, Jr., Scholz C.* Dilatancy in the Fracture of Crystalline Rocks // *J. Geophys. Res.*, 1966. **71**. P. 3939–3953.
139. *Byerly P.* Nature of faulting as deduced from seismograms / In *Crust of the Earth* // *Geol. Soc. Am.*, 1955, special paper. **62**. P.75–85.
140. *Dambara T.* Vertical movement of the Earth's crust in relation to the Matsushiro earthquake // *J. Geod. Soc. Japan*, 1966. **12**. P.18–45 (in Japanese).
141. *Davis P.M. and Stacey F.D.* Geomagnetic anomalies caused by a man made lake // *Nature*, 1972. **240**. P. 348–349.
142. *Derr J.S.* Earthquake lights: a review of observations and present theories // *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1973. **63**. P. 2177–2187.
143. *Dietz R. S.* Continent and ocean basin evolution by spreading of the sea floor // *Nature*. 1961. **190**. P. 854–857.
144. *Engle H.M.* The Montana earthquakes of October, 1935; structural lessons // *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1936. **26**. P. 99–109.
145. *Chapman S.* Solar and lunar diurnal variations of terrestrial magnetism. // *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 1919. Ser. A. **218**. P. 1–118.
146. *Chinnery M.A.* The deformation of the ground around surface faults // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1961. **51**. P. 355–372.
147. *Clarke S.H., Nilsen T.H.* Displacement of Eocene strata and implications for the history of offset along the San Andreas Fault, central and northern California // *Proceed. Conference on Tectonic Problems of San Andreas Fault System / Stanford Univ. Publ., Geol. Sci.*, 1973. **13**. P. 358–367.
148. *Cox A., Dalrymple G.B.* Statistical analysis of geomagnetic reversal data and the precision of potassium – argon dating // *J. Geophys. Res.* 1967. **72**. P. 2603–2614.

149. *Geller R.J.* Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes // *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1976. **66**. P. 1501–1523.
150. *Gibbs J.F., Healy J.H., Raleigh C.B., Coakley J.* Seismicity in the Rangely, Colorado, area: 1962–1970 // *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1973. **63**. P. 1557–1570.
151. *Griggs D.T., Baker D.W.* The origin of deep-focus earthquakes / In book: *Properties of Matter under Unusual Conditions*. New York, 1969. P. 23–42.
152. *Gordon R.B.* Thermally activated processes in the earth: creep and seismic attenuation // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1967. **14**. P. 33–43.
153. *Graham G.V.* Note of the significance of inverse magnetization of rocks // *J. Geophys. Res.* 1952. **57**. P. 429–431.
154. *Gupta H.K., Rastogi B.K., Narain H.* The Koyna earthquake of December 10: a multiple seismic event. // *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1971. **61**. P. 167–176.
155. *Gutenberg B.* Magnitude determination for deep focus earthquakes // *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1945. **35**. P. 117–130.
156. *Gutenberg B., Richter C.F.* Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration // *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1942. **32**. P. 163–191.
157. *Gutenberg B., Richter C.F.* Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration (second paper) // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1956. **46**. P.105–145.
158. *Gutenberg B., Richter C.F.* Magnitude and energy of earthquakes // *Ann. Geofisica*, 1956. **9**. P. 1–15.
159. *Hassoup A., Haseeb G., Dahy S.* Seismicity of the Lake Aswan area, Egypt, between 1991–1999 // *Acta Geophys. Pol.* 2002. **50**. P. 361–372.
160. *Healy J.H., Rubey W.W., Griggs D.T., Raleigh C.B.* The Denver earthquakes // *Science*, 1968. **161**. P. 1301–1310.

161. *Hess H.H.* History of oceans basins / In: Petrologic Studies – Buddington Memorial Volume: New York, Geol. Soc. Am., 1962. P. 699–720.
162. *Hospers J.* Reversals of the main geomagnetic field // Proc. Koninkl. Nederlandse Akad. Sci., 1953, ser. B, **56**, P. 467–476, 477–491; 1954, ser. B, **57**. P. 112–121.
163. *Houben H., Gierasch P.J., Turcotte D.L.* Can the geomagnetic dynamo be driven by the semidiurnal tide? // EOS Trans. AGU, 1975. **56**. P. 356.
164. *Hubbert M.K., Rubey W.W.* Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting // Bull. Geol. Soc. Am., 1959. **70**. P. 115–166.
165. *Isaks B., Oliver J., Sykes L.R.* Seismology and the new global tectonics // Journ. Geophys. Res. 1968. **73**. P.5855–5899.
166. *Johnston M.J.S., Stacey F.D.* Transient magnetic anomalies accompanying volcanic eruptions in New Zealand // Nature. 1960. **224**. P. 1289–1290.
167. *Kanamori H.* The energy release in great earthquakes // Journ. Geophys. Res. 1977. **82**. 2981–2987.
168. *Le Pichon X.* Sea-floor spreading and continental drift // Journ. Geophys. Res. 1968. **73**. P. 3661–3697.
169. *Lehmann I.* P'time curves // Bur. Centr. Seism. Intern. 1936. Ser.A. **14**. P. 3–31.
170. *Lomnitz C.* Statistical prediction of earthquakes // Rev. Geophys. 1974. **4**. P. 377.
171. *Mallet R.* Great Neapolitan Earthquake of 1857. The first principles of observational seismology. London: Chapman & Hall, 1862.
172. *Mandal P, Rastogi B.K., Satyanarayana H.V.S., Kousalya M.* Results from Local Earthquake Velocity Tomography: Implications toward the Source Process Involved in Generating the 2001 Bhuj Earthquake in the Lower Crust beneath Kachchh (India) // Bull. Seismol. Soc. Am. 2004. **94**. P. 633–649.

173. *Marton P.* Secular variation of the geomagnetic virtual dipole field during the last 2000 years from archaeomagnetic data // *Pure Appl. Geophys.* 1970. **81**. P. 163–176.
174. *Matsushita S.* Solar quiet and lunar daily variations fields / *Physics of geomagnetic phenomena*. N.Y.-L.: Acad. Press, 1967. P. 301–424.
175. *Mekkawi M., Grasso J.R., Schnegg P.A.* A Long-Lasting Relaxation of Seismicity of Aswan Reservoir, Egypt, 1982–2001 // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2004. **94**. P. 479–492.
176. *Meyerhoff A.A., Meyerhoff H.A.* The New global tectonics, major inconsistencies // *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.*, 1972. **56**. P. 269–336.
177. *Mjachkin V.I., Brace W.F., Sobolev G.A., Dieterich J.H.* Two models fore earthquake forerunners // *Pure. Appl. Geophys.* 1975. **113**. P. 169–181.
178. *Mogi A.* Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and their relation to earthquake phenomena // *Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo*, 1962. **40**. P. 125–173.
179. *Morgan W.J.* Rises, trenches, great faults and crustal blocks // *Journ. Geophys. Res.* 1968. **73**. P. 1959–1982.
180. *Nur A.* Dilatancy, pore fluids, and premonitory variations of  $t_s/t_p$  travel times // *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1972, **62**, P. 433–451.
181. *O'Connell R.J.* Rheology of the mantle // *EOS. Trans. Amer. Geophys. Union.* 1971. **52**. P. 140–142.
182. *Oldam R.D.* Report on the great earthquake of 12th June 1897 // *Mem. Geol. Survey India*, 1899. **29**. P. 1–379.
183. Prediction of the Haycheng Earthquake / *B. Raleygh, G. Bennet, H. Creyg et al* // *Trans. Amer. Geophys. Union.* 1977. **58**. P. 236–272.
184. *Press F.* Displacements, strains, and tilts at teleseismic distances // *J. Geophys. Res.* 1965. **70**. P. 2395–2412.
185. *Reid H.F.* The elastic-rebound theory of earthquakes // *University of California Publ. Geol. Sci.* 1911. **6**. P. 413–444.

186. *Reid H.F.* The Mechanics of Earthquakes. The Elastic Rebound Theory. Regional Strain // Bull. Nat. Research Council. 1933. 90. P. 87–103.
187. *Richter C.F.* An instrumental earthquake scale // Bull. Seismol. Soc. Am. 1935. 25. P. 1–32.
188. *Rikitake T.* Oscillations of a system of d'Alambert dynamo // Proc. Cambridge Phil. Soc. 1958. 54. P. 89–105.
189. *Savage J.C.* The mechanics of deep-focus faulting // Tectonophysics. 1969. 8. P. 115–127.
190. *Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P.* Earthquake prediction: A physical basis // Science. 1973. 181. P. 803–810.
191. *Schwartz E.J., Symons D.T.A.* Geomagnetic intensity between 100 million and 2500 million years ago // Phys. Earth Planet. Int. 1969. 2. P. 11–18.
192. *Seeber L., Armbruster J.G., Kim W.Y.* A fluid-injection triggered earthquake sequence in Ashtabula, Ohio: implications for seismogenesis in stable continental regions // Bull. Seismol. Soc. Am. 2004. 94. P. 76–87.
193. Seismicity at Warna reservoir (near Koyna) through 1995 / *B.K. Rastogi, R.K. Chadha, C.S.P. Sarma et al* // Bull. Seismol. Soc. Am. 1997. 87. P. 1484–1494.
194. *Simpson D., Negmatullaev S.H.* Induced Seismicity at Nurek Reservoir, Tadzhikistan, USSR // Bull. Seismol. Soc. Am. 1981. 71. P. 1561–1586.
195. *Stierman D.J., Ellsworth W.* Aftershocks of the February 21, 1973 Point Mugu, California Earthquake // Bull. Seismol. Soc. Am. 1976. 66. P. 1931–1952.
196. *Tocher D.* Earthquake energy and ground breakage // Bull. Seismol. Soc. Am. 1958. 48. P. 147–152.
197. *Tsuboi C.* Earthquake energy, earthquake volume, aftershock area and strength of the earth's crust // J. Phys. Earthq. 1956. 4. P. 63–66.
198. *Utsu T., Seki A.* A relation between the area of aftershock region and the energy of main shock // Zisin, J. Seismol. Soc. Japan. 1955. 7. P. 233–240 (in Japanese).

199. *Vestine E.H., Laporte L., Cooper C.* Geomagnetic secular change during past epochs // *Trans. AGU.* 1946. 27. P. 814.
200. *Vine F.J., Matthews D.H.* Magnetic anomalies over oceanic ridges // *Nature.* 1963. 199. P. 947-949.
201. *Wilson J.T.* A new class of faults and their bearing of continental drift // *Nature.* 1965. 207. P. 343-347.
202. *Wolf L.W., Rove C.A., Horner R.B.* Periodic Seismicity near Mt. Olden on the Alaska-British Columbia Border: A Case for Hydrologically Triggered Earthquakes? // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1997. 87. P. 1473-1483.
203. *Wood H.O., Neumann F.* Modified Merkalli intensity scale of 1931 // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1931. 21. P. 277-273.
204. *Yukutake T.* The westward drift of the magnetic field of the Earth // *Bull. Earth. Res. Inst.* 1962. 40. P. 1-66.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	5
Введение .....	9
<i>Глава первая. Основные понятия и определения, используемые в сейсмологии</i> .....	13
1.1. Краткая история развития макросейсмических исследований .....	13
1.2. Магнитуда землетрясения .....	15
1.3. Энергия землетрясения .....	19
1.4. Очаг землетрясения .....	20
1.5. Сейсмический момент .....	23
1.6. Статистика землетрясений .....	24
<i>Глава вторая. Основные теоретические представления о природе тектонических землетрясений</i> .....	27
2.1. Теория упругой отдачи .....	27
2.2. Дилатансионные модели .....	29
2.3. Особенности излучения сейсмических волн при землетрясениях и механизм очага .....	31
2.4. Дислокационные модели в сейсмологии. Выводы .....	37
<i>Глава третья. Современные представления о происхождении тектонических сил</i> .....	40
3.1. Краткая информация о внутреннем строении Земли .....	40
3.2. Гипотеза изостазии .....	43
3.3. Концепция тектоники литосферных плит .....	45
<i>Глава четвертая. Геомагнетизм и тектогенез</i> .....	50
4.1. Пьезоэлектрическая модель образования земного магнетизма .....	51
4.1.1. Движение вращающейся заряженной частицы в магнитном поле .....	53
4.1.2. Характер движения свободных электронов жидкого ядра под действием магнитного поля .....	56
4.1.3. О механизме генерации в земной коре постулированного магнитного поля .....	58

4.1.4. Интерпретация основных особенностей проявления главного геомагнитного поля.....	65
4.2. Модернизированная концепция тектоники литосферных плит.....	74
<b>Глава пятая. Гидроударная модель тектонических землетрясений.....</b>	<b>84</b>
5.1. Основные положения гидроударной модели.....	85
5.2. Оценка энергии и объема очага мелкофокусных землетрясений.....	90
5.2.1. Энергия землетрясения.....	90
5.2.2. Объем очага землетрясения.....	91
5.3. Два примера оценки энергии и объема очага землетрясения.....	93
5.4. Форшоки и афтершоки.....	99
<b>Глава шестая. Трактовка основных особенностей проявления тектонических землетрясений и сопутствующих им явлений с позиций гидроударной модели.....</b>	<b>108</b>
6.1. Разлом, генерирующий землетрясения.....	108
6.2. Глубокофокусные землетрясения.....	113
6.3. Сейсмический момент, механизм очага, продолжительность, гипоцентр и эпицентр землетрясения.....	116
6.4. География и статистика землетрясений.....	122
6.5. О явлениях, сопутствующих землетрясениям.....	125
<b>Глава седьмая. Возбужденная сейсмичность и проблема предсказания землетрясений.....</b>	<b>132</b>
7.1. Возбужденная сейсмичность.....	132
7.2. Предсказание землетрясений.....	136
7.2.1. Исторические сведения.....	137
7.2.2. Предвестники землетрясений.....	142
7.2.3. Вопросы прогнозирования землетрясений.....	146
7.3. Гидроударная модель о методике прогнозирования землетрясений.....	149

7.3.1. Общие положения .....	149
7.3.2. Перспективы использования магнитометрического способа наблюдений .....	151
7.3.3. О потенциальных возможностях некоторых методов прогноза землетрясений .....	161
<b>Заключение .....</b>	<b>164</b>
Приложение 1. Основные данные о пьезоэлектрических свойствах кварца и кварцосодержащих горных пород .....	166
Приложение 2. Суточные вариации геомагнитного поля.....	174
Приложение 3. Локальные вариации геомагнитного поля.....	184
Приложение 4. Величины объема очага $\Delta V_0$ , его линейного размера $l_0$ и магнитуды $M$ для энергетических классов землетрясений, лежащих в диапазоне $K=10-19$ .....	198
<b>Список использованной литературы.....</b>	<b>200</b>

Все замечания и предложения по книге авторы просят присылать по адресу:

700011, Ташкент, Ц-14, д. 20 кв. 8.  
тел. (3712) 244-45-88

E-mail: gulnara\_1972@mail.ru;  
jahongir.rasulov@inbox.ru

## CONTENTS

Preface.....	5
<b>Introduction.....</b>	<b>9</b>
<b>Chapter one. Main notions and definitions are used in the seismology.....</b>	<b>13</b>
1.1. Brief history of development the macroseismic investigations.....	13
1.2. Earthquake magnitude.....	15
1.3. Earthquake energy .....	19
1.4. Earthquake source .....	20
1.5. Seismic moment .....	23
1.6. Statistics of earthquakes.....	24
<b>Chapter two. The main theoretic conceptions about nature of tectonical earthquakes.....</b>	<b>27</b>
2.1. The elastic – rebound theory .....	27
2.2. Dilatancy models.....	29
2.3. Radiation peculiarities of seismic waves and mechanism of earthquakes .....	31
2.4. The dislocation models in seismology. Inferences.....	37
<b>Chapter three. Recent conceptions about genesis the tectonic forces.....</b>	<b>40</b>
3.1. Brief information about interior structure of the Earth.....	40
3.2. Isostasy hypothesis.....	43
3.3. Conception of tectonics plate .....	45
<b>Chapter four. Geomagnetism and tectogenesis.....</b>	<b>50</b>
4.1. The piezoelectric model generation of terrestrial magnetism.....	51
4.1.1. The movement of the rotational charged particle in the magnetic field.....	53

4.1.2. The character of movement conduction electrons of the liquid core of Earth by action of magnetic field.....	56
4.1.3. About the mechanism generation of postulated magnetic field in the Earth's crust .....	58
4.1.4. Interpretation basis peculiarities of main geomagnetic field.....	65
4.2. Modernized conception of tectonics plate.....	74
<b>Chapter five. Hydroshock model of tectonic earthquakes .....</b>	<b>84</b>
5.1. Main thesises of hydroshock model.....	85
5.2. Calculation energy and volume of source of shallowfocus earthquakes.....	90
5.2.1. Energy of earthquake.....	90
5.2.2. Volume of source of earthquake .....	91
5.3. Two example calculation energy and volume of source of earthquake .....	93
5.4. Foreshocks and aftershocks.....	99
<b>Chapter six. Explanation main peculiarities of tectonic earthquakes and a set of accompanied them phenomena from position of hydroshock model.....</b>	<b>108</b>
6.1. The fault generating earthquakes .....	108
6.2. Deep – focus earthquakes.....	113
6.3. Seismic moment, earthquake mechanism, duration, hypocenter and epicenter of earthquakes.....	116
6.4. Geography and statistics of earthquakes.....	122
6.5. About phenomena accompanied earthquakes.....	125

<b>Chapter seven. Induced seismicity and problem of earthquakes prediction</b> .....	132
7.1. Induced seismicity.....	132
7.2. Earthquakes prediction.....	136
7.2.1. Historical data.....	137
7.2.2. Precursors of earthquakes.....	142
7.2.3. The questions of earthquakes prediction ...	146
7.3. Hydroshock model about the method of earthquakes prediction .....	149
7.3.1. General thesises.....	149
7.3.2. The perspectives of use magnitometric method of observations .....	151
7.3.3. About potential possibilities of some methods prediction of earthquakes.....	161
<b>Conclusions</b> .....	164
Appendix 1. Main data about piezoelectric qualities of quartz and quartz-contained rocks .....	166
Appendix 2. The diurnal variations of geomagnetic field.....	174
Appendix 3. The local variations of geomagnetic field .....	184
Appendix 4. The values of source volume, it linear dimensions and magnitude for earthquakes with energetic class $K= 10\div 19$ .....	198
<b>References</b> .....	200

# THE PHYSICS OF TECTONIC EARTHQUAKES

*DJAKHANGIR H. RASULOV & GULNARA D. RASULOVA*

Summary: In the monograph gives theoretical conceptions about the genesis of tectonic earthquakes. These conceptions are designed in the form of hydroshock model. According to model, before the earthquake the state of rocks in the source are changed from solid into liquid that leads the action of tectonic tension in it to all possible directions. It is shown that liquid source may fulfill the role of natural hydraulic press and by this increases many times the tectonic force acting on the rocks surrounding it. From the positions of hydroshock model clear and synonymous definition to the notion of volume the source are given; deduced formulas for estimation energy and source volume of earthquake; showed difference between the volumes of source and rock radiating the seismic waves; the physic nature of forshocks and aftershocks is given.

Good accordance between theoretic and experimental data is shown on example of Tashkent 1966 y., Gazly 1984 y. (Uzbekistan) and Mugu 1973 y. (USA) earthquakes. The causes of disposition of earthquakes to active faults are discovered. In work explains phenomena accompanied earthquakes; genesis induced seismicity near man made lakes. Briefly are given and on concrete examples showed the methodical recommendation for prediction of earthquakes near the megopolices.

The book intends for geophysics, physics, geologists and other specialists working in seismology as well as for undergraduate and graduate students corresponding specialties as an additional educational text book.

**Д.Х. Расулов, Г.Д. Расулова**

**ФИЗИКА  
ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

*Утверждено к печати Ученым советом  
Института сейсмологии АН РУз им. Г. Малянова*

*Редактор А.С. Михерева*

*Технический редактор Ж. Абдужалилов*

*Корректор К. Загряжская*

Изд. № 3-75. Сдано в набор 20.04.09. Подписано в печать 04.05.09 г.

Формат 84x108  $\frac{1}{32}$  Гарнитура «Times New Roman»

Печать офсетная. Уч.-изд.л. 9,0 Тираж 500 экз. Заказ № 210.

Цена договорная.

Издательство «Фэн» АН РУз: 100170. Ташкент, ул. И. Муминова, 9.

Отпечатано в типографии ООО «MAXIGRAF PLUS»:

100156, Ташкент, Чиланзар, квартал 20 «А», д. 42.